

FUNDACIÓN BARILOCHE
INSTITUTO DE ECONOMÍA ENERGÉTICA
CONICET

XXIII ENDIO - XXI EPIO - II ERABIO

*DOS ENFOQUES METAHEURÍSTICOS PARA
RESOLVER PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN
COMBINATORIA MULTICRITERIO: FUZZY
EVOLUTIONARY PARTICLE SWARM OPTIMIZATION
CON TOPOLOGÍA ESTRELLA GLOBAL/INDIVIDUAL
(FEPSO GIST) Y FUZZY SIMULATED ANNEALING
(FSA)*

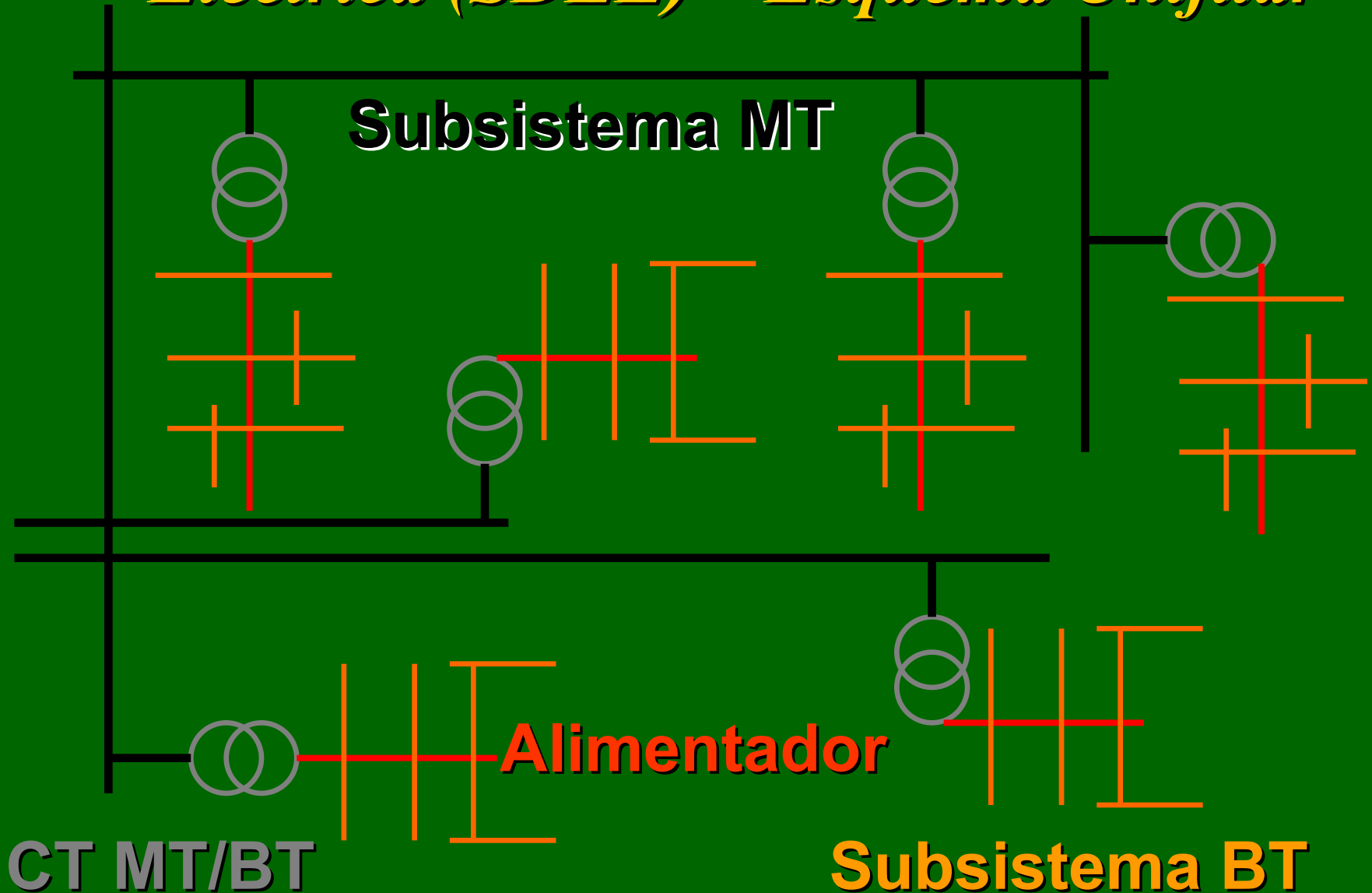
Expone: Dr. Gustavo Schweickardt

Autores: Gustavo Schweickardt (CONICET-IdEE/FB -
Argentina), Vladimiro Miranda (INESC Porto - Portugal) y
Juan Manuel Gimenez (CONICET-UNSJ)

*Sistemas de
Distribución de
Energía Eléctrica –
Subsistema de Baja
Tensión*

Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

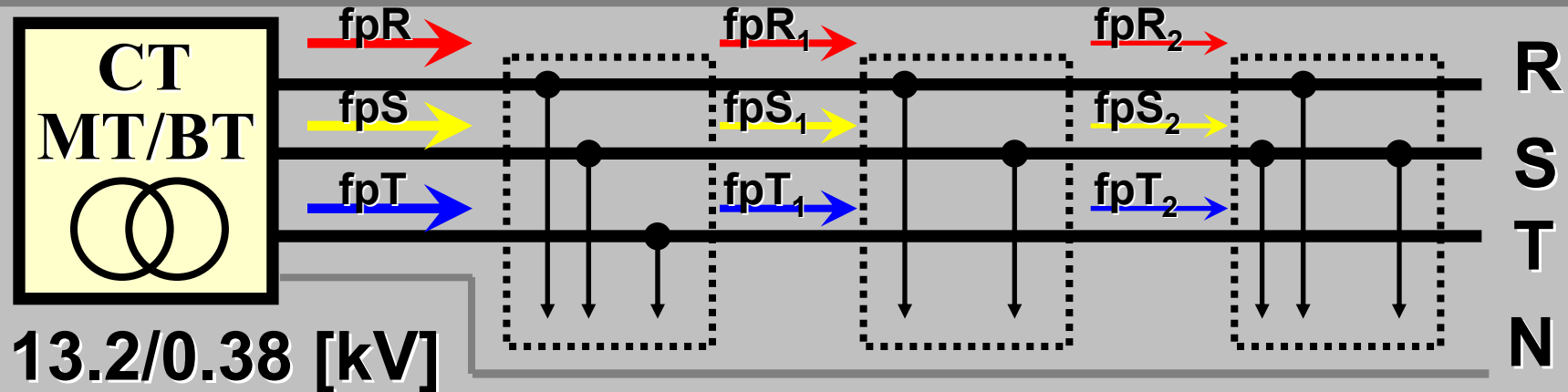
Eléctrica (SDEE) – Esquema Unifilar



Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

Eléctrica en Baja Tensión Trifásicos

- I. Se constituyen de cuatro conductores: tres conductores de Fase, denominadas [R], [S] y [T] y un conductor Neutro (N). Por ellos fluye la Potencia (fp) que demandan los Usuarios en Baja Tensión.
- II. Entre Cada Conductor de Fase y el Conductor Neutro, se conecta una carga (consumo *residencial*, por caso, representado por la flecha en el diagrama) *Monofásica*.
- III. Existen cargas *Trifásicas*, consideradas 3 *Monofásicas*.

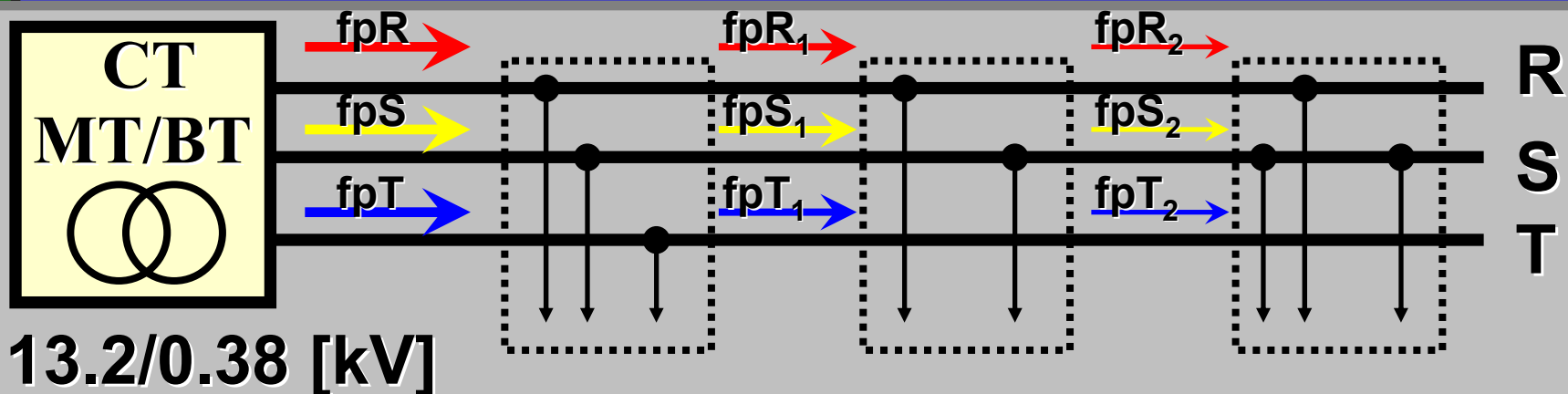


***El Problema del
Balance de Fases en
los SDEE BT***

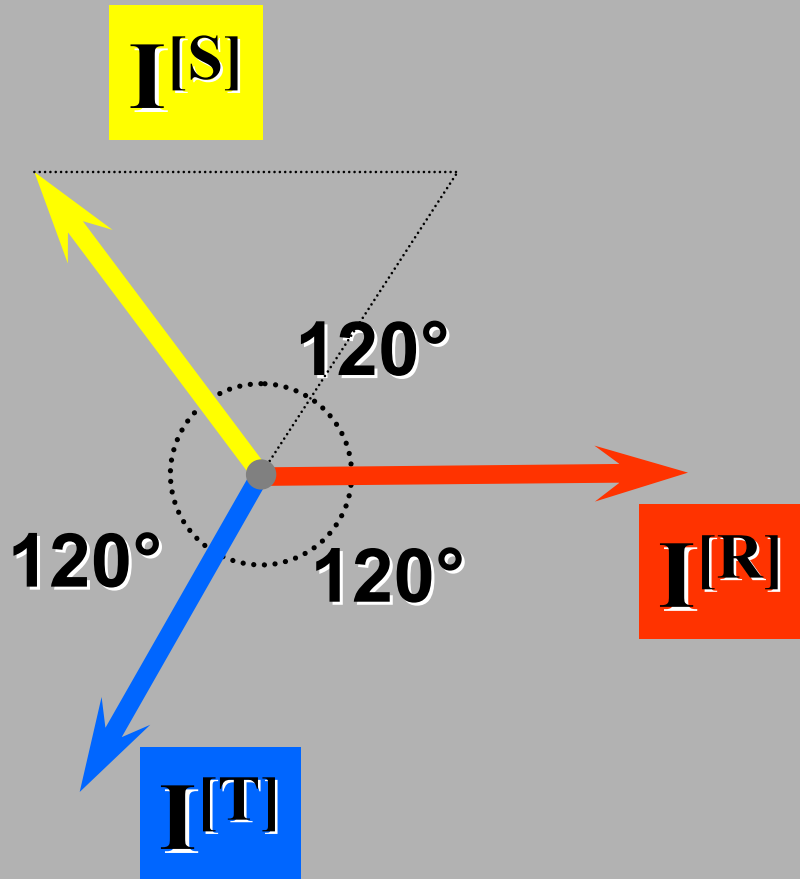
El Problema General del Balance de Fases en los SDEE BT

- I. Se trata de que las Fases del SDEE en BT estén *similarmente* cargadas.
- II. El *Desbalance* implica tres problemas:

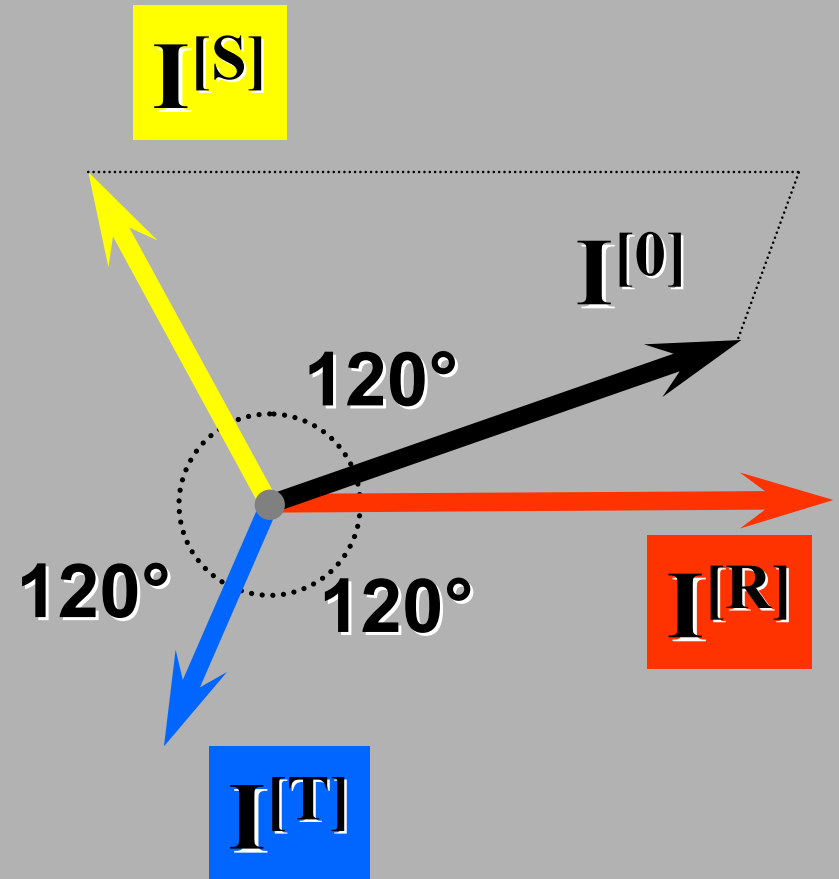
1. Mayores Pérdidas, afectando al Uso Racional de la Energía del lado de la Oferta.
2. Menor Calidad del Producto Técnico Tensión.
3. Inconvenientes en el Ajuste de Protecciones en el SubSistema MT \rightarrow Componente Homopolar ($I^{[0]}$)



a) Sistema Simétrico y Balanceado



b) Sistema Simétrico Desbalanceado



*Propuesta de Solución para
el Balance de Fases en
los SDEE BT como
problema MultiObjetivo
mediante Metaheurísticas*

Formulación MultiObjetivo del Problema BF

- I. La propuesta en el presente trabajo se sustenta en una Formulación MultiObjetivo del Problema BF, que considere los tres objetivos referidos: *Pérdidas, Perfil de Tensiones y Componente Homopolar.***

- II. Adicionalmente, se incorpora un objetivo adicional: Si se trata de un Alimentador SDEE BT existente, desbalanceado, se pretende *minimizar el número de cambios de conexiones de fase, que propenda a la satisfacción de los objetivos anteriores.***

Formulación MultiObjetivo del Problema BF

- III.** Para ello, se definen *tres Funciones Objetivo*: FO1 vinculada a las *Pérdidas*; FO2 vinculada a la *Componente Homopolar a la Salida del Alimentador del SDEE BT* y FO3 vinculada a los *cambios de conexiones de las cargas a cierta fase*.
- IV.** Y como *Restricciones* del problema, se introducen: R1 vinculada a la *Tensión de Nodo mayor o igual a la impuesta regulatoriamente* y R2 vinculada a que *las Intensidades en cada conductor de fase, resulte menor o igual que la admisible técnicamente*.

Formulación MultiObjetivo del Problema BF

Minimizar:

1) FO1 $\rightarrow \sum_{\Phi} \text{Perd}$

Pérdidas Activas Totales

2) FO2 $\rightarrow |I^{[0]}|$

Componente Homopolar de Salida

3) FO3 $\rightarrow \text{NC}\Phi$

Nro. de Cambios de fase

Sujeto a:

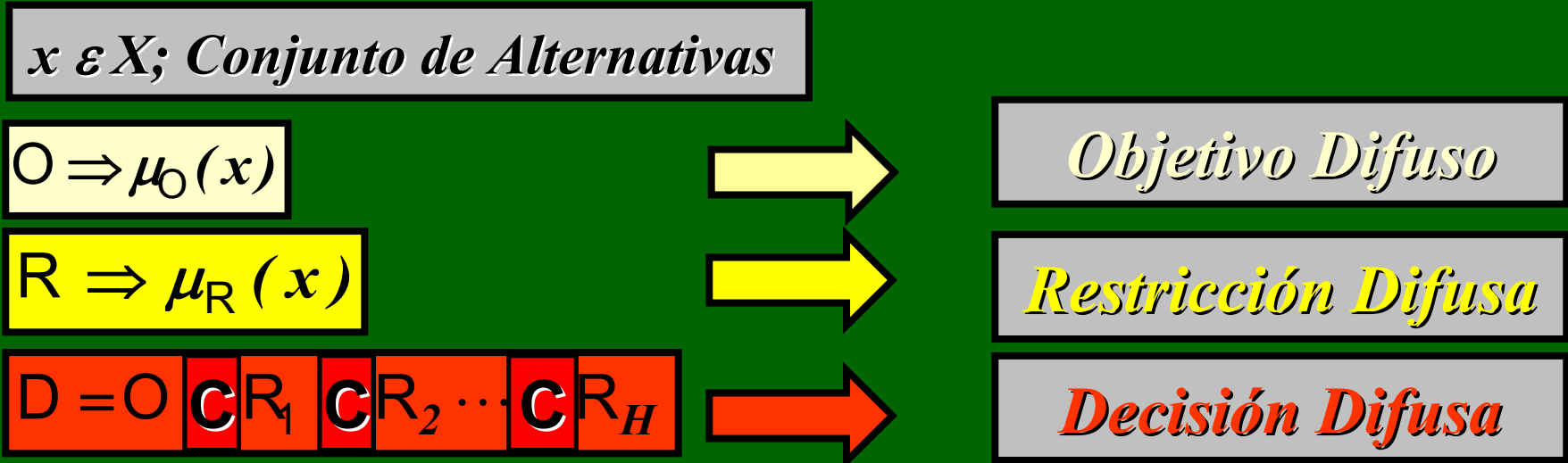
Tensiones de nodo y fase en tolerancia

1) R1 $\rightarrow |U_{\text{Lim Inf}}| \leq |U_i^{[\Phi]}| \leq |U_{\text{Lim Sup}}|$

2) R2 $\rightarrow |I_r^{[\Phi]}| \leq |I_{\text{Lim Sup}}|$

Intensidad de rama y fase en tolerancia

Decisión Maximizante en el Dominio Difuso



C → Operador de *Confluencia*

Decisión Maximizante Estática Bellman - Zadeh

$$D = [O]^{p_O} \text{ C } [R_1]^{p_{R_1}} \text{ C } [R_2]^{p_{R_2}} \dots \text{ C } [R_H]^{p_{R_H}}$$

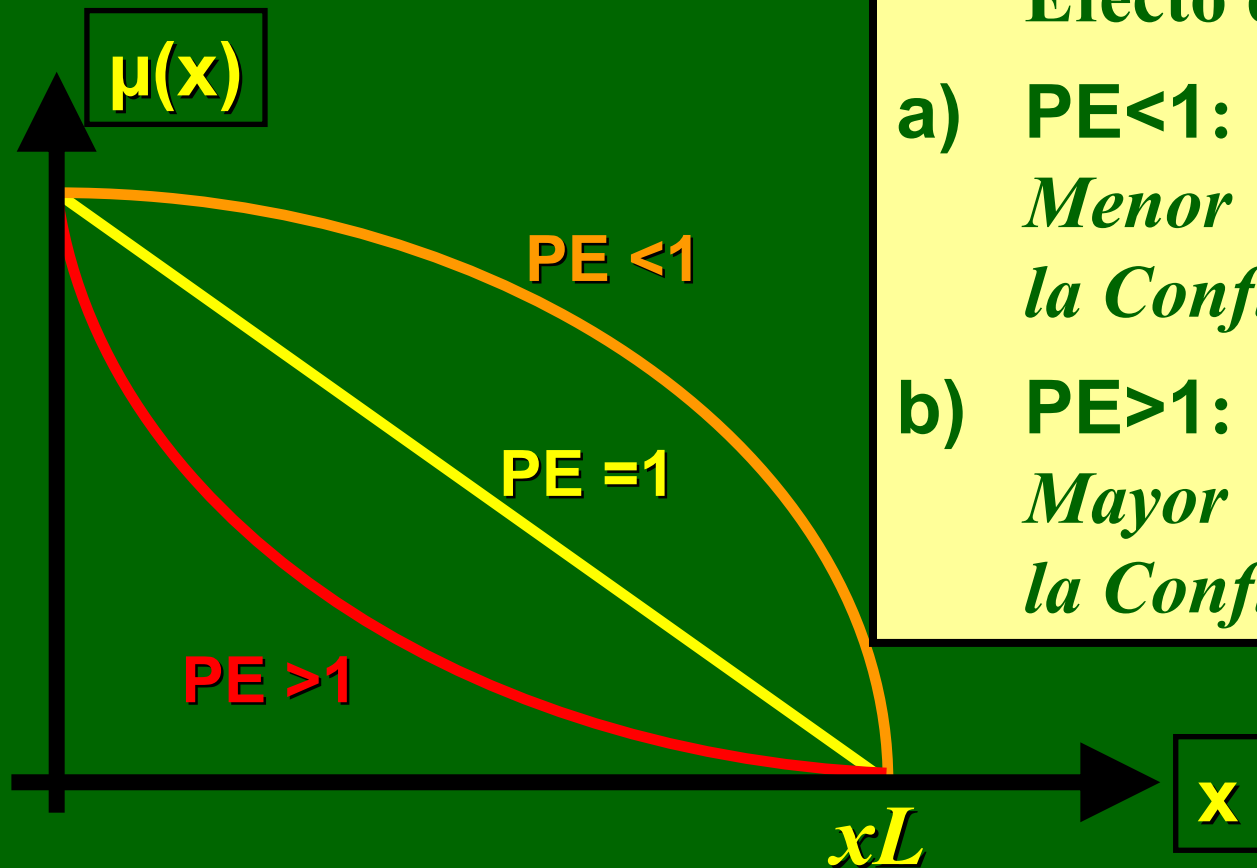
$$[R_j]^{p_{R_j}} \Rightarrow [\mu_{R_j}(x)]^{p_{R_j}}$$

Ponderadores Exponenciales (PE)

$$Vp^{Exp} = \begin{bmatrix} p_O \\ p_{R_1} \\ \vdots \\ p_{R_H} \end{bmatrix}$$

Contracción y Dilatación en un Conjunto Difuso. Efecto de los Ponderadores

Función de Pertenencia Lineal $\mu(x)$



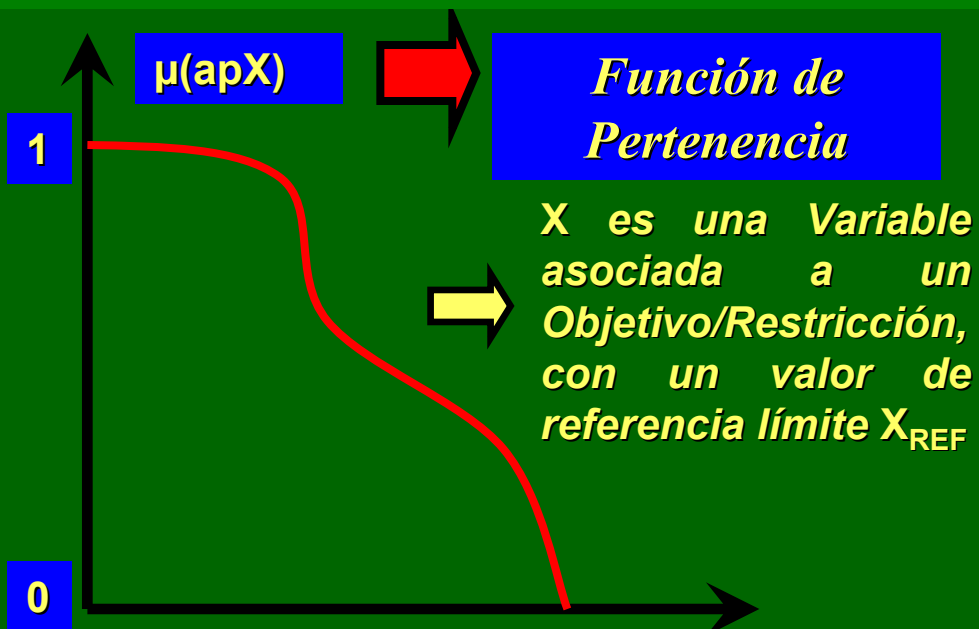
Efecto de PE:

- a) **PE < 1:** *Dilatación-
Menor Importancia en
la Confluencia*
- b) **PE > 1:** *Contracción-
Mayor Importancia en
la Confluencia*

Relajación de los Objetivos y Restricciones

Conjunto Difuso

$$apX = \int \mu(apX) / apX$$



Ejemplo: Pérdidas

$$apX = (X - X_{REF}) / X_{REF}$$

$X = \text{Perd} \Rightarrow ap\text{Perd}$

$X_{REF} \Rightarrow \text{Perd}_{REF}$

Apartamiento de la Variable X respecto de X_{REF}

Incertidumbres

Incertidumbres No Estocásticas sobre las Variables del Sistema

Imprecisiones

Refieren Límites de conceptos no definidos con precisión en las Variables del Sistema

Sistemas Difusos

Los Conjuntos Difusos

Modelan tanto

Incertidumbres como

Imprecisiones en el

Sistema Objeto

Función de Aptitud Difusa - FPSO

$\mu(\text{perd}) = 1$; si $\text{perd} \leq \text{Minperd}$ **1) X = Pérdidas (perd)**

$$\mu(\text{perd}) = \left[\frac{\text{Refperd} - \text{perd}}{\text{Refperd}} \right]^{p_{\mu(\text{perd})}} ; \text{ si } \text{Minperd} \leq \text{perd} \leq \text{Refperd}$$

$\mu(\text{perd}) = 0$; si $\text{perd} > \text{Refperd}$

2) X = Componente Homopolar (CH)

$\mu(|\mathbf{I}^{[0]}|) = 1$; si $|\mathbf{I}^{[0]}| < \text{MinCH}$

$$\left[\frac{\text{RefCH} - |\mathbf{I}^{[0]}|}{\text{RefCH}} \right]^{p_{\mu(|\mathbf{I}^{[0]}|)}} ; \text{ si } \text{MinCH} \leq |\mathbf{I}^{[0]}| \leq \text{RefCH}$$

$\mu(|\mathbf{I}^{[0]}|) = 0$; si $|\mathbf{I}^{[0]}| > \text{RefCH}$

Función de Aptitud Difusa

$$\mu_{nt}(v_{ft}) = 1; \text{ si } v_{ft} < v_1$$

3) Perfil de Tensiones

$$\mu_{nt}(v_{ft}) = \left[\frac{v_2 - v_{ft}}{v_2 - v_1} \right]^{p_{\mu}(v_{ft})}; \text{ si } v_2 \geq v_{ft} \geq v_1$$

$$\mu_{nt}(v_{ft}) = 0; \text{ si } v_{ft} > v_2$$

$$v_1 = 1/uAd$$

$$v_2 = 1/uInAd$$

$$v_{ft} = 1/ut$$

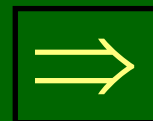
nt → nodo terminal

nNT → Nro de nodos terminales

$$\mu(U_{tf}) = \sqrt[n_{NT}]{\prod_{nt=1}^{n_{NT}} \mu_{nt}(v_{ft})}$$

$$uAd = 0.95 \text{ [pu]}$$

$$uInAd = 0.92 \text{ [pu]}$$



$$\mu(U_{tf}) = ITS$$

Función de Aptitud Difusa

4) Número de Cambios de Fase (NCf)

$$\mu(\text{ncf}) = 1; \text{ si } \text{ncf} < \text{RefNCf}_{\text{Min}}$$

$$\mu(\text{ncf}) = \left[\frac{\text{RefNCf}_{\text{Max}} - \text{ncf}}{\text{RefNCf}_{\text{Max}} - \text{RefNCf}_{\text{Min}}} \right]^{\rho_{\mu(\text{ncf})}}; \text{ si } \text{RefNCf}_{\text{Min}} \leq \text{ncf} \leq \text{RefNCf}_{\text{Max}}$$

$$\mu(\text{ncf}) = 0; \text{ si } \text{ncf} > \text{RefNCf}_{\text{Max}}$$

$$\text{RefNCf}_{\text{Max}} = \text{MAX} \{ \text{NCf}_{\text{PSOMinperd}}; \text{NCf}_{\text{PSOMinCH}}; \text{NCf}_{\text{PSOMaxITS}} \}$$

$$\text{RefNCf}_{\text{Min}} = \text{RefNCf}_{\text{Max}} - \text{NCf0} \rightarrow \text{fijado externamente}$$

RefNCfMin \neq 0; pues NCf = 0 corresponde a la situación de referencia, la cual pretende mejorarse.

Función de Aptitud Difusa: La t-Norma

Producto de Einstein

$$t_{PEinstein} : (x, y) \rightarrow \frac{x \times y}{2 - (x + y - x \times y)}$$

$$t_{PEinstein}^1 = \frac{\mu(\text{perd}) \times \mu(|I^{[0]}|)}{2 - (\mu(\text{perd}) + \mu(|I^{[0]}|) - \mu(\text{perd}) \times \mu(|I^{[0]}|))}$$

$$t_{PEinstein}^2 = \frac{t_{PEinstein}^1 \times \mu(\text{utf})}{2 - (t_{PEinstein}^1 + \mu(\text{utf})) - t_{PEinstein}^1 \times \mu(\text{utf})}$$

$$\mu_D = \frac{t_{PEinstein}^2 \times \mu(\text{ncf})}{2 - (t_{PEinstein}^2 + \mu(\text{ncf})) - t_{PEinstein}^2 \times \mu(\text{ncf})}$$

$$\mu_D = t_{PEinstein} \{ \mu(\text{perd}); \mu(|I^{[0]}|); \mu_{nt}(\text{vft}); \mu(\text{ncf}) \}$$

***La Metaheurística
soporte PSO utilizada
en FEPSO***

META-HEURÍSTICA PSO – Modelo con Factor de

Constricción: Modelo de CLERC

Ecuación del Cambio de Velocidad con Factor de Constricción χ

$$v_{in}(k+1) = \chi \times \{v_{in}(k) + \varphi_c \times r_1 \times [p_{in}(k) - x_{in}(k)] + \varphi_s \times r_2 \times [g_n(k) - x_{in}(k)]\}$$

$$\chi = \frac{2 \times \kappa}{\left| 2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4 \times \varphi} \right|}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \kappa \in [0,1] \\ \varphi = \varphi_c + \varphi_s \end{array} \right.$$

$$\forall \varphi > 4$$

Configuración de Valores con: $\kappa = 1$

$$\varphi_c = \varphi_s = 2.05; \varphi = 4.1 \rightarrow \chi = 0.729$$

La Partícula o Agente FPSO para el Problema BF

Es un Vector $[X_i]$ con ND componentes:

$$X_i = \begin{bmatrix} X_{d1} \\ X_{d2} \\ \vdots \\ \vdots \\ X_{dND} \end{bmatrix}$$

En este caso:

- Si se tienen NC cargas a conectar
- Las Cargas Trifásicas son fijas
- Si existen 3 fases [R, S, T] posibles para conectar 1 carga →

$$ND = \mathbf{Vrep}(3, NC) = 3^{NC}$$

$$d_n = \{1, 2, 3\}$$

Esquema Básico de Implementación

Inicialización de los
Parámetros del PSO.
Ponderadores
Exponenciales.

NC Cargas (P, Q),
Factor de Simultaneidad,
Factor de Potencia.

Valores de Referencia
de los PSO MonoObjetivo.

k=1

μ_D

FPRT

Simulación
FEPSO MultiObjetivo

k=k+1

Fin?

No

Si

nCf
U_i
$I^{[0]}$
Perd

(*)

nCf
U_i
$I^{[0]}$
Perd

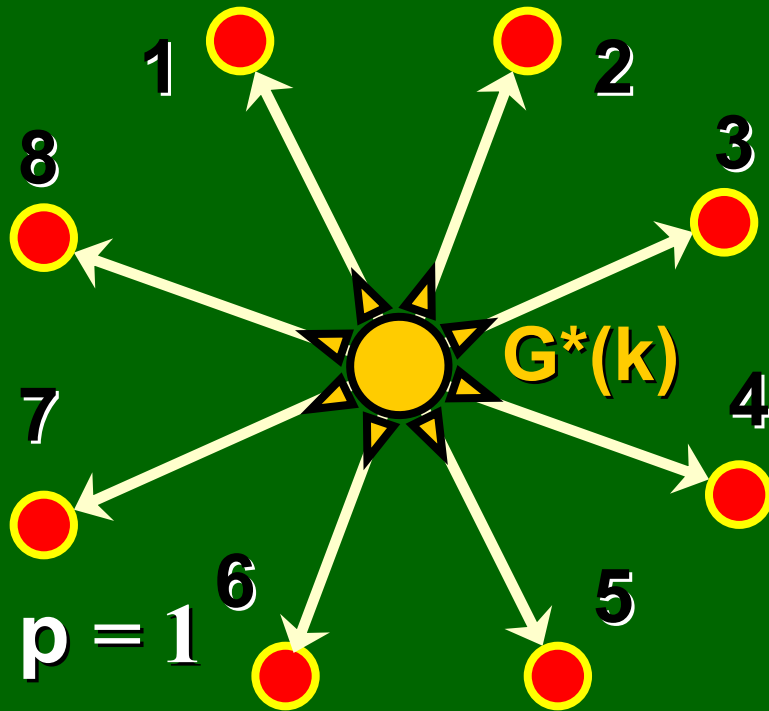
(k)

***La Metaheurística a en
FEPSO GIST***

*Topología de
Estrella Estocástica
– Factor de
Comunicación*

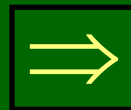
META-HEURÍSTICA EPSO – *Topología - Estrella*

Topología Estrella – $[\alpha] \rightarrow p = 1$



$$[\alpha] = \begin{bmatrix} 1 & - & - & - & - & - & - & - \\ - & 1 & - & - & - & - & - & - \\ - & - & 1 & - & - & - & - & - \\ - & - & - & 1 & - & - & - & - \\ - & - & - & - & 1 & - & - & - \\ - & - & - & - & - & 1 & - & - \\ - & - & - & - & - & - & 1 & - \\ - & - & - & - & - & - & - & 1 \end{bmatrix}$$

$G^*(k) = (g^*_1, g^*_2, \dots, g^*_N) (k)$

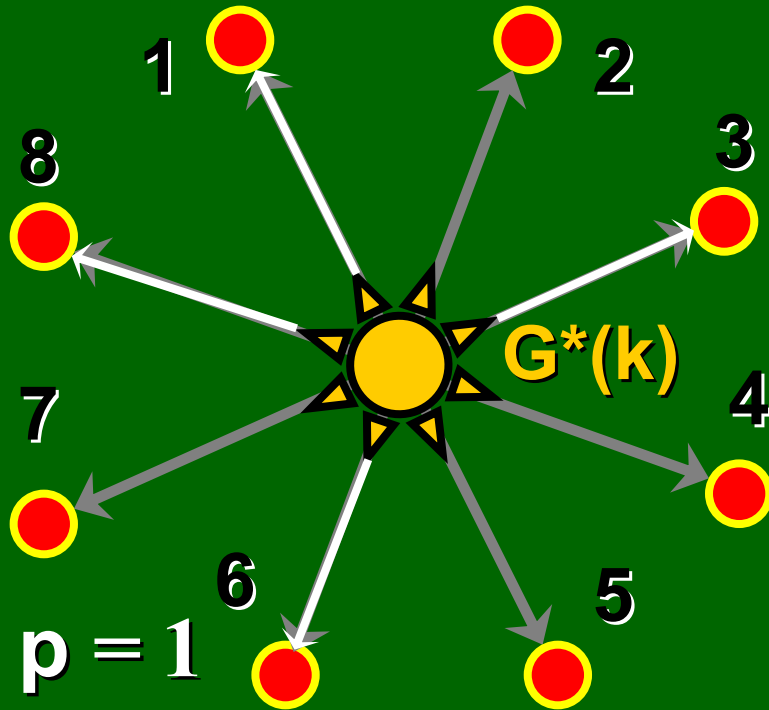


Vector Mejor Global

➤ *La Información sobre G^* tiene certeza de llegar a cada partícula del Swarm $\rightarrow [\alpha] = 1$*

META-HEURÍSTICA EPSO – Topología - Estrella

Topología Estrella Estocástica – $[\alpha] \rightarrow \{1, 0\}$



$$[\alpha] = \begin{bmatrix} 1 & - & - & - & - & - & - & - \\ - & 0 & - & - & - & - & - & - \\ - & - & 1 & - & - & - & - & - \\ - & - & - & 0 & - & - & - & - \\ - & - & - & - & 0 & - & - & - \\ - & - & - & - & - & 1 & - & - \\ - & - & - & - & - & - & 0 & - \\ - & - & - & - & - & - & - & 1 \end{bmatrix}$$

$$G^*(k) = (g^*_1, g^*_2, \dots, g^*_N) (k)$$



Vector Mejor Global

➤ *La Información sobre G^* tiene probabilidad p de llegar ($\alpha=1$) y $(1-p)$ de no llegar ($\alpha=0$) a cada partícula del Swarm*

META-HEURÍSTICA EPSO – Topología – Estrella

Estocástica Global-Individual (Porqué no sólo la

Diagonal Principal en $[\alpha]$?)

➤ La Información sobre cada p^*_i podría tener cierta probabilidad $p(\alpha_{ij})$ de influencia entre partículas del Swarm, por aplicación de los operadores evolutivos. Esta Topología es propuesta por el autor y está siendo investigada (*Estrella Global-Individual Estocástica*)

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} 1 & - & - & - & \alpha & - & - & - \\ - & 1 & - & - & - & - & - & - \\ - & - & 1 & - & - & - & \alpha & - \\ - & - & - & 1 & - & - & - & - \\ - & - & - & - & 1 & - & \alpha & - \\ - & - & - & - & - & 1 & - & - \\ - & \alpha & - & - & - & - & 1 & - \\ - & - & - & - & - & - & - & 1 \end{bmatrix}$$

Términos Adicionales en la Ecuación Evolutiva de Movimiento

$p^*(k) = (p^*_{1}, p^*_{2}, \dots, p^*_{N}) (k)$

Vector Mejor Individual

META-HEURÍSTICA EPSO – *Formulación*

Ecuación Evolutiva del EPSO – Topología *Estrella Global/Individual Estocástica*

$$v_{in}(k+1) = \{w_i^*(k) \times v_{in}(k)\} + w_i^*c(k) \times r_1 \times [p_{in}(k) - x_{in}(k)] + w_i^*s(k) \times r_2 \times [G_n^*(k) - x_{in}(k)] \times p(\alpha) + \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ib}^*[k] \times p(\alpha_{ij}) \times [p_{jn}(k) - x_{in}(k)] \}$$

$$w_{ib}^*[k] = w_{ib} \times [1 + \psi \times N(0,1)]$$

ψ controla la amplitud de las mutaciones

$n \equiv P$ Es el tamaño de la Población

Los Términos $\sum_{j=1, j \neq i}^n$ se aplican para componer una nueva generación, integrando el resto de los Operadores Evolutivos. $p(\alpha)$ corresponde al Factor de Topología Global, mientras que $p(\alpha_{ij})$ a la de Topología Individual

***El Procedimiento
Bootstrap en un
Espacio de Búsqueda
(EB) Discreto***

Función de Aptitud en un EB Discreto con Buenas Soluciones muy Aisladas

d₃

Las dimensiones son intervalos: [1, 2, 3].

B *f*: Función de Aptitud

ND: Número de Dimensiones

$$f(A) > 0$$

$$f(B) > 0$$

$$f(C) > 0$$

d₁

En el Resto de los puntos $f(p) = 0$.

d₂

si ND \gg 3 al inicializar Aleatoriamente el Enjambre $f(p)$ puede no mejorar nunca o sólo un poco, hacia una solución Óptimo Local.

Cambio de la Función de Pertenencia

μ_{ITS}

1) *Relajación de la Función $\mu(U_{tf})$.*

$\Rightarrow \mu(U_{tf})^* = e^{-[\xi \times N_{ntft}]}$; con $0 < \xi \leq 1$

2) *Se itera con estas soluciones y llevando, simultáneamente, el cálculo de $\mu(U_{tf})$.*

3) *Cuando el MG alcanzado implique $\mu(U_{tf}) > 0$, se cambia de $\mu(U_{tf})^*$ a $\mu(U_{tf})$.*

$\Rightarrow \mu(U_{tf}) = \sqrt[n_{NT}]{\prod_{nt=1}^{n_{NT}} \mu_{nt}(v_{ft})}$

Metaheurística SA
(Recocido Simulado)

Comienzo Procedimiento SA

1. Establecer un punto de referencia o partida (estado) = i_0
2. Establecer una Temperatura de Partida $T = T_0$ y una Tasa de Enfriamiento: $0 < \alpha < 1$;
3. Establecer NT (Número de Pruebas/Iteraciones por Nivel de

4. Mientras la Condición de Parada no sea satisfecha, hacer

5. Para $k \leftarrow 1$ hasta NT hacer

6. Generar puntos de prueba, j , desde S_i (vecinos a la solución i) utilizando la función $q(i, j)$;

7. Aceptar la solución j -ésima con una probabilidad $p(\text{accept } j)$ dada por la expresión (1);

8. Fin Para

9. Reducir la Temperatura mediante la regla $T \leftarrow T \times \alpha$;

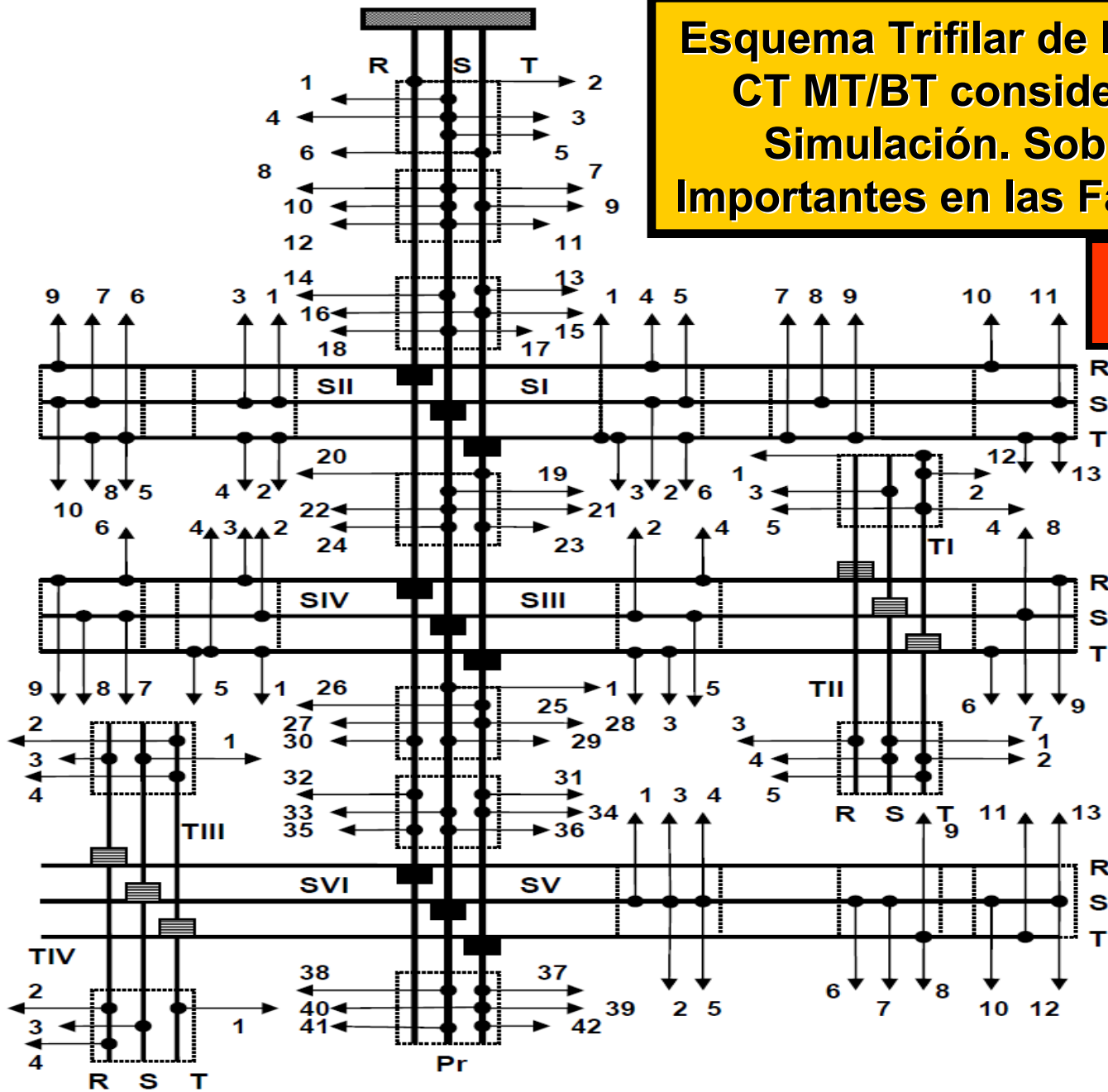
10. Fin Mientras

Fin Procedimiento SA

***Simulación: Esquema
Trifilar del SDEE BT
Real y Resultados
Obtenidos***

**Esquema Trifilar de la Red/Salida
CT MT/BT considerada en la
Simulación. Sobrecargas
Importantes en las Fases [S] y [T]**

ND = 3¹¹⁵



Resultados

Valores del Esquema Base: $Perd[kW] = 13.02$ $||^{[0]}|[A] = 47.6$ $\mu(Uft) = 0$ $ncf = 0$

<u>x-PSO MonoO</u>	Nro Part	T Ejecución	Perd[kW]	$ ^{[0]} [A]$	$\mu(Uft)$	ncf
Min Perd	150	45 [min]	6.94	18.93	0.32	81
Min $ ^{[0]}$	150	37 [min]	10.16	0.1	0	79
Max $\mu(Uft)$	150	43 [min]	7.02	13.80	0.34	85
<u>FSA MultiO</u>	Nro Part	T Ejecución	Perd[kW]	$ ^{[0]} [A]$	$\mu(Uft)$	ncf
Max $t_{Peinstein}$	250	1 [h] 37 [min]	8.64	3.9	0.57	80
<u>FEPSO GIST MultiO</u>	Nro Part	T Ejecución	Perd[kW]	$ ^{[0]} [A]$	$\mu(Uft)$	ncf
Max $t_{Peinstein}$	200	47 [min]	7.21	0.4	0.27	59

Exponentes y Referencias para las Funciones de Pertenencia: $\mu(perd)=p\mu(||^{[0]}|)=p\mu(ncf)=3$;
 $p\mu(vft)=4$; [$Minperd=6.94$, $Refperd=13.02$]; [$MinCH=0.1$, $RefCH=47.6$]; [$RefNCf_{Min}$
 $=45$, $RefNCf_{Max}=81$]

Fin