



Grupo de Investigación en Planeamiento de Sistemas Eléctricos de Potencia

Convenio Específico UTP-CREG

Apoyo académico y soporte técnico en el proceso de implementación de planes de reducción de pérdidas de energía eléctrica, la definición de incentivos para la reducción de éstas y el reconocimiento de los costos asociados con estos planes, de acuerdo con las políticas definidas en el decreto 387 de 2007

PRESENTACIÓN DEL PROYECTO
AGOSTO 24 DE 2010



Universidad
Tecnológica
de Pereira



Comisión de Regulación
de Energía y Gas



Agenda de la Presentación

1. Alcance del contrato
2. Personal y frentes de trabajo
3. Propuesta de metodologías para reducción de pérdidas técnicas
4. Revisión cálculo de pérdidas técnicas en el nivel de tensión 1
5. Plan de acción propuesto para la mejora del cálculo de pérdidas técnicas

1. Alcance del contrato

El 23 de noviembre del año 2009 la UTP y la CREG firmaron un convenio interadministrativo cuyo objeto es:

“Que la UTP adelante los estudios técnicos requeridos para la ejecución de los proyectos de regulación establecidos en la agenda de regulación de 2009 y 2010, relacionados con la promoción de la competencia y con el marco regulatorio de la actividad de distribución de energía eléctrica”

Como parte de éste convenio interadministrativo, en diciembre 29 de 2009 se firmó el Convenio Específico No. 02:

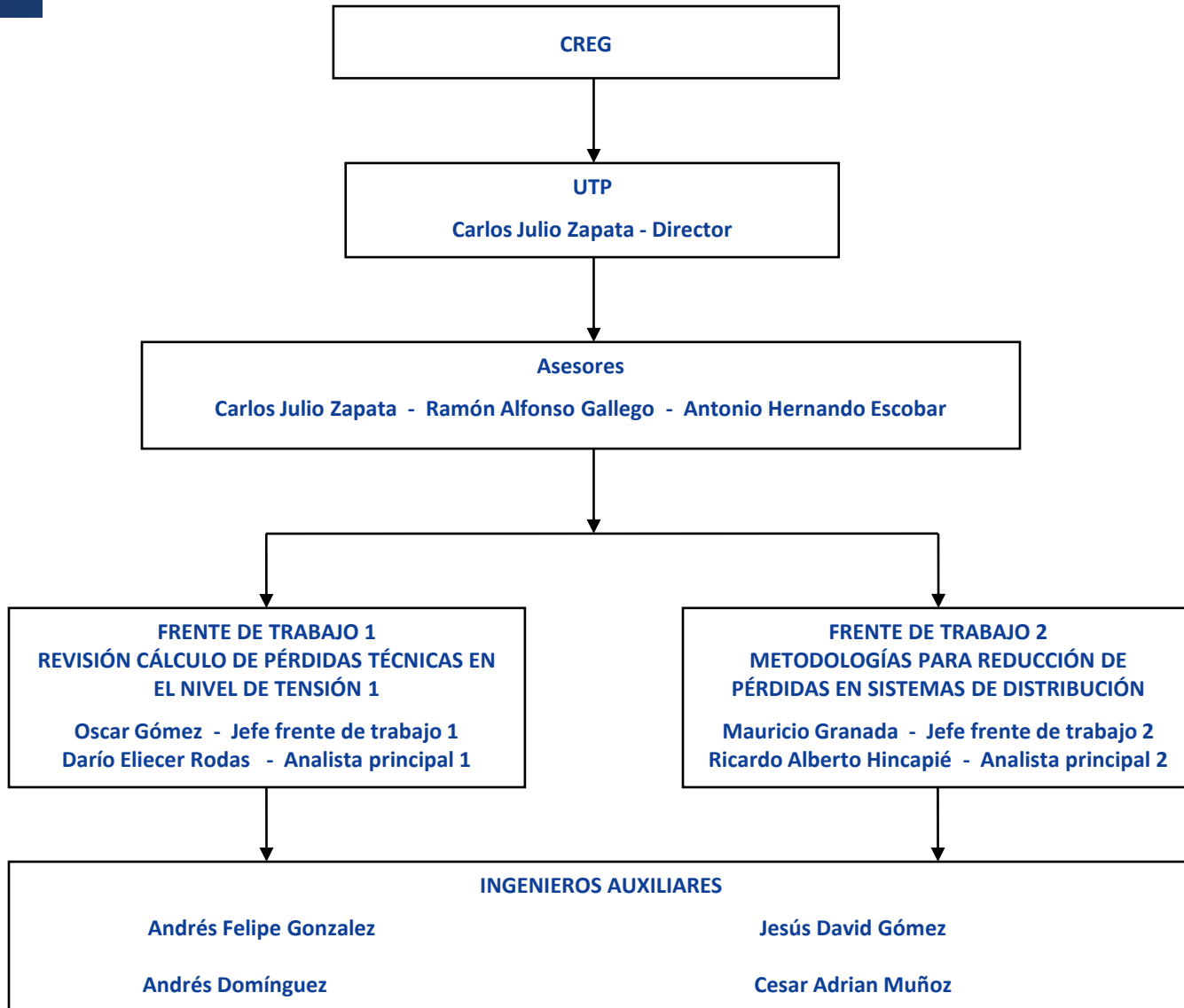
“Apoyo académico y soporte técnico en el proceso de implementación de planes de reducción de pérdidas de energía eléctrica, la definición de incentivos para la reducción de éstas y el reconocimiento de los costos asociados con estos planes, de acuerdo con las políticas definidas en el Decreto 387 de 2007”

El alcance del trabajo asignado a la UTP comprende:

1. Revisar la metodología y criterios utilizados en el estudio de pérdidas técnicas del nivel de tensión 1 del consultor IEB S. A, teniendo en cuenta las observaciones de los OR y lo establecido en la Resolución CREG 097 de 2008.
2. Revisar la metodología empleada para definir las cargas y su correspondiente curva de duración aplicada en los circuitos de nivel de tensión 1.
3. Verificar la información utilizada en los cálculos de pérdidas técnicas del nivel de tensión 1 por los OR.
4. Revisar y analizar los documentos de pérdidas técnicas de energía presentados por los OR.

5. En el caso de encontrar diferencias, proponer alternativas para el cálculo de las pérdidas técnicas en el nivel de tensión 1 de todos los OR.
6. Revisar y validar los resultados presentados en el informe de IEB para el nivel de tensión 1 de todos los OR.
7. Revisar los estudios y atender los comentarios que presenten los OR con posterioridad a la publicación de los resultados de pérdidas del nivel de tensión 1 producto de la revisión que efectúe.
8. Proponer metodologías generales de reducción de pérdidas técnicas de energía en los sistemas de distribución.

2. Personal y frentes de trabajo





Grupo de Investigación en Planeamiento de Sistemas Eléctricos

Fundado en el año 1999 por el ingeniero Ramón Alfonso Gallego Rendón, tiene como misión el desarrollar, mejorar y aplicar conocimiento en el área de sistemas eléctricos de potencia para transferirlo a la comunidad académica y a las empresas del sector eléctrico.

Sus áreas de trabajo son: planeamiento de sistemas de transmisión de energía eléctrica, planeamiento de sistemas de distribución de energía eléctrica, confiabilidad de sistemas eléctricos, calidad de la potencia, investigación de operaciones, optimización matemática y mercados de energía.

3. Metodologías para reducción de pérdidas técnicas.



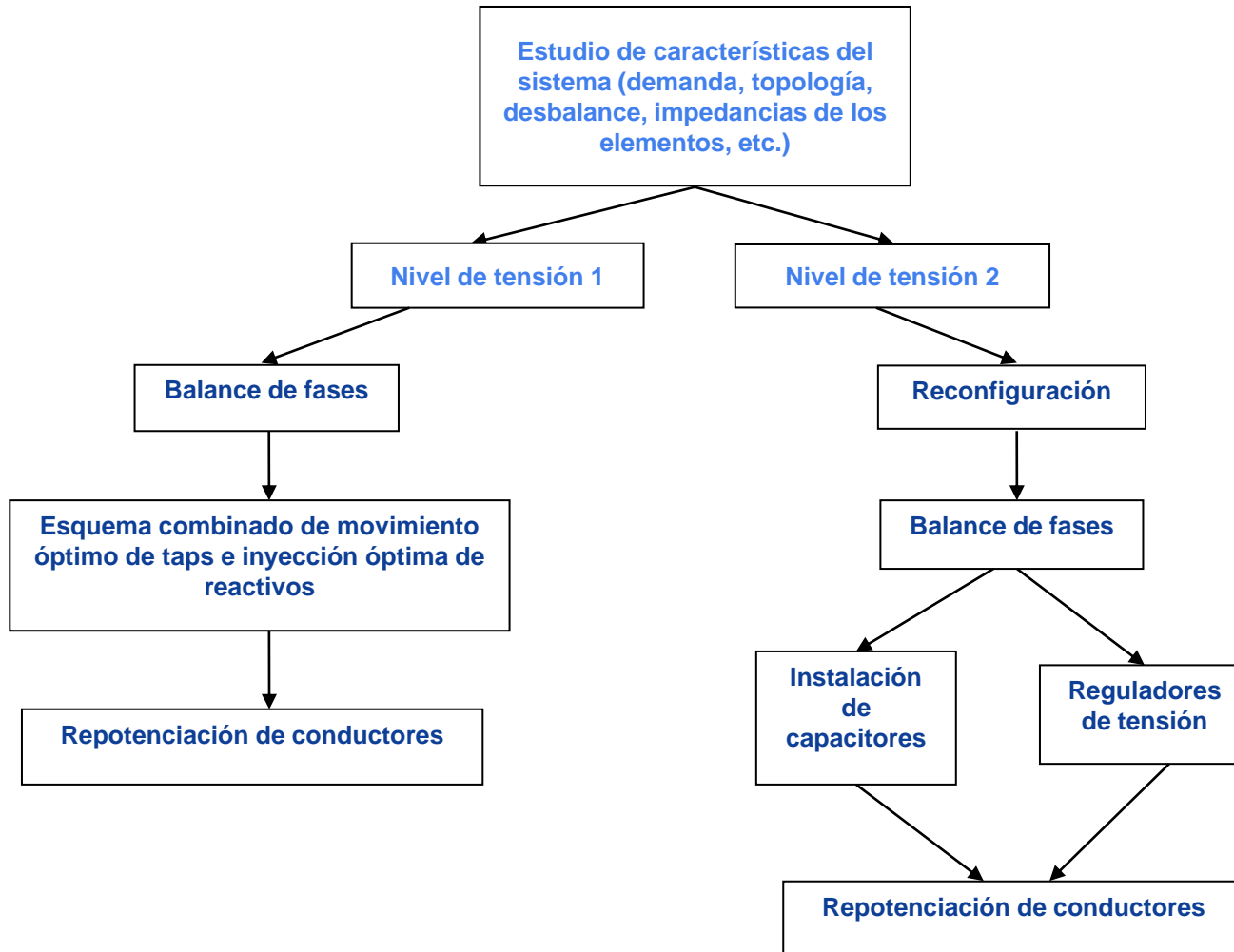
Medidas para la reducción de pérdidas técnicas en los sistemas de distribución

Objetivos

- Plantear estrategias para reducción de pérdidas en niveles de tensión I y II.
- Definir metodologías de solución para las estrategias de reducción de pérdidas identificados en los niveles I y II.
- Realizar análisis de las estrategias escogidas, sobre sistemas de prueba.

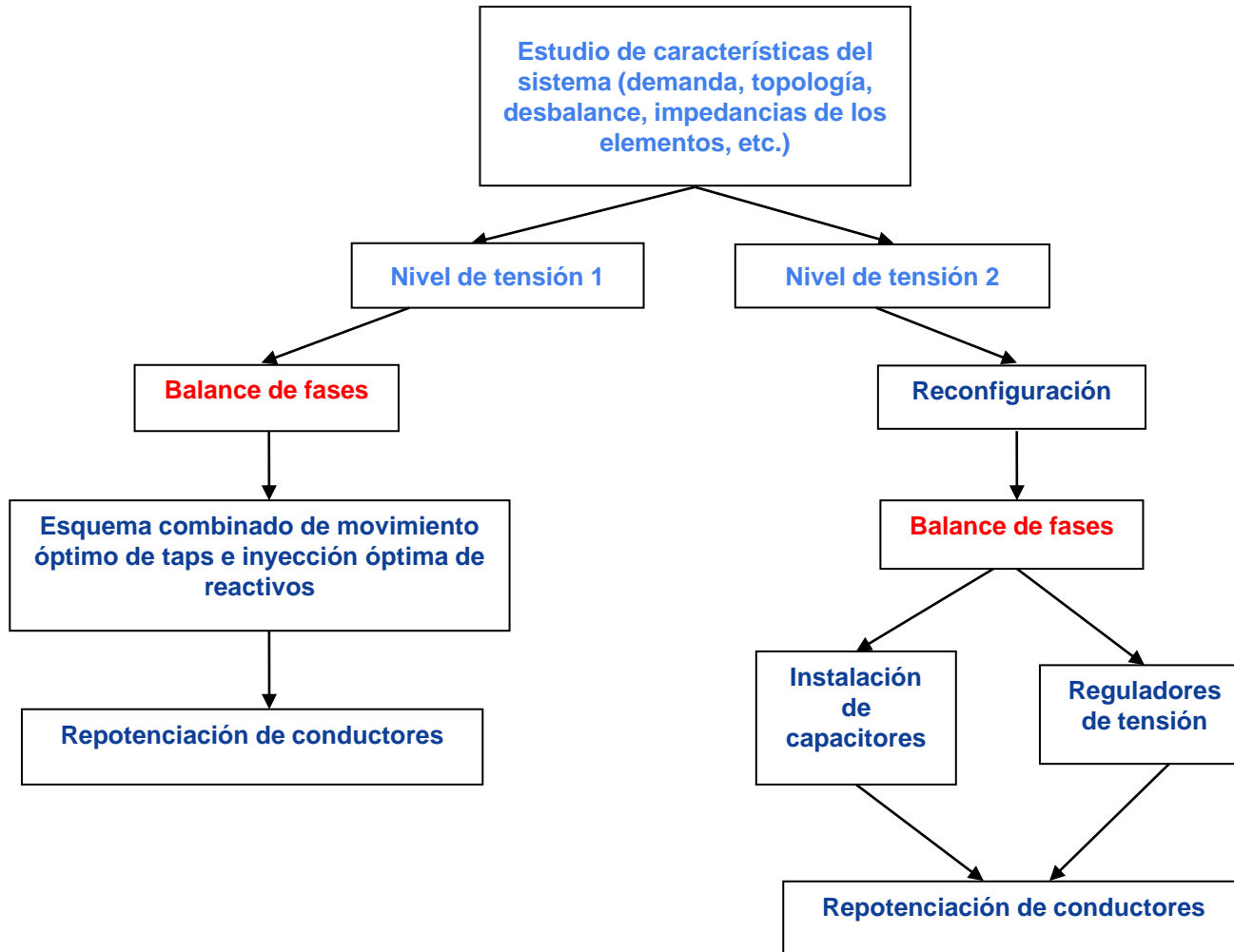
Medidas para la Reducción de Pérdidas Técnicas en los Sistemas de Distribución

Estrategias planteadas



Medidas para la Reducción de Pérdidas Técnicas en los Sistemas de Distribución

Estrategias planteadas





Balance de fases

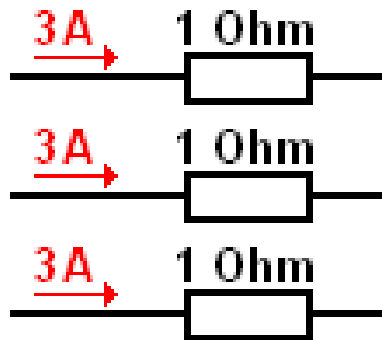
Generalidades

- Un sistema de distribución es desequilibrado, lo que ocasiona altas corrientes y por lo tanto incremento en las pérdidas técnicas.
- Redistribuyendo las cargas por fase se reducen las pérdidas técnicas del sistema.
- Presenta adicionalmente lo siguientes beneficios:
 - Aumenta la capacidad de la línea de distribución.
 - Mejora el perfil de tensión del sistema.

Balance de fases

Ejemplo

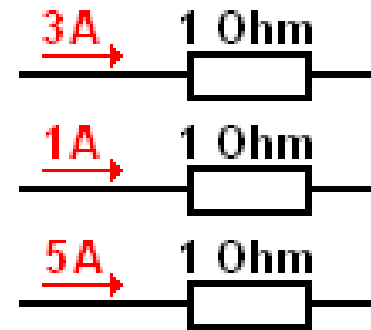
Sistema balanceado



$$P_{\text{perd}} = I^2 R = 1 \Omega \cdot 3^2 + 3^2 + 3^2$$

$$P_{\text{perd}} = 27 \text{ W}$$

Sistema desbalanceado



$$P_{\text{perd}} = I^2 R = 1 \Omega \cdot 3^2 + 1^2 + 5^2$$

$$P_{\text{perd}} = 35 \text{ W}$$

Disminuyen las pérdidas

Modelo matemático

$$\min \quad C_E \sum_{t=1}^{N_t} T_t \sum_{i=1}^{N-1} R_i \left(\frac{P_{it}^2 + Q_{it}^2}{V_{it}^2} \right) + C_L \times P_{L\max}$$

$$\text{s.a.} \quad P_{D(kt)} = f_P(V_{kt}, \theta_{kt}, \beta)$$

$$Q_{D(kt)} = f_Q(V_{kt}, \theta_{kt}, \beta)$$

$$P_{\min} < P_{it} < P_{\max}$$

$$V_{k\min} < V_k < V_{k\max}$$

$$H_i \in 1, \dots, 6$$

$$H_i \leq 3 \quad \forall i \mid i = \text{Carga Motriz}$$

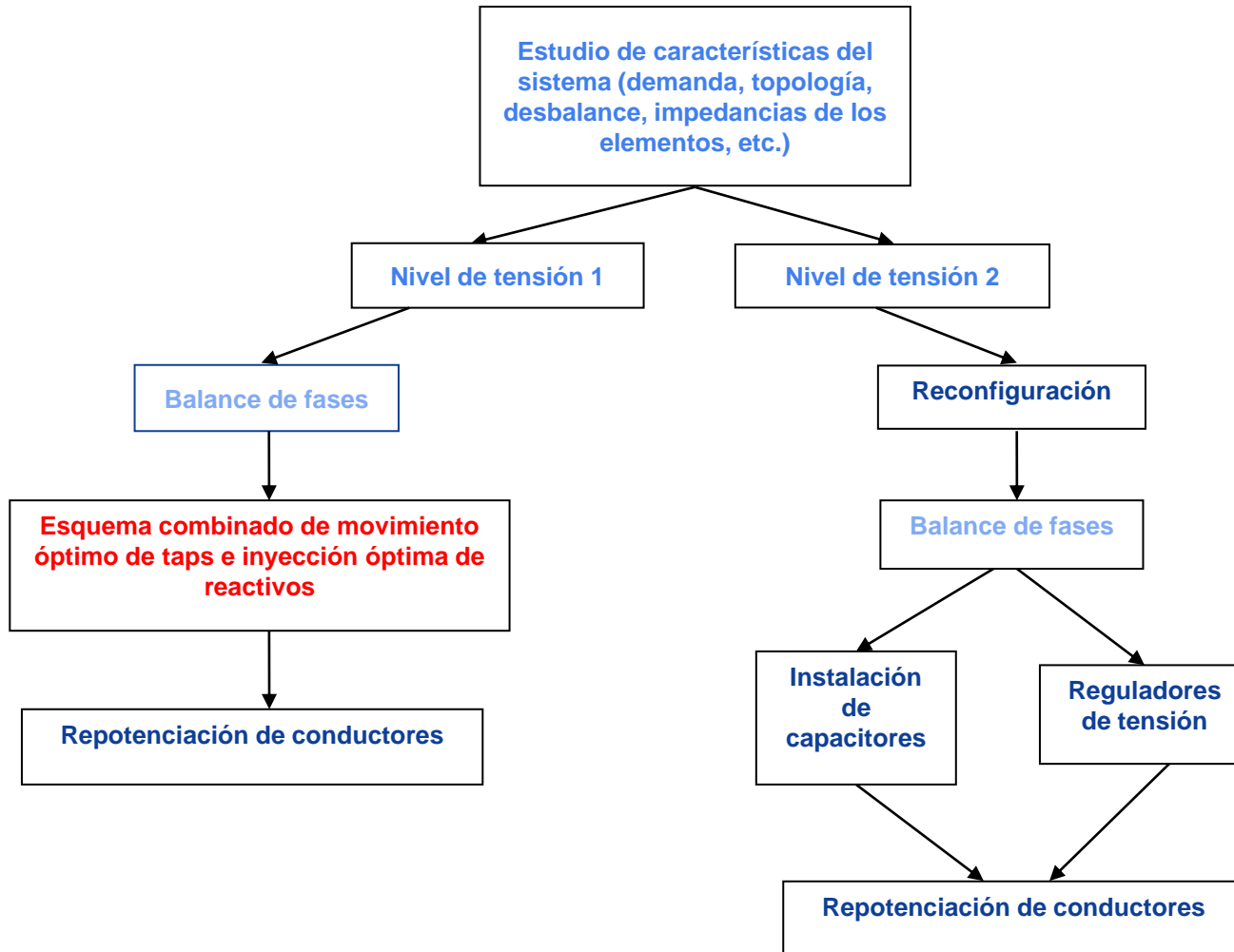
$$\prod \lambda_f = 1$$

Modelo matemático

$$\begin{aligned}
 & \text{Costo de las pérdidas de energía} && \text{Costo de las pérdidas de potencia} \\
 \min \quad & C_E \sum_{t=1}^{N_t} T_t \sum_{i=1}^{N-1} R_i \left(\frac{P_{it}^2 + Q_{it}^2}{V_{it}^2} \right) + C_L \times P_{L_{\max}} \\
 \text{s.a.} \quad & \left. \begin{aligned} P_{D(kt)} &= f_P(V_{kt}, \theta_{kt}, \beta) \\ Q_{D(kt)} &= f_Q(V_{kt}, \theta_{kt}, \beta) \end{aligned} \right\} \longrightarrow \text{Balance de potencia} \\
 & \left. \begin{aligned} P_{\min} &< P_{it} < P_{\max} \\ V_{k\min} &< V_k < V_{k\max} \end{aligned} \right\} \longrightarrow \text{Límites operativos} \\
 & \left. \begin{aligned} H_i &\in 1, \dots, 6 \\ H_i &\leq 3 \quad \forall i \mid i = \text{Carga Motriz} \end{aligned} \right\} \longrightarrow \text{Configuraciones de las fases} \\
 & \prod \lambda_f = 1 \longrightarrow \text{Radialidad}
 \end{aligned}$$

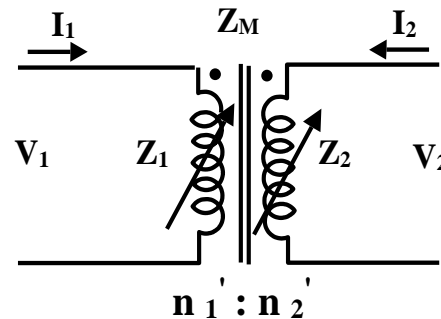
Medidas para la Reducción de Pérdidas Técnicas en los Sistemas de Distribución

Estrategias planteadas



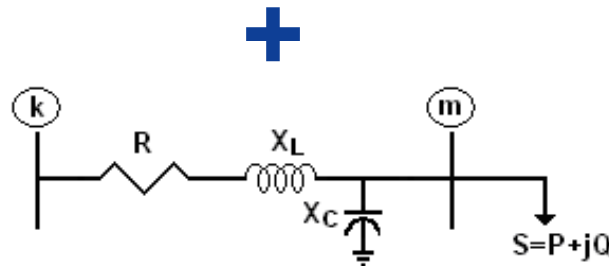
Esquema combinado de movimiento óptimo de taps e inyección óptima de reactivos

MOVIMIENTO ÓPTIMO DE TAPS



- El movimiento de taps en transformadores de distribución mejora el perfil de tensión de la red de distribución.
- Este mejoramiento de la tensión disminuye las pérdidas de energía.

UBICACIÓN DE CONDENSADORES



- Alivia la cargabilidad de las líneas.
- Mejora el perfil de tensión.
- Disminuyen las pérdidas técnicas.

=

REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS

Modelo matemático

$$\min \sum_{k \in sh} C_{1k} y_{1k} + C_{2k} y_{2k} + C_T \sum_{t \in \text{trafos}} |T_t - T_{A_t}| + C_{pp} \times P_{pp} \quad V, \theta, T$$

$$\text{s.a. } P_{Li} - P_{Gi} + P_i \quad V, \theta, T = 0 \quad i \in pqv$$

$$Q_{Lj} - Q_{Gj} + Q_j \quad V, \theta, T - y_{1k} + y_{2k} = 0 \quad j \in pq$$

$$Q_{Gl}^{\min} \leq Q_{Gl} \leq Q_{Gl}^{\max} \quad l \in pv \cup \text{slack}$$

$$V_m^{\min} \leq V_m \leq V_m^{\max} \quad m = 1, 2 \dots nb$$

$$T_t^{\min} \leq T_t \leq T_t^{\max} \quad t \in \text{trafos}$$

$$0 \leq y_{1k} \leq y_{1k}^{\max}$$

$$0 \leq y_{2k} \leq y_{2k}^{\max}$$

Esquema combinado de movimiento óptimo de taps e inyección óptima de reactivos

Modelo matemático

Costo de la inyección de potencia capacitiva e inductiva

Costo de mover el tap

Costo de las pérdidas de potencia

$$\min \sum_{k \in sh} C_{1k} y_{1k} + C_{2k} y_{2k} + C_T \sum_{t \in \text{trafos}} |T_t - T_{A_t}| + C_{pp} \times P_{pp} \quad V, \theta, T$$

s.a. $P_{Li} - P_{Gi} + P_i \quad V, \theta, T = 0 \quad i \in pqv$

$Q_{Lj} - Q_{Gj} + Q_j \quad V, \theta, T - y_{1k} + y_{2k} = 0 \quad j \in pq$

$Q_{Gl}^{\min} \leq Q_{Gl} \leq Q_{Gl}^{\max} \quad l \in pv \cup \text{slack}$

$V_m^{\min} \leq V_m \leq V_m^{\max} \quad m = 1, 2, \dots, nb$

$T_t^{\min} \leq T_t \leq T_t^{\max} \quad t \in \text{trafos}$

$0 \leq y_{1k} \leq y_{1k}^{\max}$

$0 \leq y_{2k} \leq y_{2k}^{\max}$

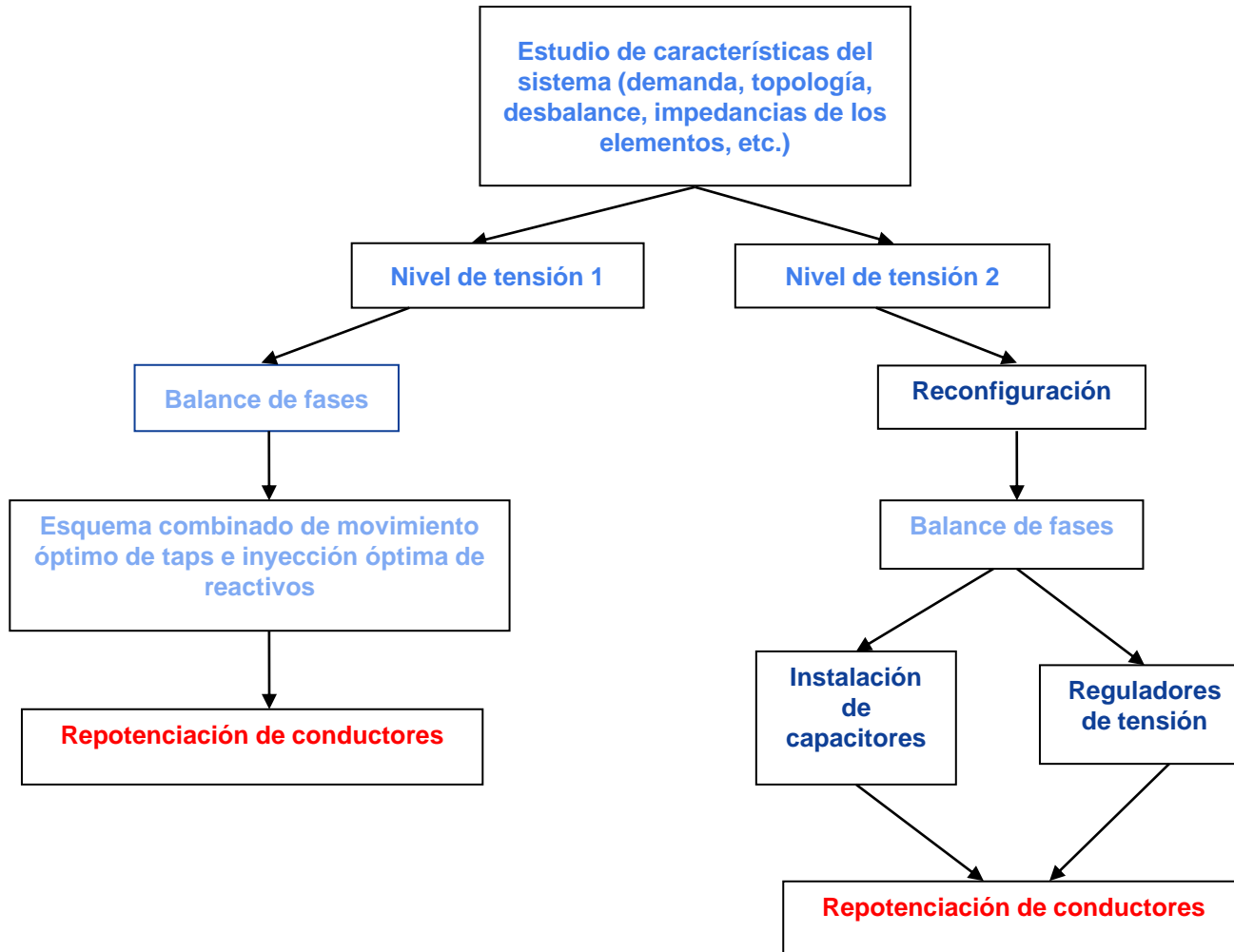
Balance de potencia

Límites operativos

Inyección máxima permitida de potencia reactiva

Medidas para la Reducción de Pérdidas Técnicas en los Sistemas de Distribución

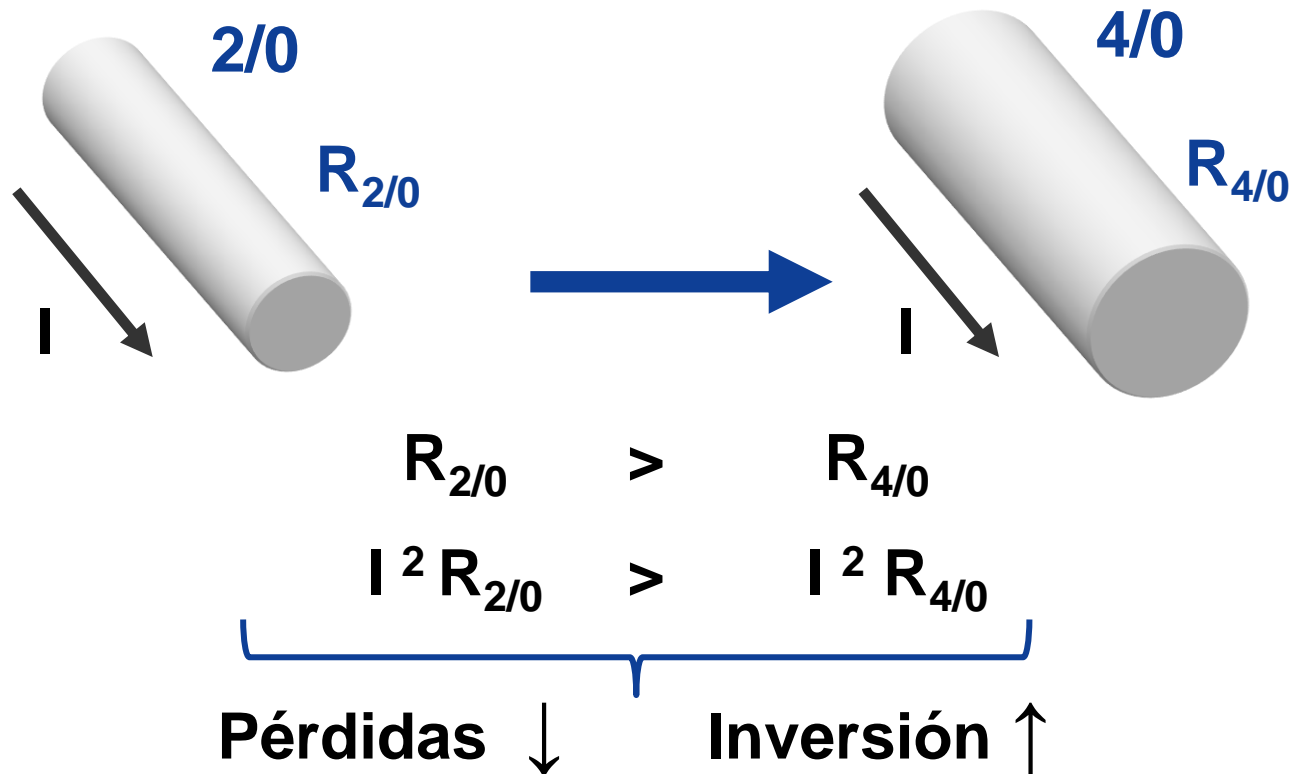
Estrategias planteadas



Repotenciación de conductores

Definición

Consiste en aumentar el calibre del conductor con el fin de reducir pérdidas técnicas debido a la disminución de la resistencia del conductor.



Modelo matemático

$$\min \sum_{j \in F \cup R} \sum_{a \in \Omega_T} C I_{ja} + C V_{ja} \times y_{ja}$$

$$\text{s.a.} \quad P_k = f_P(V, \theta) \quad \forall k \in N$$

$$Q_k = f_Q(V, \theta) \quad \forall k \in N$$

$$V_{\min} \leq V_k \leq V_{\max} \quad \forall k \in N$$

$$I_{ja} \leq I_{\max_a} \times y_{ja} \quad \forall j \in F \cup R$$

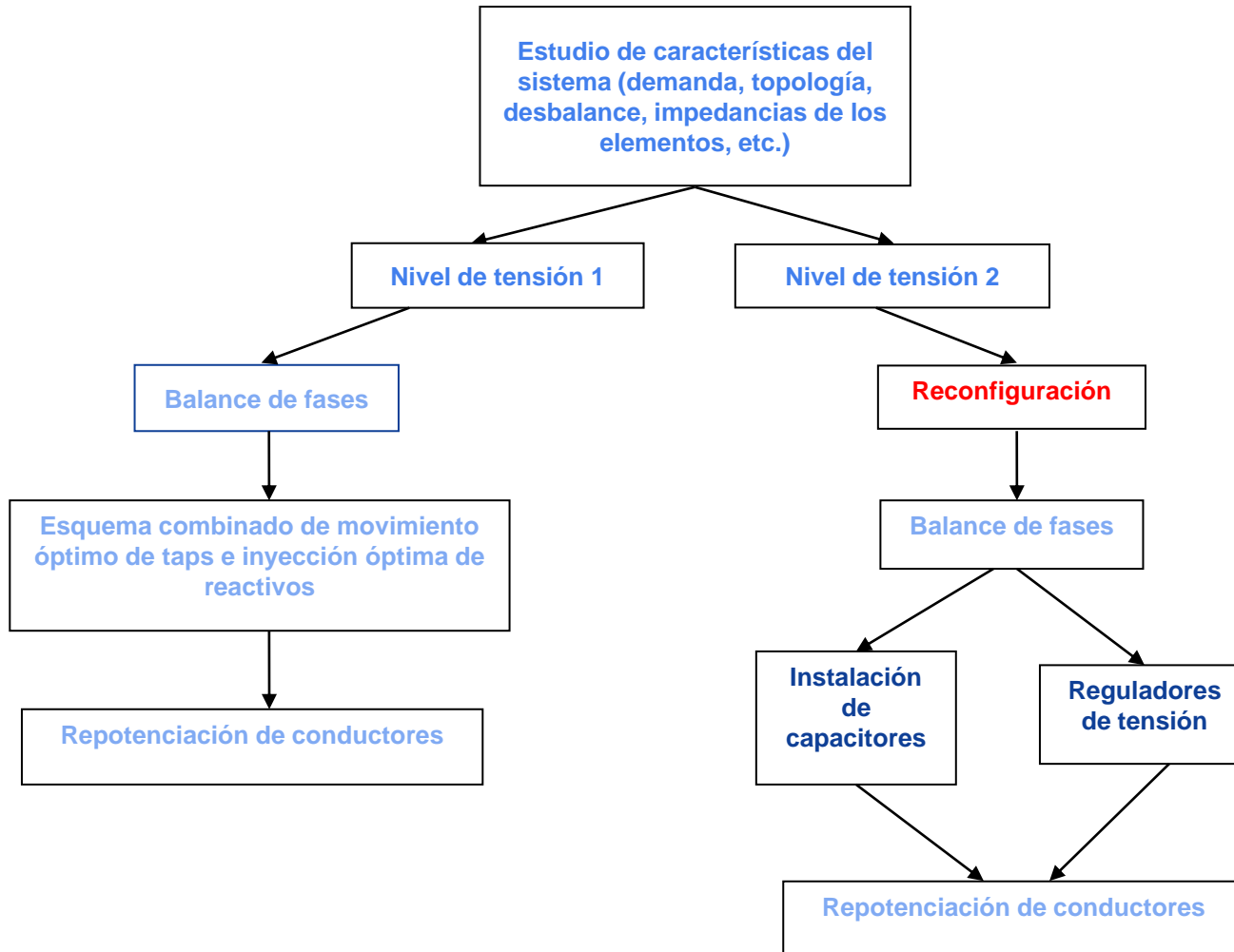
Repotenciación de conductores

Modelo matemático

$$\begin{array}{ll}
 \text{Costo de} & \text{Costo de las pérdidas} \\
 \text{repotenciación} & \text{de energía} \\
 \text{de un conductor} & \\
 \min & \sum_{j \in F \cup R} \sum_{a \in \Omega_T} \overbrace{CI_{ja}} + \overbrace{CV_{ja}} \times y_{ja} \\
 \text{s.a.} & \left. \begin{array}{l} P_k = f_P(V, \theta) \quad \forall k \in N \\ Q_k = f_Q(V, \theta) \quad \forall k \in N \end{array} \right\} \longrightarrow \text{Balance de potencia} \\
 & \left. \begin{array}{l} V_{\min} \leq V_k \leq V_{\max} \quad \forall k \in N \\ I_{ja} \leq I_{\max_a} \times y_{ja} \quad \forall j \in F \cup R \end{array} \right\} \longrightarrow \text{Límites operativos}
 \end{array}$$

Medidas para la Reducción de Pérdidas Técnicas en los Sistemas de Distribución

Estrategias planteadas





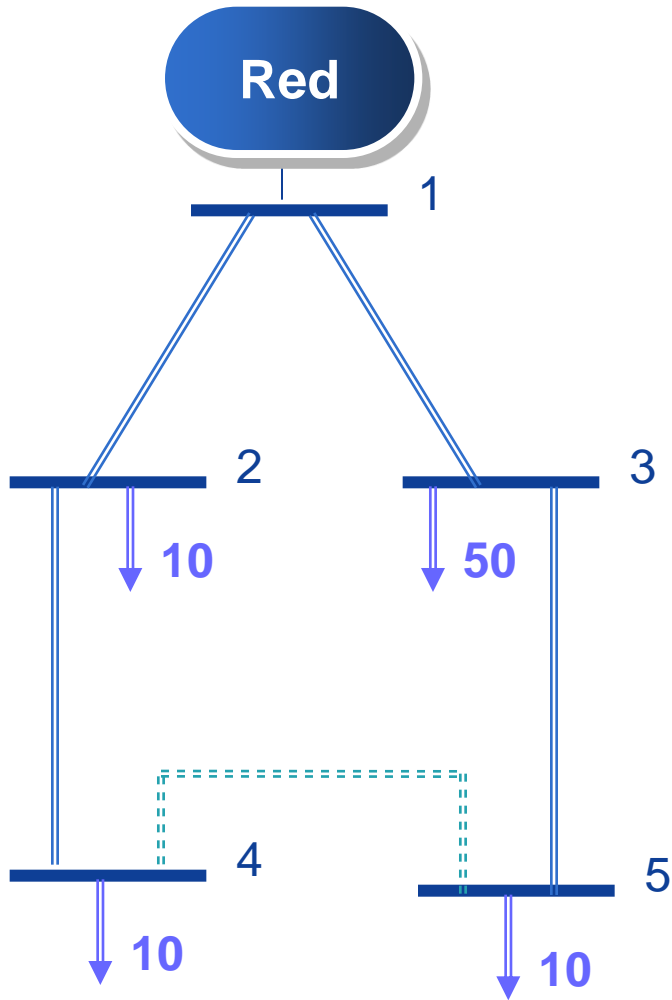
Reconfiguración

Generalidades

- Consiste en modificar la topología del sistema conectando o desconectando uno o varios elementos.
- Se debe garantizar la radialidad del sistema.
- Una reconfiguración adecuada disminuye las pérdidas técnicas del sistema.
- Adicionalmente se encuentran los siguiente beneficios:
 - Aumento en la cargabilidad de las líneas.
 - Mejoramiento del perfil de tensión del sistema.

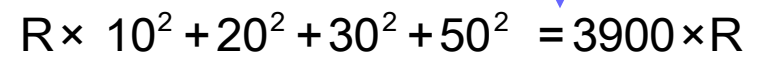
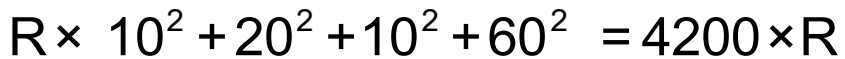
Reconfiguración

Ejemplo



$$R \times 10^2 + 20^2 + 10^2 + 60^2 = 4200 \times R$$

Ejemplo



Modelo matemático

$$\min \sum_{j \in B} CF_j + ce \times F_a \times \sum_{t=1}^T \left[I_j^2 R_j \right]$$

$$\text{s.a. } P_k = f_P \quad \forall k \in N$$

$$Q_k = f_Q \quad \forall k \in N$$

$$V_{\min} \leq V_k \leq V_{\max} \quad \forall k \in N$$

$$I_{jt} \leq I_{\max_j} \quad \forall j \in B$$

$$\prod \lambda_f = 1$$

Reconfiguración

Modelo matemático

**Costo de instalación
de un conductor nuevo**

**Costo de las pérdidas
de energía**

$$\min \sum_{j \in B} CF_j + ce \times F_a \times \sum_{t=1}^T [I_j^2 R_j]$$

$$\text{s.a. } P_k = f_P \quad V, \theta \quad \forall k \in N$$

$$Q_k = f_Q \quad V, \theta \quad \forall k \in N$$

$$V_{\min} \leq V_k \leq V_{\max} \quad \forall k \in N$$

$$I_{jt} \leq I_{\max_j} \quad \forall j \in B$$

$$\prod \lambda_f = 1$$

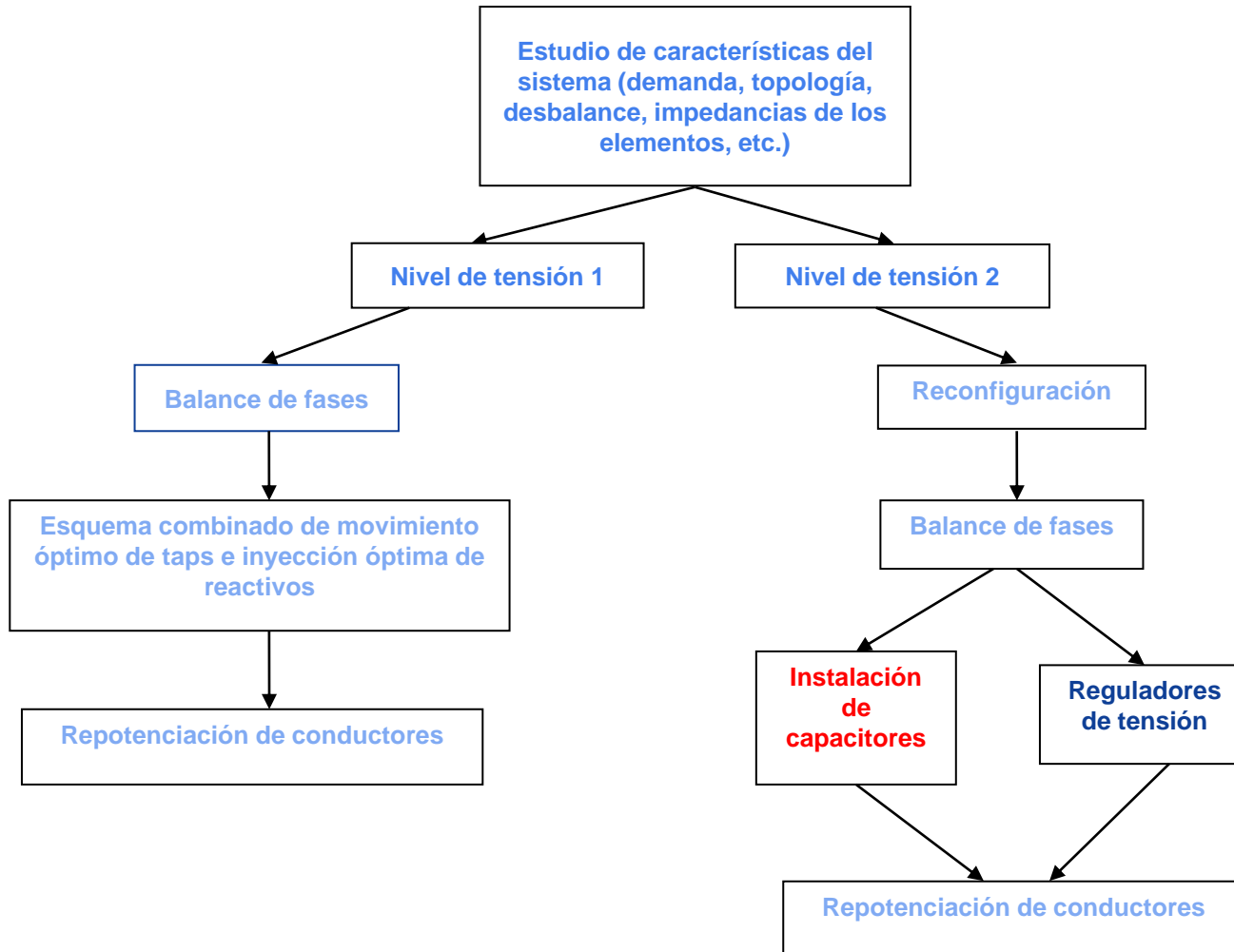
Balance de potencia

Límites operativos

Radialidad

Medidas para la Reducción de Pérdidas Técnicas en los Sistemas de Distribución

Estrategias planteadas





Instalación de capacitores

Generalidades

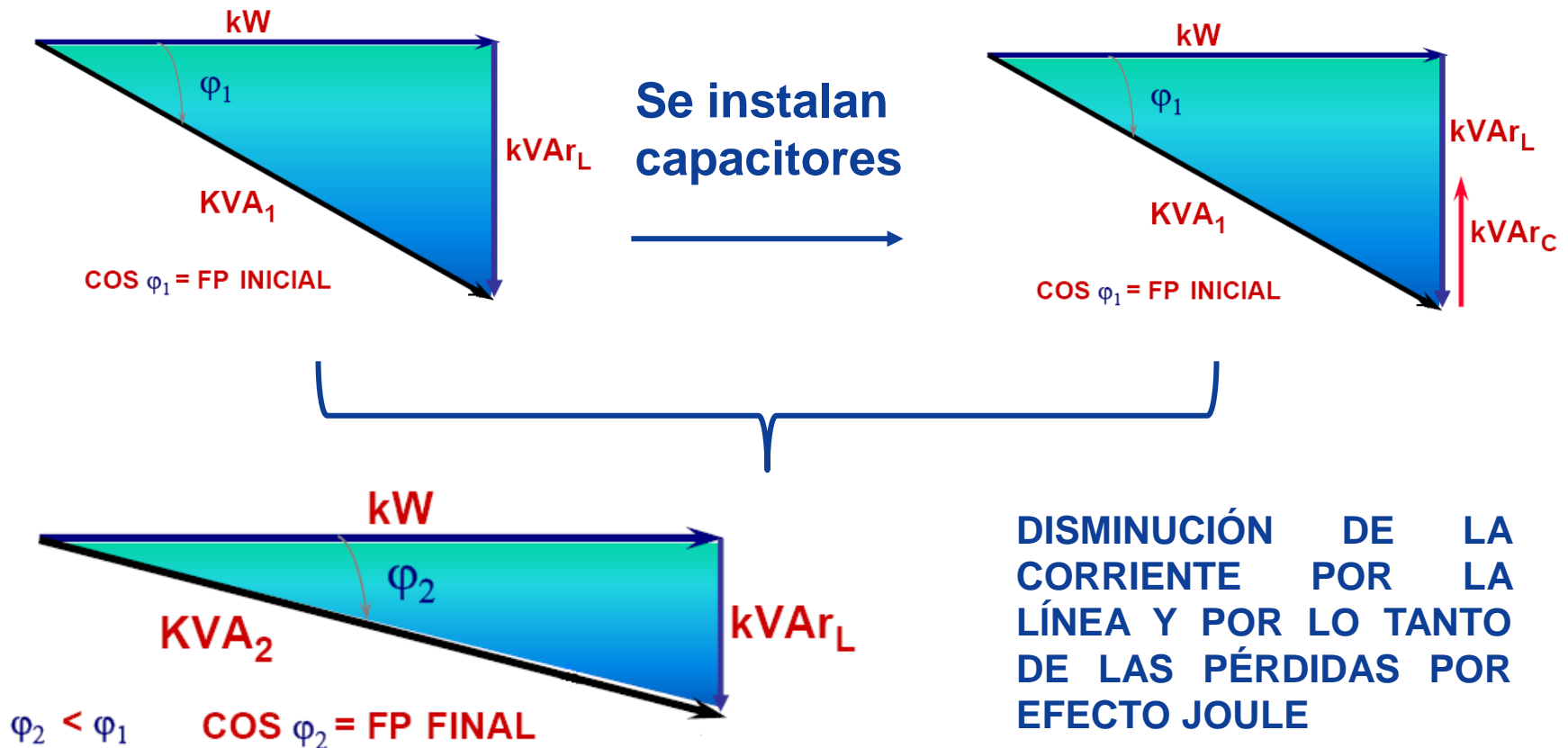
Consiste en determinar el lugar y la cantidad de reactivos que deben ser inyectados en el sistema.

Adicionalmente se obtienen los siguientes beneficios:

- Disminución de pérdidas por efecto Joule.
- Corrección del factor de potencia.
- Mejoramiento de la regulación de tensión.
- Aprovechamiento de la capacidad de los elementos.
- Reducción del pago de penalización por consumo de energía reactiva.

Instalación de capacitores

Ejemplo



Modelo matemático

$$\min \quad k_e \times \sum_{i=1}^{nt} T_i \times P_i(V, \delta) + K_o \times P_o + \sum_{k=1}^{nc} f(u_k^o)$$

$$\text{s.a.} \quad G^i(x^i, u^i) = 0$$

$$V_{\min_k} \leq V_k \leq V_{\max_k}$$

$$S_{\text{reg}_k}^i \leq S_{\text{nom}_k}$$

$$F_3 \leq \text{InvMax}$$

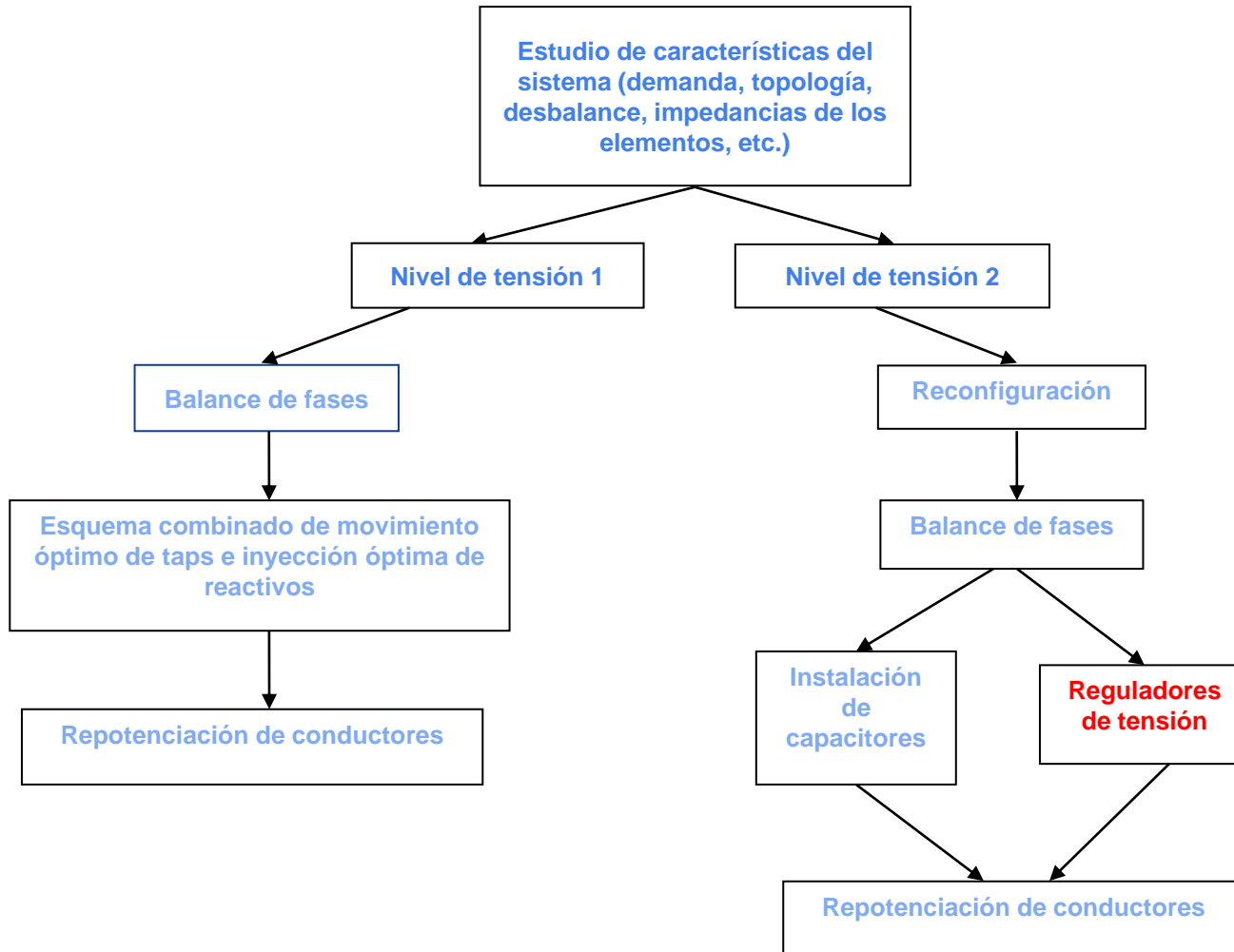
Instalación de capacitores

Modelo matemático

$$\begin{aligned}
 & \text{Costo de las pérdidas de energía y potencia} && \text{Costo de instalación de condensadores} \\
 \min & \quad k_e \times \sum_{i=1}^{nt} T_i \times P_i(V, \delta) + K_o \times P_o + \sum_{k=1}^{nc} f(u_k^o) \\
 \text{s.a.} & \quad G^i(x^i, u^i) = 0 && \text{Balance de potencia} \\
 & \quad V_{\min_k} \leq V_k \leq V_{\max_k} && \text{Límites operativos} \\
 & \quad S_{\text{reg}_k^i} \leq S_{\text{nom}_k} \\
 & \quad F_3 \leq \text{InvMax} && \text{Límite financiero}
 \end{aligned}$$

Medidas para la Reducción de Pérdidas Técnicas en los Sistemas de Distribución

Estrategias planteadas





Reguladores de tensión

Generalidades

- Un regulador de tensión es básicamente un autotransformador con taps en uno de sus devanados, el cual permite la variación del voltaje entregado bajo carga.
- El problema de la ubicación óptima de reguladores de tensión consiste en determinar el lugar, el número de reguladores a ser instalados y la posición óptima del tap en cada uno de ellos.
- La instalación de reguladores mejora el perfil de tensión y se reducen las pérdidas del sistema para ciertas condiciones de carga.

Modelo matemático

$$\min \quad C_E * \sum_{t=1}^{N_T} T_t \sum_{i=1}^{N-1} R_i \left(\frac{P_{i,t}^2 + Q_{i,t}^2}{V_{i,t}^2} \right) + C_L * P_L + \sum_{k=1}^N C_{RTkP} * VR_k$$

$$\text{s.a. } P_{D(kt)} = f_P(V_{kt}, \theta_{kt}, \beta)$$

$$Q_{D(kt)} = f_Q(V_{kt}, \theta_{kt}, \beta)$$

$$V_{\min} \leq V_k \leq V_{\max} \quad ; k = 1, 2, 3, \dots, N$$

$$\sum_{k=1}^N VR_k \leq RT_{\text{disp}}$$

$$CAPVR_k \leq CAP_{\max \text{ disp}}$$

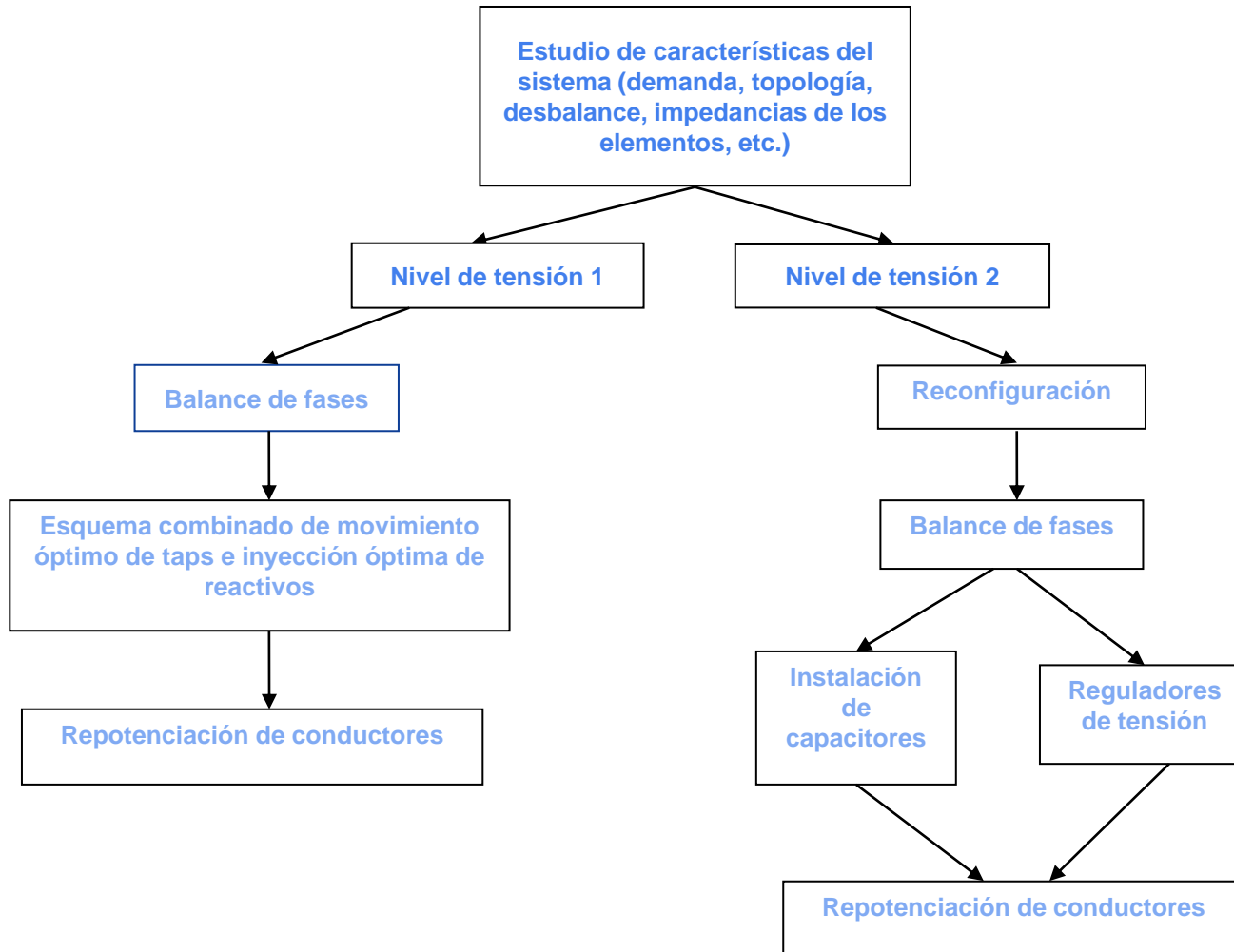
Reguladores de tensión

Modelo matemático

$$\begin{aligned}
 & \text{Costo de las pérdidas de energía y potencia} && \text{Costo de instalación de reguladores} \\
 \min & \quad C_E * \sum_{t=1}^{N_T} T_t \sum_{i=1}^{N-1} R_i \left(\frac{P_{i,t}^2 + Q_{i,t}^2}{V_{i,t}^2} \right) + C_L * P_L + \sum_{k=1}^N C_{RTkP} * VR_k \\
 \text{s.a.} & \quad \left. \begin{aligned} P_{D(kt)} &= f_P(V_{kt}, \theta_{kt}, \beta) \\ Q_{D(kt)} &= f_Q(V_{kt}, \theta_{kt}, \beta) \end{aligned} \right\} \longrightarrow \text{Balance de potencia} \\
 & \quad V_{\min} \leq V_k \leq V_{\max} \quad ; k = 1, 2, 3, \dots, N \longrightarrow \text{Límites operativos} \\
 & \quad \sum_{k=1}^N VR_k \leq RT_{\text{disp}} \longrightarrow \text{Número máximo disponible de reguladores} \\
 & \quad CAPVR_k \leq CAP_{\text{max disp}} \longrightarrow \text{Máxima capacidad del regulador}
 \end{aligned}$$

Medidas para la Reducción de Pérdidas Técnicas en los Sistemas de Distribución

Estrategias planteadas





Medidas para la Reducción de Pérdidas Técnicas en los Sistemas de Distribución

Datos requeridos por cada estrategia

DATOS DE ENTRADA		NIVEL DE TENSIÓN I			NIVEL DE TENSIÓN II				
		Balance de fases	Repotenciación de conductores	Esquema combinado de movimiento óptimo de taps e inyección óptima de reactivos	Balance de fases	Reconfiguración	Instalación de capacitores	Reguladores de tensión	Repotenciación de conductores
Costos	Energía	X	X		X	X	X	X	X
	Potencia pico	X	X	X	X		X	X	X
	Instalación de tramo de red		X			X			X
	Instalación de bancos de reactores			X					
	Instalación de bancos de capacitores			X			X		
	Instalación de reguladores de tensión							X	
	Movimiento de taps en transformadores de distribución			X					
Tasas	Crecimiento de la carga		X			X			X
	Crecimiento del costo de la energía		X						X
	De descuento		X			X			X
Tramos de red	Longitud	X	X	X	X	X	X	X	X
	Resistencia		X	X		X	X	X	X
	Reactancia		X	X		X	X	X	X
	Distancia entre las fases	X			X				
	Capacidad nominal de corriente de los conductores	X	X	X	X	X	X	X	X
	Tipos de conductores	X	X	X	X	X	X	X	X
	Configuración de las fases	X			X				

Medidas para la Reducción de Pérdidas Técnicas en los Sistemas de Distribución

Datos requeridos por cada estrategia

Demanda nodal	Potencia activa	X	X	X	X	X	X	X	X
	Potencia reactiva	X	X	X	X	X	X	X	X
	Conexión (Y o Δ)	X			X				
	Tipo de carga (Z, P, I)	X			X				
Demanda en el transformador ¹	Curva de duración de carga real	X			X		X	X	
	Curva de duración de carga típica	X			X				
	Demanda máxima	X			X				
	Factor de carga	X			X				
	Factor de potencia	X			X				
Voltaje	Mínimo permitido	X	X	X	X	X	X	X	X
	Máximo permitido	X	X	X	X	X	X	X	X
	Nominal	X	X	X	X	X	X	X	X
Capacidad máxima de potencia	Conductores						X	X	
	Transformadores			X					
	Condensadores						X		
	Reguladores							X	
Taps	Número			X					
	Paso en por ciento			X					
	Posición actual			X					
Período de estudio		X	X	X	X	X	X	X	X
Número máximo de reguladores								X	
Máxima inversión disponible							X		

NOTA:

1. No es necesario contar con todos los datos para el transformador, pues a partir de unos valores se puede llegar a los otros.
2. Para sistemas de niveles de tensión I y II es necesario contar con datos trifásicos (red desbalanceada) y monofásicos (red balanceada), respectivamente.



Medidas para la Reducción de Pérdidas Técnicas en los Sistemas de Distribución

Aplicación de las estrategias propuestas

➡ Para verificar las estrategias propuestas se emplearon datos unificados (en las estrategias donde son pertinentes) a diferentes sistemas de prueba. Estos datos se presentan a continuación:

Descripción	Valor
Tasa de retorno	13.9 %
Vida útil de redes	30 años
Vida útil de transformadores	20 años
Costo del kW-h	\$ 150
Costo de la potencia pico	\$ 5000
Movimiento de taps permitido	± 5

➡ La curva de duración de carga utilizada se muestra en la siguiente tabla. Esta curva es discretizada en tres niveles de carga (alto, medio y bajo) y cubre un horizonte de un año.

Nivel de carga	Alto	Medio	Bajo
Duración [h]	1000	6760	1000
Valor [%]	100	60	30

➡ La técnica de solución empleada en todas las estrategias fue el Algoritmo Genético Chu-Beasley.

➡ El flujo de carga radial empleado fue el método de barrido iterativo.



Medidas para la Reducción de Pérdidas Técnicas en los Sistemas de Distribución

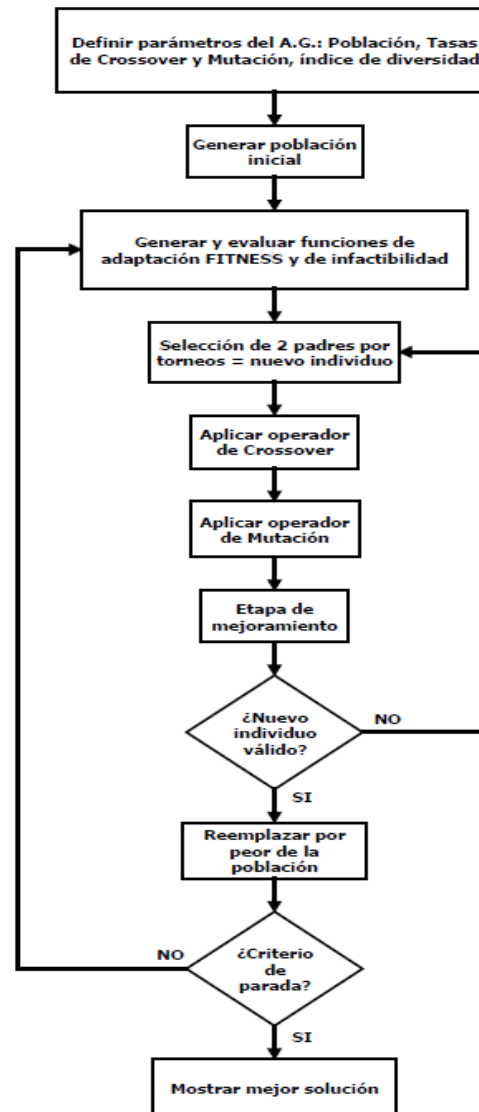
Resultados obtenidos

Nivel de tensión	Estrategia	Sistema de prueba	Pérdidas del sistema		Reducción de las pérdidas en %
			Iniciales	Después de aplicar la estrategia	
I	Balance de fases	IEEE 19 nodos	6.353 kW-h	5.698 kW-h	10,31
	Esquema combinado de movimiento óptimo de taps e inyección óptima de reactivos	IEEE 33 nodos - modificado	1,987 pu	1,696 pu	14,65
	Repotenciación de conductores	IEEE 19 nodos	2,85 kW	2,32 kW	18,59
II	Balance de fases	IEEE 37 nodos	218.130 kW-h	197.981 kW-h	9,24
	Reconfiguración	IEEE 33 nodos	202,68 kW	139,55 kW	31,14
	Instalación de capacitores	IEEE 9 nodos	970,192 kW	883,162 kW	8,97
	Reguladores de tensión	IEEE 33 nodos	271,83 kW	253,21 kW	6,8
	Repotenciación de conductores	IEEE 19 nodos	175,745 kW	113,533 kW	35,4



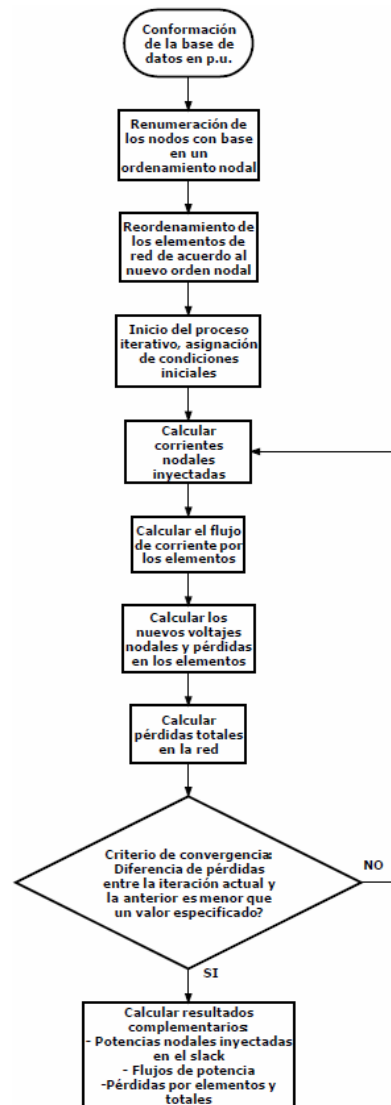
Algoritmo Genético Chu-Beasley

Diagrama de bloques del algoritmo

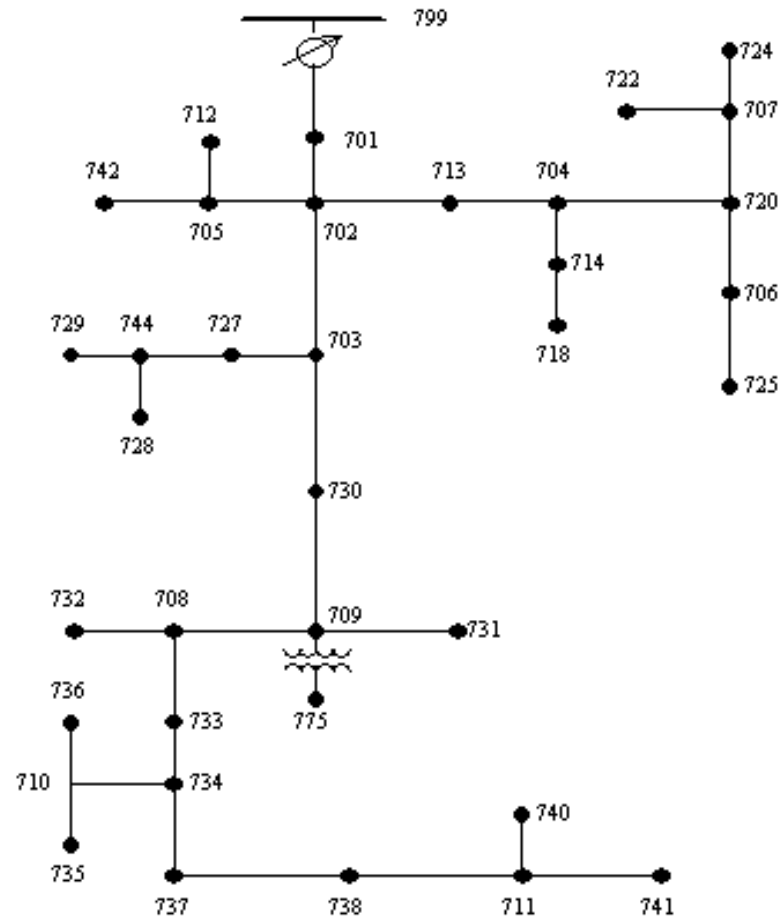


Flujo de carga radial de barrido iterativo

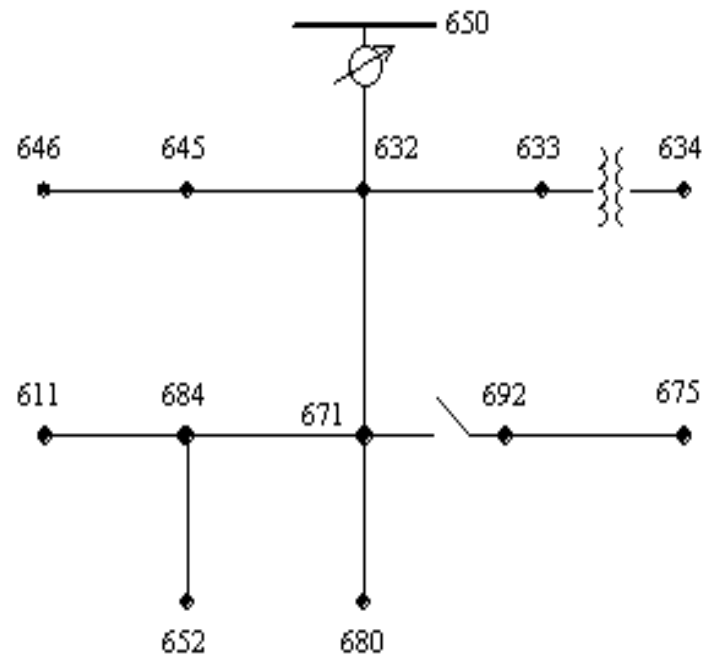
Diagrama de bloques del flujo de carga



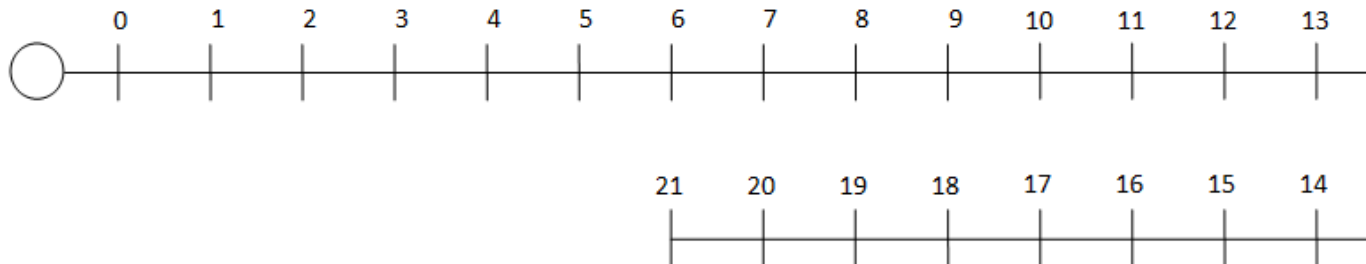
IEEE 37 nodos



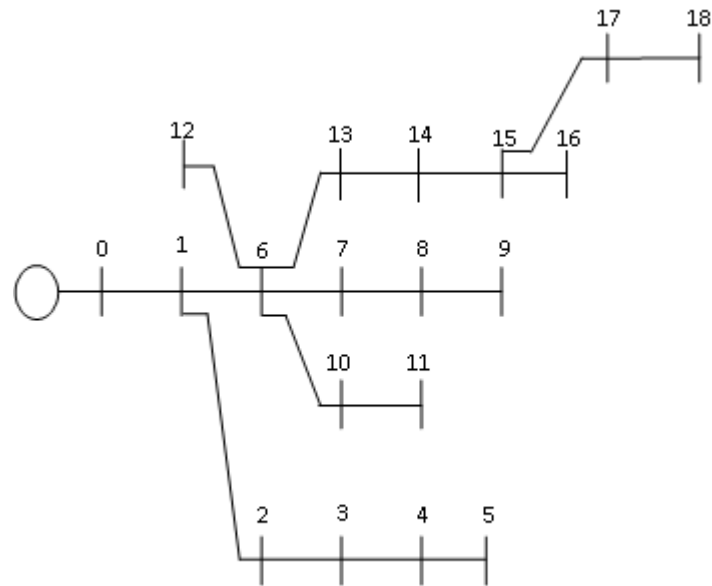
IEEE 13 nodos



IEEE 21 nodos

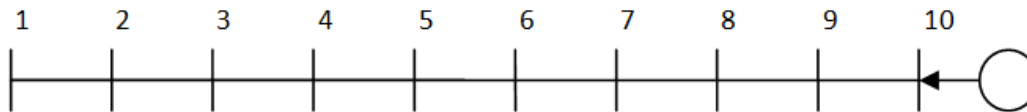


IEEE 19 nodos



[illegible]

IEEE 9 nodos



IEEE 33 nodos modificado

