

*FUNDACIÓN BARILOCHE  
INSTITUTO DE ECONOMÍA ENERGÉTICA  
CONICET*

*ENDIO XXII - EPIO XX*

*OPTIMIZACIÓN DEL BALANCE DE FASES EN LOS  
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA EN BAJA  
TENSIÓN: UNA APLICACIÓN DE LA  
METAHEURÍSTICA FPSO (Fuzzy Particle Swarm  
Optimization) MULTIOBJETIVO. IMPACTOS EN LOS  
ESQUEMAS DE CONTROL REGULATORIO*

**Desde la Ponencia del Dr. Gustavo Schweickardt**

**Autores: Gustavo Schweickardt (CONICET-IdEE/FB) y Gustavo  
Wiman (UTN-INVAP)**

**Buenos Aires, Febrero de 2010**

**1. *Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica (SDEE).***

**2. *Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica en Baja Tensión Trifásicos (SDEE BT).***

**3. *El Problema de Balance de Fases (BF) en los SDEE BT.***

**1. *El Problema General.***

**2. *Pérdidas y Uso Racional de la Energía desde el Lado de la Oferta.***

**3. *Perfil de Tensiones: Calidad del Producto Técnico Tensión de Suministro.***

**4. *Componente Homopolar: Sistemas Desbalanceados.***

**4. *El Problema de Balance de Fases (BF) en los SDEE BT.***

**5. *El Problema de la Modelación Adecuada en la Característica de las Cargas  $U=f(I)$ .***

**6. *Formulación del Problema BF mediante Programación Lineal Entera Mixta (MIP).***

**7. *Limitaciones en la Solución MIP.***

**5. *Propuesta de Solución para el Balance de Fases en los SDEE BT como problema MultiObjetivo mediante la Metaheurística FPSO.***

**1. *Formulación MultiObjetivo del Problema BF.***

**2. *Optimalidad Difusa de Bellman-Zadeh.***

**5. *Propuesta de Solución para el Balance de Fases en los SDEE BT como problema MultiObjetivo mediante la Metaheurística FPSO.***

- 3. *Decisión Maximizante en el Dominio Difuso.***
- 4. *Contracción y Dilatación en un Conjunto Difuso. Efecto de los Ponderadores.***
- 5. *Relajación de los Objetivos y Restricciones.***
- 6. *Operador de Confluencia: t-Norma.***
- 7. *Función de Aptitud Difusa – FPSO.***
- 8. *La t-Norma Producto de Einstein.***

## ***6. La Metaheurística soporte PSO utilizada en FPSO.***

- 1. Factor de Constricción. Modelo de Clerc.***
- 2. La Partícula o Agente PSO para el Problema BF.***
- 3. Esquema Básico de Implementación.***

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

- 1. Función de Aptitud en un EB Discreto con Buenas Soluciones muy Aisladas.***
- 2. Cambio en la Función de Pertenencia  $\mu_{ITS}$ .***

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

- 8.** *Simulación: Esquema Trifilar del SDEE BT Real y Resultados Obtenidos.*
- 9.** *Impacto en los Esquemas de Control Regulatorio.*
- 10.** *Síntesis y Conclusiones.*

*Sistemas de  
Distribución de  
Energía Eléctrica  
(SDEE)*

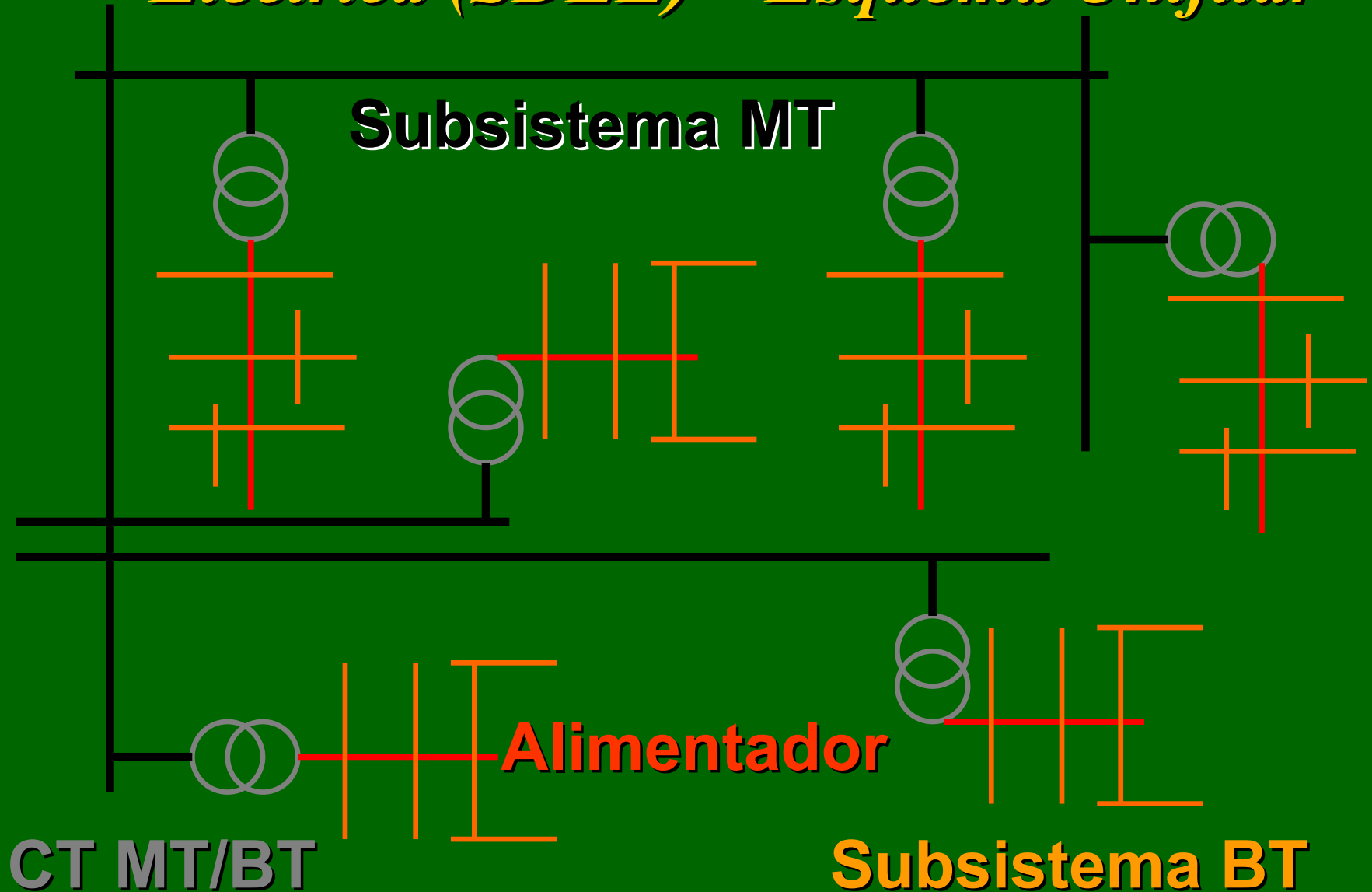
# ***Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Eléctrica (SDEE)***

- I. De manera general, y aplicable al problema abordado, pueden identificarse en la Distribución de Energía Eléctrica dos *niveles de tensión* fundamentales: *Media Tensión - MT* (13.2 [kV]) y *Baja Tensión - BT* (0.38 [kV]).**
- II. Así, se puede hablar del *Subsistema de Redes de MT o Primario* y el *Subsistema de Redes de BT o Secundario*.**
- III. Desde el *Subsistema de Redes BT*, son abastecidos los usuarios típicos (*residenciales*), considerados en el modelo propuesto en este trabajo.**
- IV. El vínculo entre ambos Subsistemas, lo constituyen los Centros de Transformación MT/BT (CT MT/BT).**
- V. Cada salida de un CT MT/BT constituye un sistema de Alimentadores BT, *analizado en forma independiente*.**



# *Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica*

## *Eléctrica (SDEE) – Esquema Unifilar*

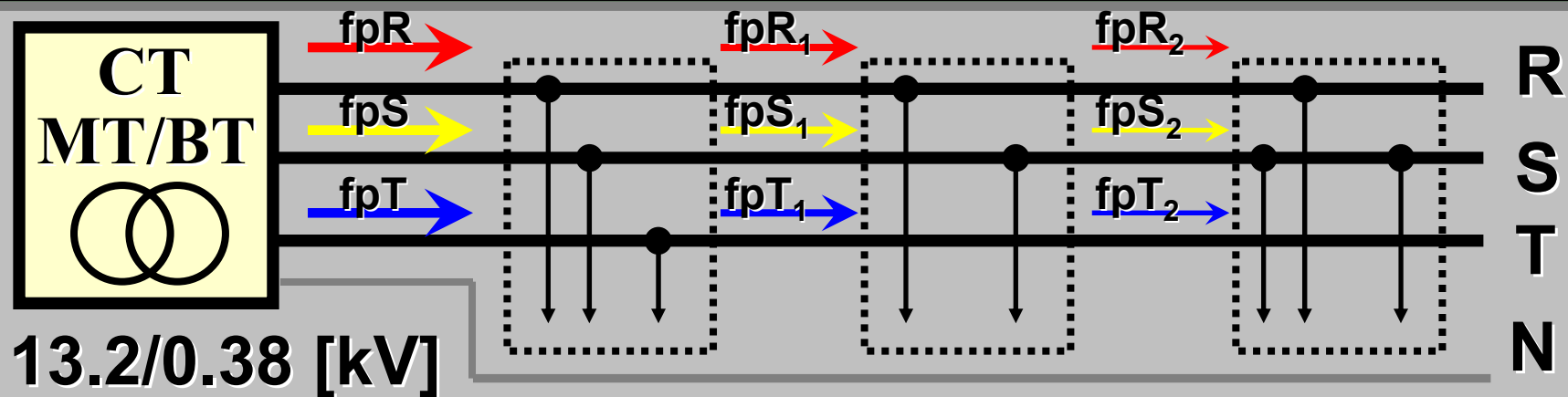


***Sistemas de  
Distribución de  
Energía Eléctrica en  
Baja Tensión  
Trifásicos (SDEE BT)***

# *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*.

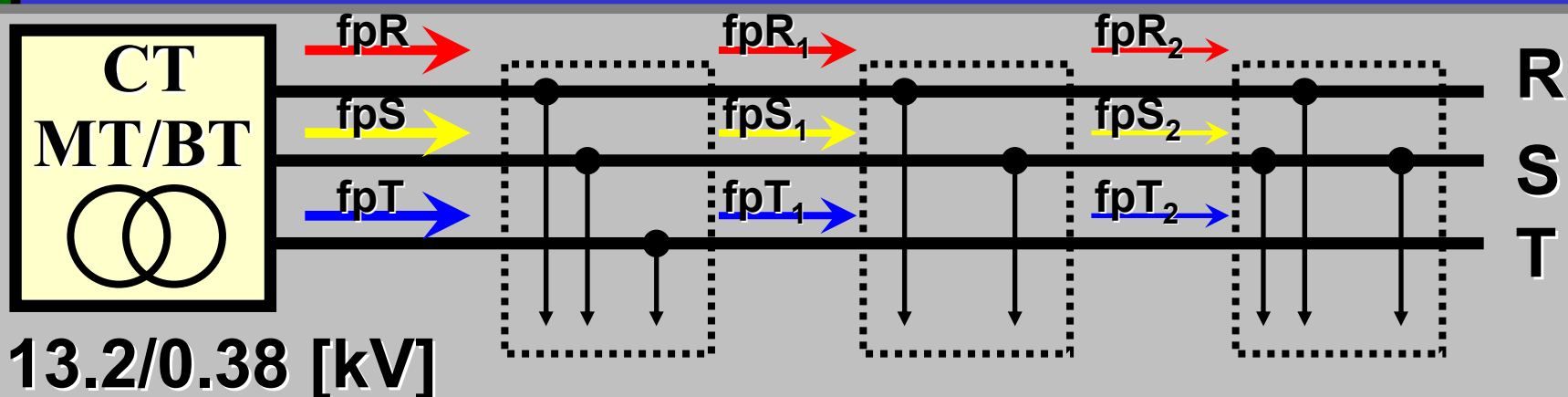


***El Problema del  
Balance de Fases en  
los SDEE BT***

# 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 ( $I^{[0]}$ )



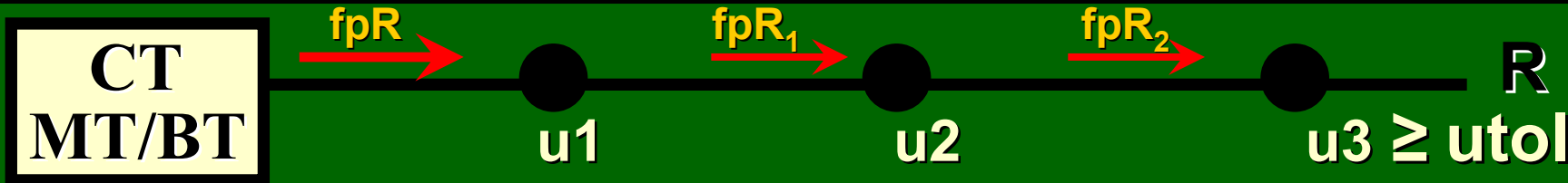
# ***Pérdidas y Uso Racional de la Energía desde el Lado de la Oferta***

- I. Es *inevitable* que la circulación de corrientes en los Alimentadores de un SDEE BT genere pérdidas. Constituye un hecho físico asociado a los materiales conductores.**
- II. Sin embargo, si las fases se encuentran balanceadas, no existen sobrecargas en las mismas disminuyéndose tales pérdidas. Desde esta perspectiva, las pérdidas son *evitables* mediante un diseño de conexión de las cargas a las fases [R], [S] y [T] adecuadamente estudiado (Óptimo).**
- III. Se insiste en aspectos de Uso Racional de la Energía, desde el lado de la Demanda. Por caso, el empleo de Lámparas de Bajo Consumo.**
- IV. Es claro que el Diseño Óptimo del conexionado de las cargas al sistema trifásico, es un manejo desde el lado de la Oferta (la propia empresa de distribución).**

# *Perfil de Tensiones: Calidad del Producto*

## *Técnico Tensión de Suministro*

- I. La sobrecarga en una fase del sistema trifásico, en un Alimentador BT, genera un Perfil de Tensiones con un *elevado decaimiento*. La *caída de tensión* desde la salida del CT MT/BT al *nodo terminal* ( $u_3$  en el esquema), puede ser muy superior a lo que fijan las normas. En general, no puede superar el 5-7% de la *tensión nominal de fase* ( $U_{nom} = 0.38/(3)^{1/2} = 0.22$  [kV], en Argentina). Condición:  $U_{tol} \geq (5-7\%) U_{nom}$ .
- II. La Reforma Eléctrica planteada hace dos décadas, define regulatoriamente la Calidad del Producto Técnico Tensión de Suministro en el abastecimiento a un usuario. Existen penalizaciones monetarias, aplicables a la empresa distribuidora, cuando se vulneran los límites impuestos.

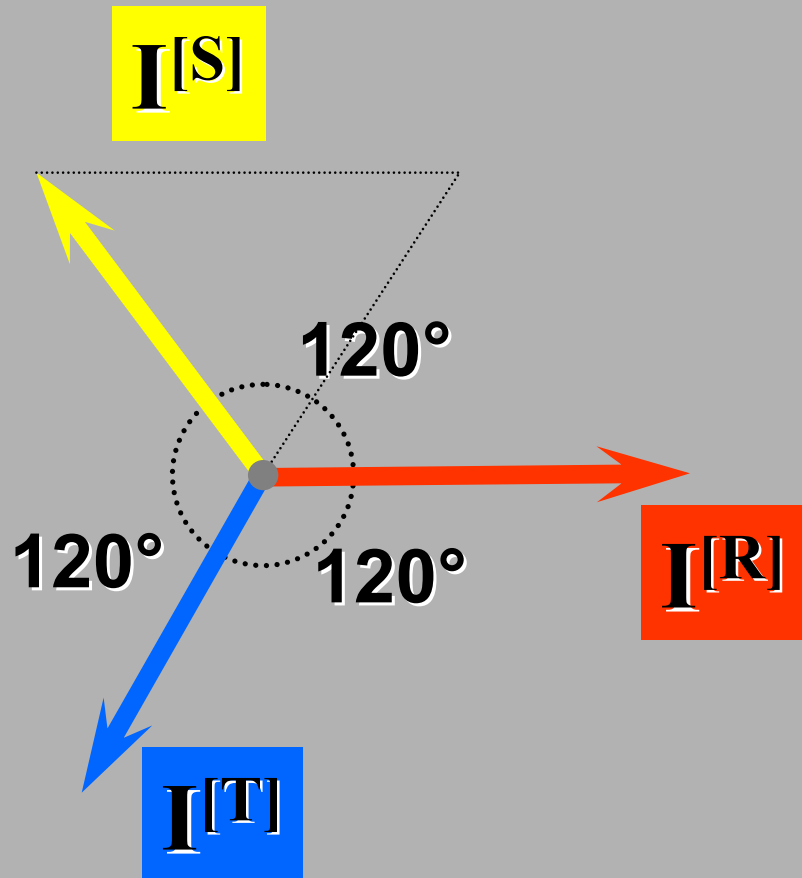


# ***Efecto de la Componente Homopolar: Sistema de BT Simétrico Desbalanceado***

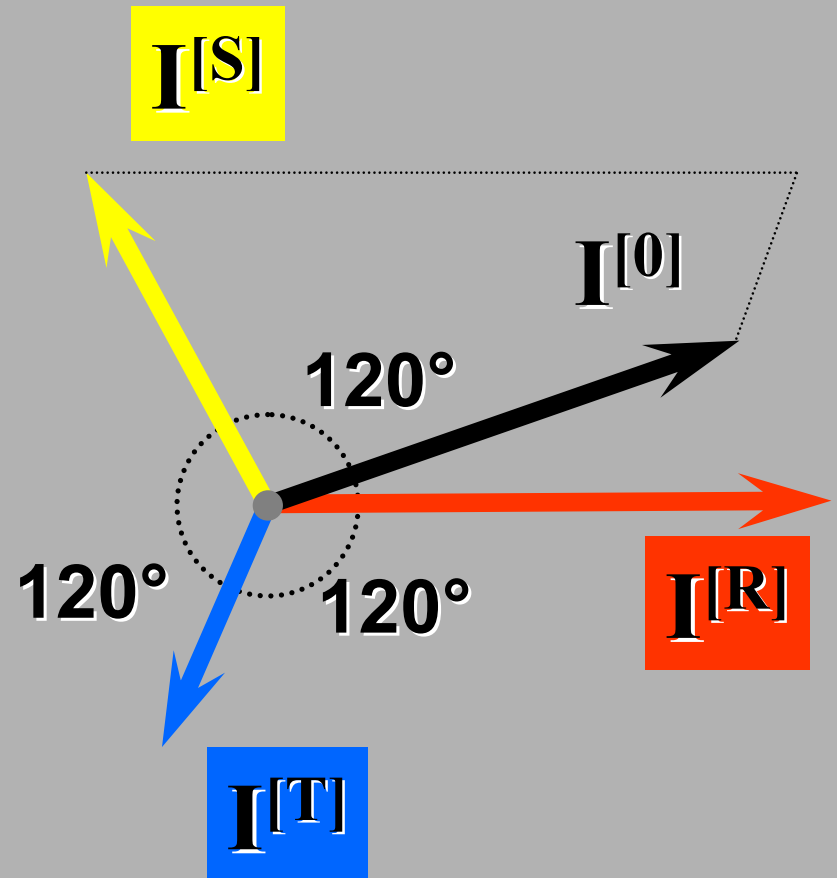
- I. La Suma Vectorial (Fasorial) de las tres *corrientes o intensidades* en las Fases [R], [S] y [T], en un Sistema Simétrico y Balanceado (Perfecto) es *nula*: no existe circulación de corriente por el conductor Neutro.
- II. En cambio, la misma Suma Vectorial (Fasorial) en un Sistema Simétrico y Desbalanceado, *no es nula*: Existe circulación de corriente por el conductor Neutro y por *tierra* (Componente Homopolar). La misma, si es de valor importante, *reduce la confiabilidad del sistema de protección por cortocircuitos con contacto a tierra*. Este efecto, adopta mayor relevancia cuando tal desbalance se proyecta al SubSistema de MT.



*a) Sistema Simétrico y Balanceado*



*b) Sistema Simétrico Desbalanceado*



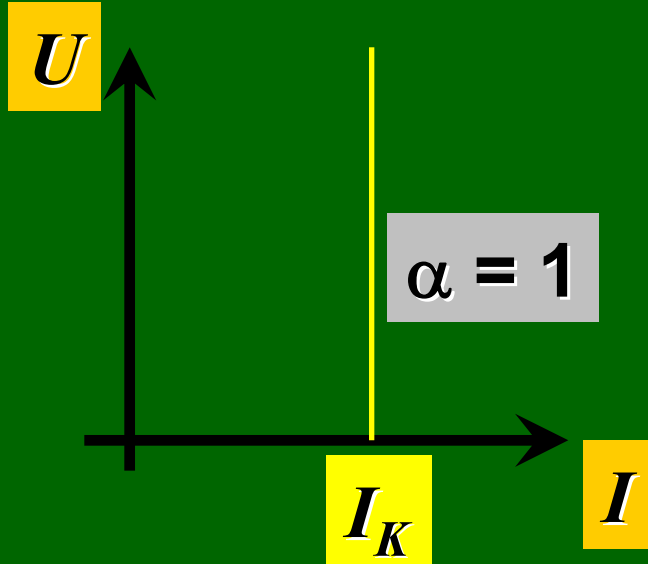
# *El Problema de la Modelación Adecuada en la Característica de las Cargas $U=f(I)$*

- I. Cada carga de un Alimentador del sistema trifásico SDEE BT, es abastecida según su potencia, conforme una cierta *corriente* o *intensidad* ( $I$ ) a una cierta *tensión de suministro* ( $U$ ).
- II. La *función*  $U=f(I)$  se denomina Característica de la Carga y resulta, en general, un Polinomio o una combinación de *funciones polinomiales y radicales*.
- III. Sin embargo, se apela frecuentemente a simplificaciones, definiendo tres tipos de relaciones básicas:  $I=Cte$  (Característica de Intensidad Constante);  $U/I=Cte$  (Característica de Impedancia Constante);  $U \times I=Cte$  (Característica de Potencia Constante).
- IV. Los Modelos de Programación Matemática aplicables a la solución del problema de Balance de Fases, han considerado sólo características  $I=Cte$ , caso en extremo ideal.

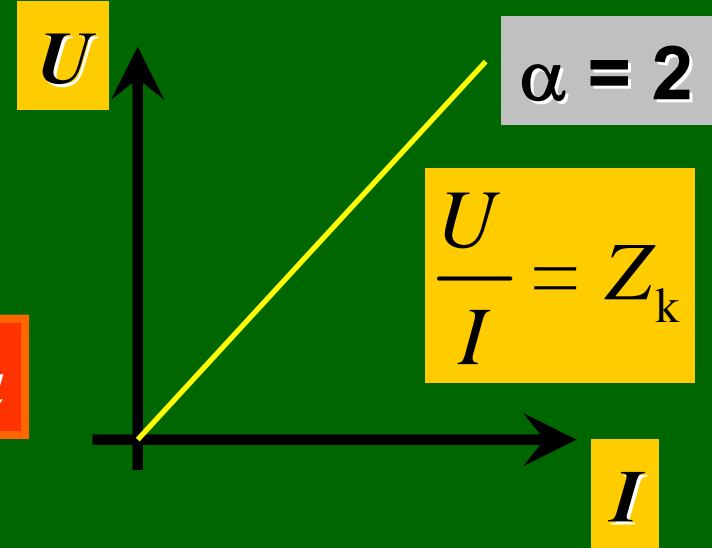
# *El Problema de la Modelación Adecuada en la Característica de las Cargas $U=f(I)$*

- Sean (U) la Tensión de Abastecimiento a un usuario, (I) su intensidad de consumo, (P) su Potencia Activa demandada y (Q) su potencia Reactiva demandada, entonces valen las siguientes gráficas y expresiones para modelar la Característica de la Carga  $i$ -ésima/usuario  $i$ -ésimo:

# El Problema de la Modelación Adecuada de la Característica de las Cargas $U=f(I)$

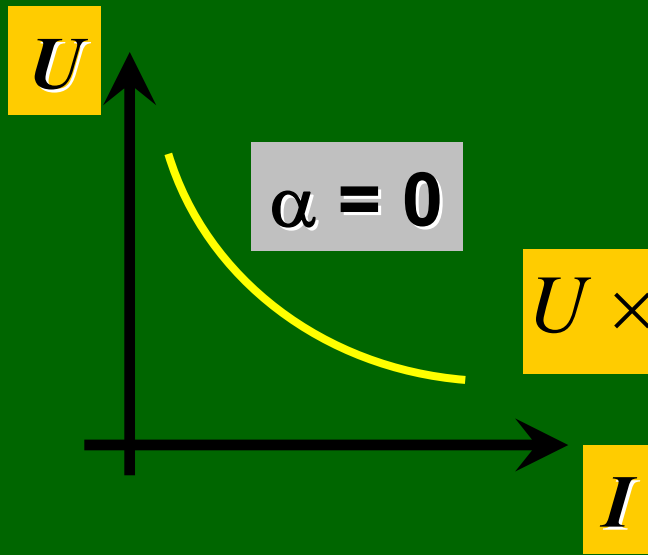


$$P = U \times I$$



*Más real para Residencial*

$$\alpha = \alpha_1 \approx 1.5-2$$



$$U \times I = P_k$$

$$P_i = P_N \times \left( \frac{U_i}{U_N} \right)^\alpha$$

$$Q_i = Q_N \times \left( \frac{U_i}{U_N} \right)^{\alpha_1}$$

# Formulación del Problema BF mediante Programación Lineal Entera Mixta (MIP)

$$\text{Min } \{ \sum_j p_j \times U_j \}$$

$p_j$ =ponderadores de importancia en Nodos de conexión de Cargas

Sujeto a:

$U$ =Desbalance;  $U_j$ =Desbalance de Nodo

$$U_j = \text{Max} \{ |I_j^{[R]} - I_j^{[T]}|; |I_j^{[S]} - I_j^{[T]}|; |I_j^{[R]} - I_j^{[S]}| \} \quad (1)$$

$$I_j^{[\Phi]} = \sum_k I_k^{[\Phi]} + \sum_w \delta_i^{[\Phi]}{}_w \times I_i^{[\Phi]}{}_w \quad (2)$$

$$\sum_w \delta_i^{[\Phi]}{}_w = 1; \text{ para } [\Phi] \text{ en } \{R, S, T\} \quad (3)$$

$$\sum_w \delta_i^{[\Phi]}{}_w = 1; \text{ para } [w] \text{ en } [1\dots nC] \quad (4)$$

$$|I_j^{[\Phi]}| \leq C_j \quad (5)$$

$$\delta_i^{[\Phi]}{}_w \text{ en } \{0, 1\} \text{ para } [i, \Phi] \quad (6)$$

$$\sum_j p_j = 1; \text{ para } [j] \text{ en } [1\dots nR] \quad (7)$$

$\Phi$ =fase;  $\delta$ =variable de decisión;  $nR$ = Ramas;  $nC$ = Cargas:  $C_j$ =l Límite

# *Limitaciones en la Solución MIP*

- I. Como se dijo, este enfoque considera sólo Características de las Cargas según  $I=Cte$ , caso en extremo ideal cuyos resultados no se compadecen con los SDEE BT reales.
- II. Además, intervienen los ponderadores  $p_j$ , de carácter subjetivo, en el que se define externamente sobre que nodo de conexión de cargas el desbalance es más importante.
- III. La Formulación es MonoObjetivo: sólo contempla la *minimización de la suma de los Desbalances Nodales ponderados*. Indirectamente, pero sin conocer formalmente en que medida, se incorporan los tres objetivos referidos: *Pérdidas, Perfil de Tensiones y Componente Homopolar*.

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

# ***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*

# *Optimalidad Difusa de Bellman-Zadeh*

- I. La Metaheurística propuesta para resolver este problema *no intenta buscar una solución “óptima” sino la más satisfactoria* dentro de un cierto Espacio de Búsqueda.
- II. Para ello se procura *alcanzar el máximo nivel de satisfacción de los Objetivos y las Restricciones formuladas*. Es pertinente introducir el Principio de Optimalidad de Bellman-Zadeh, que se soporta en los Conjuntos Difusos.
- III. Los Objetivos y las Restricciones, son “relajados” (no determinísticos) asociándoles un Conjunto Difuso, cuyo valor de la función de pertenencia, es interpretado como el nivel de satisfacción alcanzado en el dominio de cada variable Objetivo/Restricción.

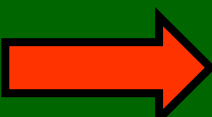
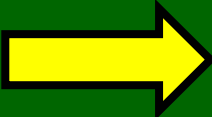
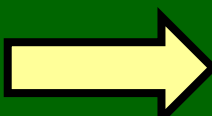
# Decisión Maximizante en el Dominio Difuso

$x \in X$ ; Conjunto de Alternativas

$O \Rightarrow \mu_O(x)$

$R \Rightarrow \mu_R(x)$

$D = O \text{ C } R_1 \text{ C } R_2 \dots \text{ C } R_H$



Objetivo Difuso

Restricción Difusa

Decisión Difusa

**C**  $\rightarrow$  Operador de Confluencia



## Decisión Maximizante Estática

### Bellman - Zadeh

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

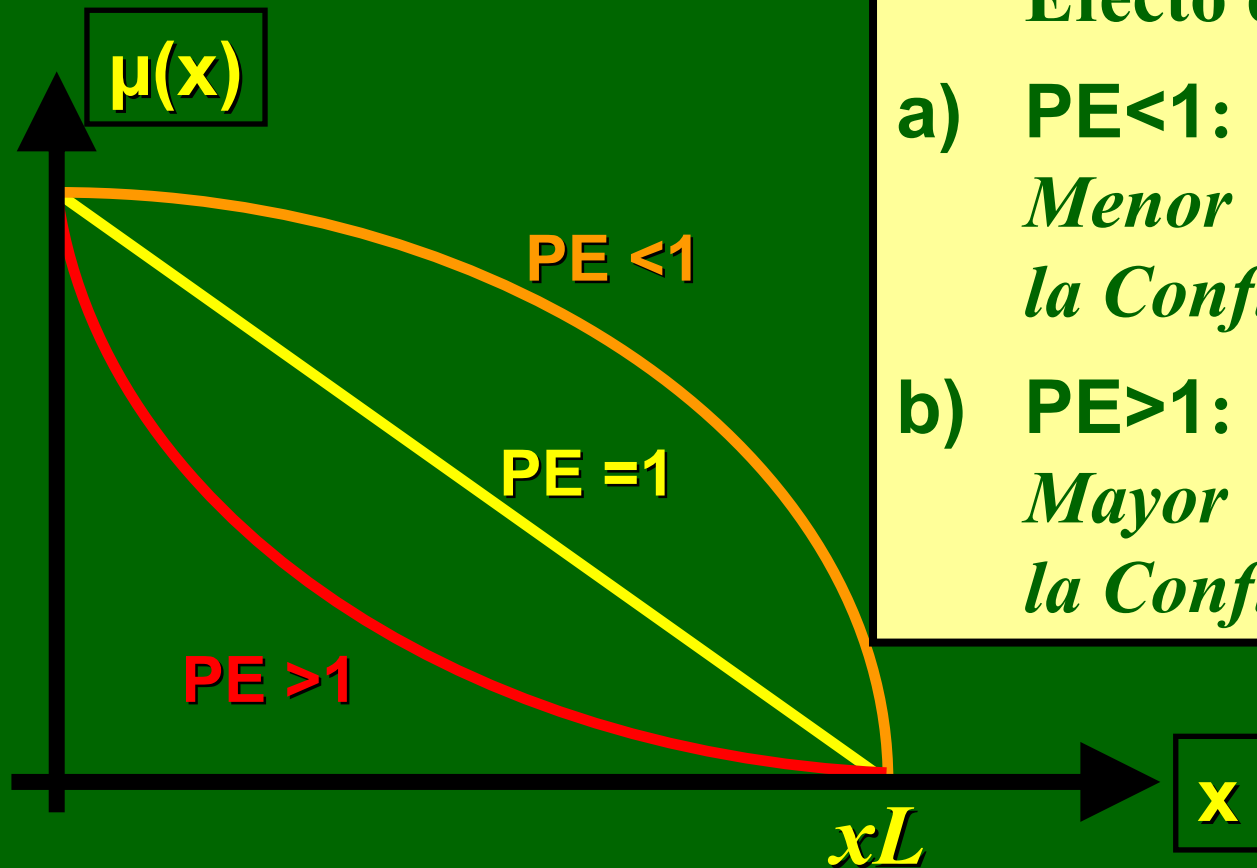
$[R_j]^{p_{R_j}} \Rightarrow [\mu_{R_j}(x)]^{p_{R_j}}$

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 $\mu(x)$*



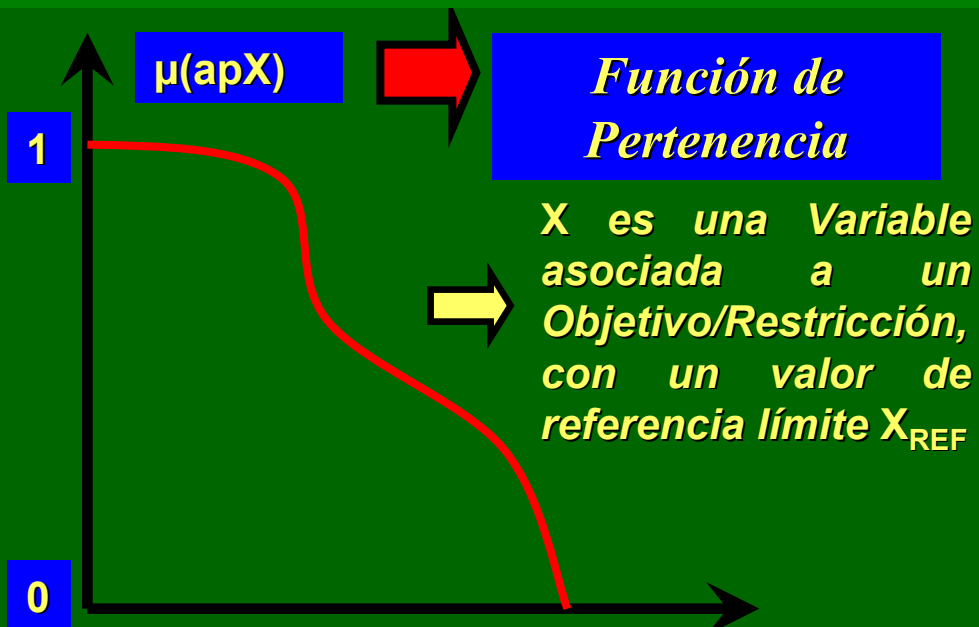
**Efecto de PE:**

- 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

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



*Función de Pertenencia*

X es una Variable asociada a un Objetivo/Restricción, con un valor de referencia límite  $X_{REF}$

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

Apartamiento de la Variable X respecto de  $X_{REF}$

Ejemplo: Pérdidas

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

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

*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*

# *Operador de Confluencia: t-Norma*

1) Es una función  $t$  definida en el intervalo  $[0, 1]$  aplicado también en  $[0, 1]$ .

2) Satisface las *siguientes condiciones*:

*Si  $t: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  es una t-norma, entonces:*

*a.-  $t(0,0) = 0; t(x,1) = x$  – Condiciones de Frontera*

*b.-  $t(x,y) = t(y,x)$  – Conmutatividad*

*c.-  $t(x,y) \leq t(\alpha,\beta)$  – Monotonicidad*

*d.-  $t((t(x,y),z) = t(x,t(y,z)))$  – Asociatividad*

3) Satisface los *requerimientos de un Operador de Confluencia entre conjuntos Difusos (Decisión Estática Difusa de Bellman-Zadeh)*



## ***Función de Aptitud Difusa - FPSO***

- I. Como en toda Metaheurística, debe formularse una Función de Aptitud que evalúe la bondad de una potencial solución. Para el caso de la Metaheurística propuesta FPSO, La Función de Aptitud (FA) se corresponde con la Decisión Maximizante (DMax) en el Dominio Difuso. Esto es:  $FA \equiv DMax$ .**
- II. De modo que deben ser formulados los Conjuntos Difusos asociados a cada Variable de Apartamiento,  $apX$ , respecto de un valor de referencia pertinente,  $X_{REF}$ , que se corresponden con los Objetivos/Restricciones formulados en el Modelo MultiObjetivo.**
- III. Además, sobre cada Conjunto Difuso, se definirán los *ponderadores exponenciales* (PE) que indicarán su importancia en la Confluencia que conduce a la DMax.**



## *Función de Aptitud Difusa - FPSO*

- I. En el Problema BF, entonces, se tendrán tres conjuntos difusos, asociados a cada respectiva Función Objetivo, y otro Conjunto Difuso, asociado a la Restricción de Tolerancia en el Perfil de Tensiones. Debe considerarse que en la Optimalidad de Bellman-Zadeh, los Objetivos y las Restricciones son tratados por igual mediante el Operador de Confluencia (t-norma).
- II. La Restricción de límite de Intensidad en la Corriente que circula por cada alimentador, es *determinística*. Esto supone que *no se aceptarán soluciones en las que tal límite se vulnere, cuestión que responde a limitaciones operativas estrictas*.
- III. Los valores  $\text{Min}X$ , serán límites inferiores y los  $\text{Ref}X$ , las Referencias.  $X$  es la variable del Conjunto Difuso Objetivo/Restricción.

# Función de Aptitud Difusa - FPSO

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

$\mu(\text{perd}) = \left[ \frac{\text{Refperd} - \text{perd}}{\text{Refperd}} \right]^{p_{\mu(\text{perd})}}$  ; 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  $|\mathbf{I}^{[0]}| < \text{MinCH}$

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

- I. En el caso del Conjunto Difuso asociado al Perfil de Tensiones, se propone construir un Índice. Se referirá como ITS (Índice de Tensión de Suministro).
- II. Para ello, se toman como referencia los nodos terminales ( $t$ ), ya que al ser la *topología* de las Redes BT *radial*, si en esos nodos no se vulnera la tensión tolerada, en los nodos “aguas arriba” del Sistema de Alimentadores BT, tampoco.
- III. Se tienen las variables  $u_t$  (tensión de suministro en el nodo terminal  $t$ -ésimo) y dos límites para construir el Conjunto Difuso asociado a la tensión:  $u_{lad}$  (tensión límite admisible) y  $u_{lnad}$  (tensión límite inadmisibles)
- IV. Se definen las variables recíprocas  $v_{ft} = 1/u_t$ ;  $v_1 = 1/u_{lad}$  y  $v_2 = 1/u_{lnad}$ .

# Función de Aptitud Difusa - FPSO

$$\mu_{nt}(vft) = 1; \text{ si } vft < v1$$

## 3) Perfil de Tensiones

$$\mu_{nt}(vft) = \left[ \frac{v2-vft}{v2-v1} \right]^{p_{\mu}(vft)}; \text{ si } v2 \geq vft \geq v1$$

$$\mu_{nt}(vft) = 0; \text{ si } vft > v2$$

$$v1=1/uAd$$

$$v2=1/uInAd$$

$$vft=1/ut$$

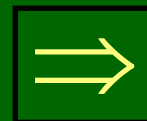
nt → nodo terminal

nNT → Nro de nodos terminales

$$\mu(U_{tf}) = \sqrt[nNT]{\prod_{nt=1}^{nNT} \mu_{nt}(vft)}$$

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

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



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

# *Función de Aptitud Difusa - FPSO*

- I. Finalmente, para el caso del Conjunto Difuso asociado a los *cambios de conexiones de fase de las cargas*, sus límites se constituyen mediante dos valores de referencia mínimo y máximo,  $RefNCf_{MIN}$  y  $RefNCf_{MAX}$  respectivamente. La variable del conjunto, es referida como *ncf*.
- II. Para el caso de la determinación de  $RefNCf_{MAX}$ , se ha propuesto el máximo valor que se obtiene de simular una *MetaHeurística PSO (MonoObjetivo)*, optimizando independientemente las *Pérdidas*, la *Componente Homopolar* y el *Perfil de Tensiones*.
- III. El valor de  $RefNCf_{MIN}$ , se obtiene por diferencia entre  $RefNCf_{MAX}$  y un valor externamente fijado,  $NCf_0$ .

# *Función de Aptitud Difusa - FPSO*

## 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 – FPSO: 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 FPSO***



# META-HEURÍSTICA PSO – Modelo con Factor de Constricción: Modelo de CLERC

*Ecuación del Cambio de Velocidad con Factor  
de Constricción  $\chi$*

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

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

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

$$\forall \varphi > 4$$

**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*

- I. En este Esquema (ver Diagrama de Flujo en la página siguiente) se requieren algunos datos de inicialización. Por una parte, los *parámetros* del PSO Soporte y los *Ponderadores Exponenciales* que establecen la importancia de los Conjuntos Difusos solidarios a cada Objetivo/Restricción. Por otro, *parámetros típicos* de los SDEE, tales como el *Factor de Potencia* (Coseno del ángulo cuya tangente es la relación entre la Potencia Reactiva y Activa) y el *Factor de Simultaneidad de las Cargas*, el cual pondera los *máximos simultáneos* (por caso, el 0.7 del máximo de cada carga individual).
- II. Además, para la obtención de los *Perfiles de Tensiones, Intensidades y Pérdidas*, se simula un *Flujo de Potencia Rápido Trifásico (FPRT)*

# 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

$\mu_D$

FPRT

Simulación  
FPSO MultiObjetivo

k=k+1

Fin?

No

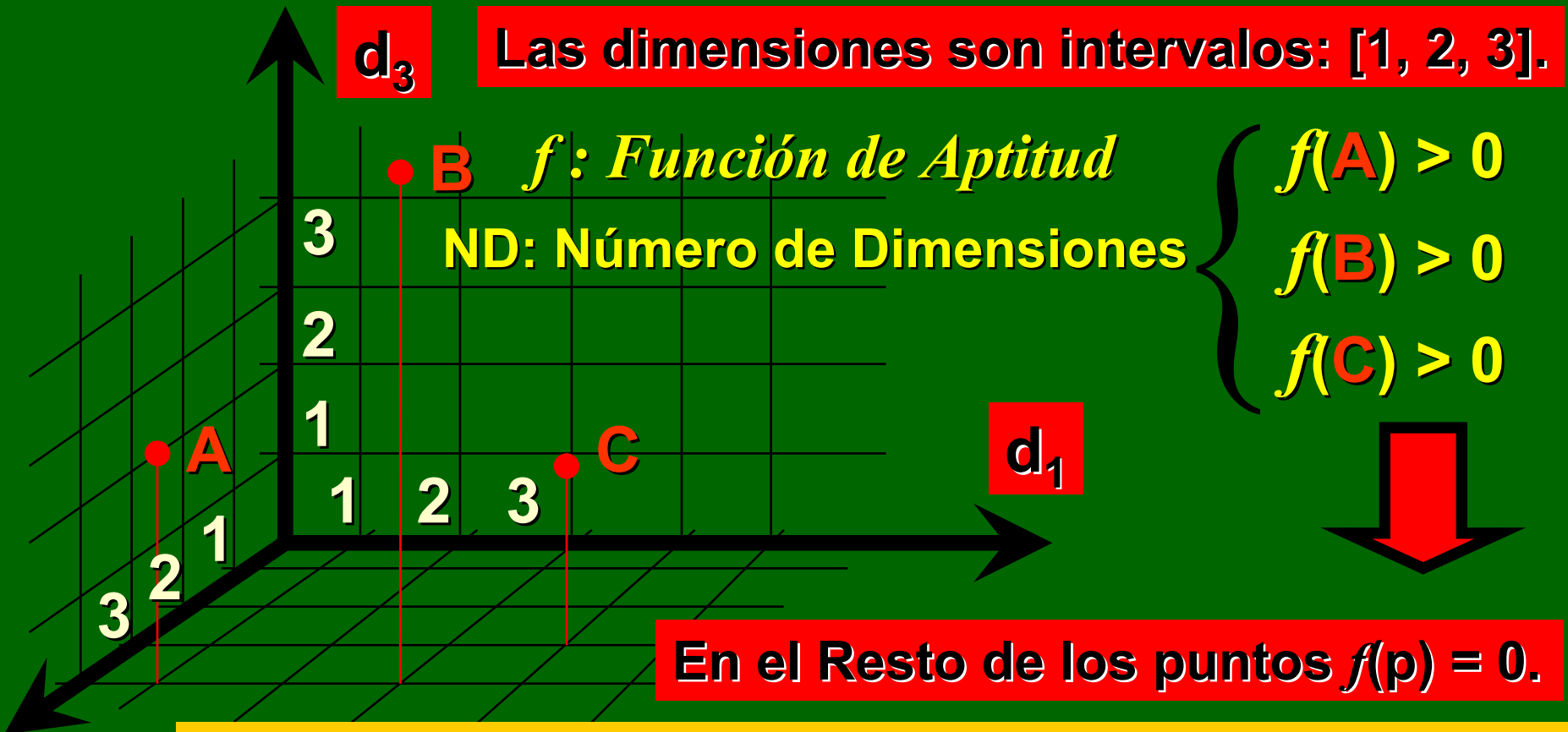
Si

$\begin{bmatrix} nCf \\ U_i \\ I^{[0]} \\ Perd \end{bmatrix} (*)$

$\begin{bmatrix} nCf \\ U_i \\ I^{[0]} \\ Perd \end{bmatrix} (k)$

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

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



**d<sub>2</sub>** *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*

$\mu_{ITS}$

1) *Relajación de la Función  $\mu(Utf)$ .*

$\Rightarrow \mu(Utf)^* = e^{-[\xi \times Nntft]}; \text{ con } 0 < \xi \leq 1$

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

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

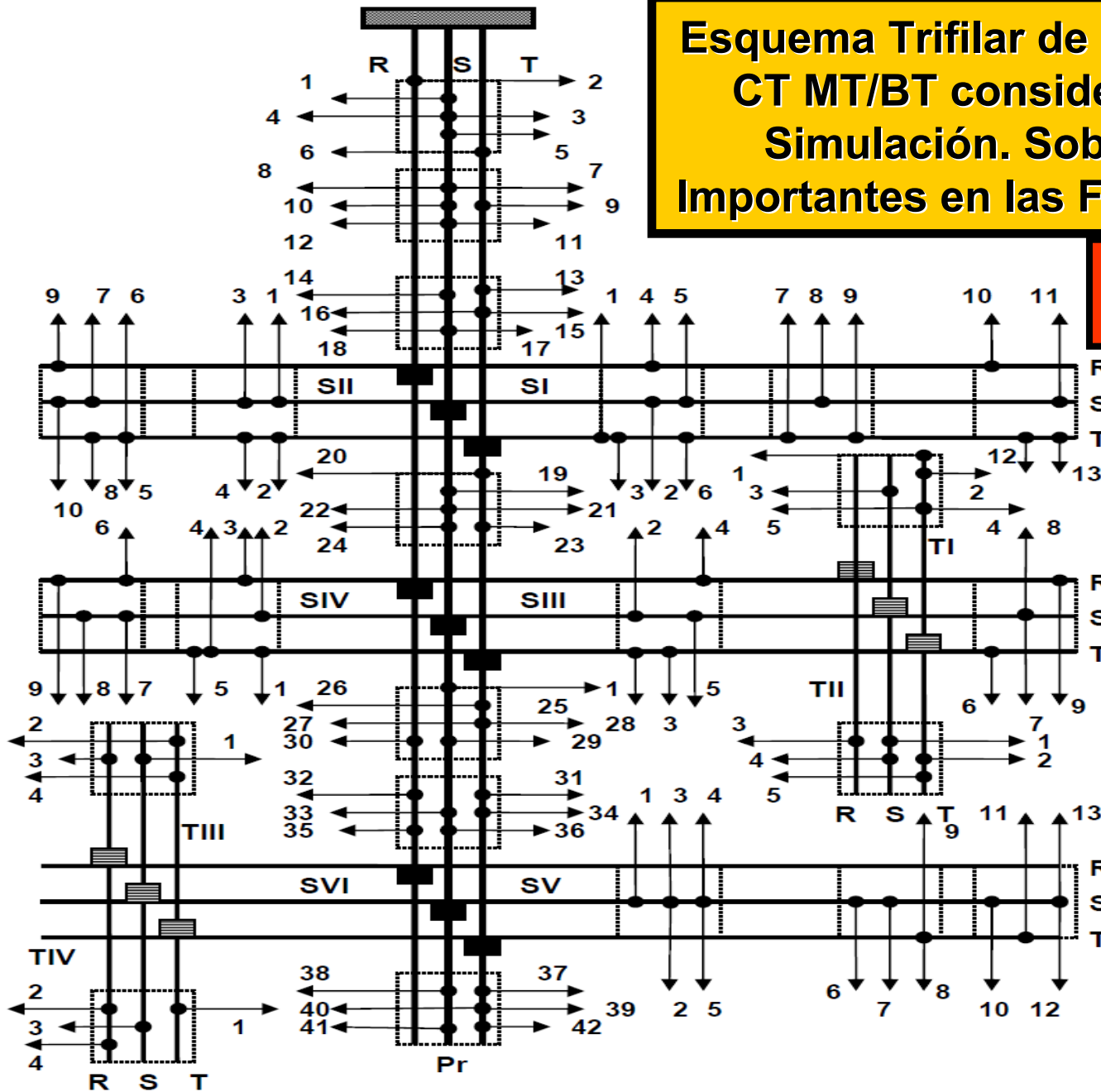
$\Rightarrow \mu(Utf) = \sqrt[nNT]{\prod_{nt=1}^{nNT} \mu_{nt}(vft)}$

***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]

$$ND = 3^{115}$$



# Resultados

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

| PSO MonoObjetivo | Nro Partículas | Tiempo de Ejecución | Perd[kW] | $ I^{[0]} [A]$ | $\mu(Uft)$ | ncf |
|------------------|----------------|---------------------|----------|----------------|------------|-----|
| Min Perd         | 150            | 45 [min]            | 6.94     | 18.93          | 0.32       | 81  |
| Min $ I^{[0]} $  | 150            | 37 [min]            | 10.16    | 0.1            | 0          | 79  |
| Max $\mu(Uft)$   | 150            | 43 [min]            | 7.02     | 13.80          | 0.34       | 85  |

| FPSO MultiObjetivo  | Nro Partículas | Tiempo de Ejecución | Perd[kW] | $ I^{[0]} [A]$ | $\mu(Uft)$ | ncf |
|---------------------|----------------|---------------------|----------|----------------|------------|-----|
| Max $t_{Peinstein}$ | 200            | 1 [h] 11 [min]      | 7.21     | 0.4            | 0.27       | 59  |

Exponentes y Referencias para las Funciones de Pertenencia:

$p\mu(perd) = p\mu(|I^{[0]}|) = p\mu(ncf) = 3$ ;  $p\mu(vft) = 4$

$[Minperd=6.94, Refperd=13.02]$ ;  $[MinCH=0.1, RefCH=47.6]$ ;  $[RefNCf_{Min}=45, RefNCf_{Max}=85]$

*Impacto en los  
Esquemas de  
Control Regulatorio*

# ***Impacto en los Esquemas de Control Regulatorio***

- I. Actualmente, se fijan límites de Tolerancia en Tensión, a nivel usuario, Índices de Confiabilidad del SDEE y se propende al Uso Racional de la Energía, pero desde el lado de la Demanda. No se incorporan, en los Controles Regulatorios, Diseños Óptimos MultiObjetivo en los SDEE BT.**
- II. Los Controles Regulatorios fijados sobre la calidad del Producto Técnico Tensión de Suministro, sobre la Calidad del Servicio Técnico (Continuidad del Suministro) y sobre el Uso Racional de la Energía, desde el lado de la Oferta (aspecto recientemente considerado), se verían favorecidos, de contar con estudios de este tipo en la planificación de Mediano/Corto Plazo del Sistema de Redes de Baja Tensión.**

# *Síntesis y Conclusiones*

# *Síntesis y Conclusiones*

*1. Plataforma Software: Windows XP; VB 6.0 + SP 5; C++ y MATLAB 6.5.*

*2. El Algoritmo FEPSO es General.*

⇒ *1. Ventajas del FPSO frente a otras Metaheurísticas (por caso, Algoritmos Genéticos y Recocido Simulado).*

⇒ *2. Ventajas en las Soluciones obtenidas con la t-Norma Producto de Einstein.*

⇒ *3. Ventajas Observables en el Bootstrap.*

*Fin*