

# OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE MEDIA TENSIÓN

## MODELOS BASADOS EN DINÁMICA POSIBILÍSTICA E HIPERHEURÍSTICA MULTIOBJETIVO

GUSTAVO SCHWEICKARDT – CARLOS CASANOVA  
CONICET – Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional - ARGENTINA  
*gustavoschweickardt@conicet.gov.ar – casanovac@frcu.utn.edu.ar*

Fechas recepción: Julio 2017 - Fecha aprobación: Noviembre 2017

### RESUMEN

El presente trabajo aborda el problema de Optimización de la Confiabilidad, conforme los indicadores establecidos regulatoriamente, en los Sistemas de Distribución Energía Eléctrica de Media Tensión (SDEE MT). A través de varios trabajos en esta línea de investigación, el enfoque del problema se centra en la ubicación óptima de equipos de seccionamiento/protección (sp), aspecto de mayor impacto en el diseño confiable. Desde la perspectiva clásica, se considera la ubicación de un único tipo de equipo (sp) en distintos tramos, tomando como objetivo la minimización de la Energía No Suministrada (ENS) ante fallas del SDEE MT. En primer término, el costo de la ENS es establecido regulatoriamente, lo cual implica una monetización carente de bases teórico/metodológicas sólidas. Se resuelve aplicando Programación Dinámica Clásica (PDC). Un enfoque más complejo, no fija externamente el costo de la ENS sino que le permite evolucionar dependiendo de la estructura datos-representación del SDEE MT. Se resuelve aplicando Programación Dinámica Posibilística (PDP) y al costo resultante de la ENS se lo refiere como Costo Intrínseco. Pero este método colapsa cuando se tienen distintos tipos de equipos sp. Por tal motivo, se propone como solución general, un Algoritmo HiperHeurístico, comparando los resultados obtenidos para el mismo SDEE MT.

**PALABRAS CLAVE:** Programación Dinámica Posibilística – Conjuntos Difusos - Optimización – Hiperheurísticas- Confiabilidad – Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica.

### ABSTRACT

The present work addresses the problem of Reliability Optimization, according to the established regulatory indicators, in the Electric Power Distribution Systems of Medium Voltage (EPDS MT). Through several works in this line of research, the problem is focused on the optimal location of sectionalizing/protection (sp) equipment, which has the greatest impact on reliable design. From the classical perspective, it is considered the location of a single type of equipment (sp) in different sections, aiming at the minimization

of Non Supplied Energy (NSE) consequence of failures in the EPDS MV. First, the cost of the NSE is regulated, which implies a lack of solid theoretical/methodological monetization method. It is solved by applying Classic Dynamic Programming (CDP). A more complex approach, does not externally fix the cost of ENS, but allows it to evolve depending on the data-representation structure of the EPDS MV. It is solved by applying Dynamic Possibilistic Dynamic Programming (PDP) and the resulting cost of the NSE is referred to as Intrinsic Cost. But this method collapses when there are different types of sp equipment. For this reason it is proposed, as a general solution, a HyperHeuristic Algorithm, comparing the results obtained for the same EPDS MV.

**KEYWORDS:** Possibilistic Dynamic Programming – Fuzzy Sets – Optimization - Hyperheuristic – Reliability - Electric Power Distribution Systems.

## 1 INTRODUCCIÓN

El diseño de los sistemas de protección en Redes de Distribución Eléctrica, se ha sustentado, históricamente, en exigencias operativas, formalizándose las soluciones en términos de la experiencia de los planificadores y ciertas formulaciones técnicas sostenidas como reglas de buena práctica (Gönen, 1986). En los últimos años, a partir de que la reforma eléctrica es aplicada al segmento de distribución, comienzan a exigirse desde los cuerpos regulatorios determinados Índices de Confiabilidad (referida, básicamente, a la continuidad del suministro) teóricamente fundados en la maximización del beneficio de los agentes que integran el sistema (monopolista-distribuidor y clientes). Desde este enfoque, el problema de diseño pasa a ser de naturaleza económica. Al conferirle esta dimensión, en el contexto de maximización establecido, se entiende que los costos económicos de la confiabilidad deben ser mínimos.

Como se mencionó en el resumen, adoptando la ubicación óptima de equipos de seccionamiento/protección (de aquí en lo sucesivo, referidos como equipos sp) y, en particular, la ubicación de un único tipo de equipo sp por tramo (si procede) del SDEE MT considerado, se tienen dos enfoques del problema, en orden de complejidad, cuyo modelo y solución resultan diferentes. El más simple, supone que el costo de la Energía No Suministrada (en lo sucesivo, referida como ENS) ante una Contingencia el SDEE MT, está fijado regulatoriamente (valor externo). Siguiendo el desarrollo presentado en (Schweickardt y Pistonesi, 2010), la solución para la Ubicación Óptima de los equipos sp, puede lograrse mediante Programación Dinámica Clásica (MonoObjetivo). Este enfoque es de escaso interés en este contexto, primero por la falta de fundamento teórico/metodológico en la monetización de la ENS, señalada en el artículo referido, y segundo porque limita la solución a considerar un único tipo de equipo sp. En un orden mayor de complejidad, con un enfoque más realista, son considerados los Índices de Confiabilidad establecidos normativamente por el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (*Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE*), entre

ellos la ENS (IEEE, 2003). Adicionalmente, el costo de la ENS no es fijado externamente, sino que depende de la estructura datos-representación del sistema (lo mismo puede decirse del resto de los Índices de Confiabilidad considerados). Tal costo evoluciona con la ubicación de un mayor número de equipos sp, hasta arribar a la solución óptima (en rigor, más satisfactoria), constituyendo un resultado del Modelo. Por tal razón, es referido como Costo Intrínseco de la ENS. Su solución requiere de la aplicación de Programación Dinámica Posibilística (PDP) MultiObjetivo, la cual es una variante de la Programación Dinámica Difusa, en la cual los Conjuntos Difusos solidarios a cada criterio de optimización (en este caso, los Índices de Confiabilidad considerados y el Costo de los equipos sp) son Números Difusos. Un Número Difuso es un Conjunto Difuso Normal y Convexo, y se corresponde con una Distribución de Posibilidades. Desde allí la designación PDP.

Si bien este segundo enfoque mejora notablemente los resultados respecto de primero, a la vez que confiere una fundamentación metodológica al costo de la ENS, no resuelve el problema de la ubicación óptima de distintos tipos de equipos sp para maximizar la confiabilidad de un SDEE MT.

Desde este punto, surge la propuesta de introducir un Algoritmo HiperHeurístico que resuelva este problema, preservando las mejoras aportadas por el Costo Intrínseco de la ENS, y permitiendo ubicar tipos diferentes de equipos sp.

El trabajo está organizado como sigue: En la **SECCIÓN 2**, se presenta el Modelo PDP y los Índices de Confiabilidad considerados en la Simulación sobre un Sistema Real. En la **SECCIÓN 3**, se desarrolla la aplicación del Modelo HiperHeurístico propuesto para la ubicación de un único equipo sp, a efectos de comparar los resultados obtenidos respecto del Modelo PDP. En la **SECCIÓN 4**, se presenta el Modelo HiperHeurístico para la ubicación óptima de más de un tipo de equipo sp (para la Simulación presentada, tres tipos). Finalmente, en las **SECCIÓN 5**, se presenta la Simulación y se discuten los resultados obtenidos, para luego, en la **SECCIÓN 6**, sintetizar las conclusiones más importantes del presente trabajo.

## **2 OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIABILIDAD EN SDEE MT MEDIANTE UN MODELO BASADO EN PDP**

### **2.1 Índices de Confiabilidad**

A los efectos de integrar el objetivo confiabilidad como criterio de decisión a optimizar, se supone que la misma ha sido valorizada en términos de un costo económico. Es decir, los usuarios/clientes han conferido directa o indirectamente un valor a la continuidad del servicio eléctrico. En tal contexto, toma sentido la medición del nivel de confiabilidad. Más allá de la discusión sobre si los valores utilizados en distintos esquemas regulatorios, constituyen o no un costo social de oportunidad, existen diversos índices. El problema estriba en determinar si los valores de referencia resultan aceptables para considerar, mediante su indicación, un sistema como confiable.

Desde un primer enfoque, pueden distinguirse aquellos índices que

sólo miden la frecuencia de las interrupciones, de los que sólo miden su duración. Adicionalmente, existen propuestas de definición de índices combinados (frecuencia y duración de la interrupción), si bien su empleo es reducido. Por otro lado, tales indicadores pueden estar orientados al sistema en forma general, es decir valores promedios sobre la base de todos los clientes, o bien focalizarse en los clientes (tipificados o individualmente considerados) o en cierta apartamentación eléctrica, lo cual significa definir índices de confiabilidad con respecto a un conjunto específico de clientes o respecto de ciertos equipos. Se requiere, entonces, de una clasificación de índices de confiabilidad y, a efectos del modelo de optimización, la más relevante será según los datos primarios utilizados para su construcción. Se tienen así (IEEE, 2003), considerando sólo los índices utilizados en este trabajo (SAIFI, SAIDI, MAIFI y la ENS):

A) Índices basados en el Número de Clientes:

A.1) Índice de Frecuencia de Interrupciones Promedio del Sistema, SAIFI (por su sigla en inglés: *System Average Interruption Frequency Index*), representa el promedio de interrupciones de un cliente del sistema:

$$SAIFI = \frac{\text{Número Total de Interrupciones a Clientes}}{\text{Número Total de Clientes}} \quad (1)$$

A.2) Índice de Duración de las Interrupciones Promedio del Sistema, SAIDI (por su sigla en inglés: *System Average Interruption Duration Index*):

$$SAIDI = \frac{\sum \text{Duración de las Interrupciones a Clientes}}{\text{Número Total de Clientes}} \quad (2)$$

A.3) Índice de Frecuencias de Interrupciones Transitorias Promedio, MAIFI, (por su sigla en inglés: *Momentary Average Interruption Frequency Index*):

$$MAIFI = \frac{\text{Número Total de Interrupciones Transitorias a los Clientes}}{\text{Número Total de Clientes}} \quad (3)$$

B) Índices basados en la Energía: es empleado un único indicador para esta clasificación, denominado Energía No Suministrada (Anual y Esperada). Se define como:

$$ENS = \sum_{i=1}^{nN} P_i \times t_i \quad (4)$$

Como este valor es desconocido (esperado) su cálculo requiere una estimación. Conforme el método empleado en tal estimación, los valores resultantes para este indicador pueden diferir. De modo que, conjuntamente con el valor del índice, debe ser especificada con claridad la metodología empleada en el cálculo.  $P_i$  representa la potencia en el nodo  $i$ -ésimo del sistema con  $nN$  nodos, [kVA], que ha sido interrumpida por un tiempo  $t_i$ , [h]. Este valor puede (por cálculo) resultar referido a otro período (por ejemplo

semestral); luego, debe ser anualizado.

## 2.2 Ubicación de Equipos de Seccionamiento y Protección en un Alimentador Ideal mediante la Minimización de la ENS

Considérese un *alimentador ideal*, representado en la FIGURA 1 A), salida de una subestación transformadora en el subsistema de Media Tensión, y en el cual se procura instalar un equipo de seccionamiento/protección (sp). Exhibe las siguientes características: **a)** una Distribución Uniforme de Cargas a lo largo de su longitud,  $p$ ; **b)** una Tasa de Falla,  $\lambda$ , Uniforme por unidad de longitud y **c)** un Tiempo Medio de Reparación de Falla,  $t_r$ , constante. Adicionalmente, se supondrá: 1) que el tiempo que requiere el equipo para accionar o ser accionado, Tiempo de Maniobra, es conocido e igual a  $t_m$  y 2) que en la salida del alimentador se encuentra instalado un equipo sp.

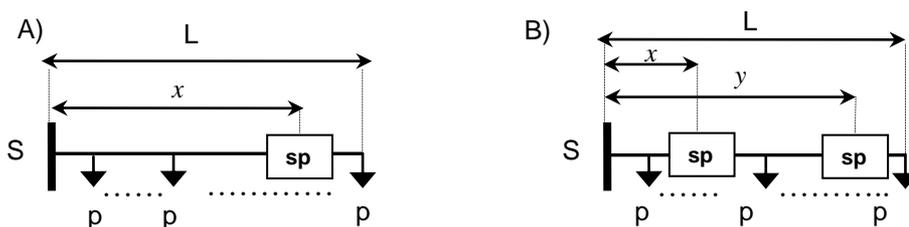


FIGURA 1: Alimentador Radial Ideal con carga  $p$  uniformemente distribuida y tasa de falla constante por unidad de longitud. A) Ubicación de 1 equipo sp y B) Ubicación de 2 equipos sp

El criterio utilizado para determinar la mejor ubicación del equipo en cuestión se basa en el valor de la ENS. En forma general, la ENS esperada en un período determinado lo da la siguiente expresión (un espacio entre variables y el símbolo  $\times$  se consideran indistintamente como multiplicación):

$$ENS = \lambda t_r P l \quad (5)$$

siendo  $P$  la Potencia Media interrumpida o desconectada en [MW] y  $l$  la longitud del tramo interrumpido en [km];  $\lambda$  se expresa en [fallas/km año] y  $t_r$  se expresa en [h], de modo que ENS se expresará en [MWh/año].

Para la FIGURA 1 A), valdrá la expresión, con  $p$  en [MWh/km]:

$$ENS = [\lambda x t_r p L] + [\lambda (L - x) t_m p L] + [\lambda (L - x) t_r p (L - x)] \quad (6)$$

donde: el *primer corchete*, representa la ENS debido a fallas ocurridas entre la salida del alimentador y el equipo sp, y que afectan sólo a los usuarios en dicho tramo hasta que la falla se repare,  $t_r$ ; el *segundo corchete* representa la ENS por fallas ocurridas *aguas abajo* de sp, que afectan a todos los usuarios, hasta que transcurra  $t_m$  y se aisle el tramo correspondiente por accionamiento de sp; y el *tercer corchete* representa la ENS que afecta a los usuarios *aguas abajo* de sp, hasta la reparación de la falla, en  $t_r$ .  $x$  es la

distancia, desde el nodo de salida, donde se ubica  $sp$  y  $L$  es la longitud total del alimentador ideal, tal como se observa en la FIGURA 1 A .

Si se deriva  $ENS(x)$  y se iguala a cero (condición de primer orden para existencia de extremo, *mínimo*, dado el problema):

$$\frac{dENS}{dx} = 0 \Rightarrow x = \left[ \frac{1}{2} + \frac{t_m}{2 \times t_r} \right] \times L \quad (7)$$

y considerando que:  $t_m \ll t_r$ , puede concluirse en que:  $x = L/2$  (8)

En el caso de la FIGURA 1 B), para el mismo alimentador ideal, se pretenden ubicar 2  $sp$ , de modo que se minimice la ENS.

$$ENS = [\lambda x t_r p L] + [\lambda(y - x) t_m p L] + [\lambda (y - x) t_r p (L - x)] + [\lambda (L - y) t_m p L] + [\lambda (L - y) t_r p (L - x)] \quad (9)$$

Cada corchete se interpreta de un modo completamente análogo a como se hizo en la expresión (6). Luego, derivando  $ENS(x, y)$  respecto de cada una de sus variables,  $x$  e  $y$ , e igualando a cero, se tienen las expresiones:

$$x = \left[ \frac{1}{3} + \frac{2 \times t_m}{3 \times t_r} \right] \times L \cong \frac{1}{3} \times L \quad e \quad y = \left[ \frac{2}{3} + \frac{1 \times t_m}{3 \times t_r} \right] \times L \cong \frac{2}{3} \times L \quad (10)$$

### 2.3 Caracterización Real del Problema de Ubicación Óptima de Equipos de Seccionamiento y Protección en un Alimentador

El problema de ubicación de equipos  $sp$  en sistemas reales, se aleja considerablemente de las hipótesis formuladas en la sección anterior. De modo que las ecuaciones (6) y (10), pierden validez, aún para un único alimentador, sin derivaciones. En general, en un alimentador radial real las cargas se concentran en nodos y tienen valores muy diferentes; la topología del alimentador exhibe tramos con distintos entornos, que modifican el valor de la tasa de fallas; la condición  $t_m \ll t_r$  no necesariamente se cumple y, si se trata de redes aéreas, los tiempos de reparación, pueden ser diferentes según las características geográficas y climáticas de la zona.

Desde tales consideraciones, la caracterización del problema de ubicación óptima de equipos  $sp$  se puede presentar en los siguientes términos: **a)** Es MultiObjetivo y restricto, dominado por un conjunto de incertidumbres, muchas de las cuales no son de naturaleza estocástica (por caso: demanda, precio de la energía, costos, disponibilidad/tecnología de equipos, y fundamentalmente, incertidumbres de valor sobre los objetivos y los límites fijados a las restricciones); **b)** Requiere de una optimización combinatoria, cuya funciones objetivos no son lineales y no son derivables, motivo por el cual, los métodos tradicionales de optimización no proporcionan buenos resultados. En relación con el primer aspecto enunciado en el ítem **b)**, el número de estados, NEEb, del Espacio de Búsqueda, cuando se trata de ubicar óptimamente un conjunto de  $nsp$  equipos de seccionamiento/protección

en un alimentador radial, con N tramos o secciones y  $n_{sp} \leq N$ , resulta:

$$NEEb = \sum_{s=1}^{n_{sp}} \binom{N}{s} = \sum_{s=1}^{n_{sp}} \frac{N!}{s! \times (N-s)!} \quad (11)$$

(11) se explica como sigue: las formas de ubicar  $s = 1$  equipo  $sp$ , resultan de las combinaciones simples de N tramos tomados de a 1. Las formas ubicar  $s = 2$  equipos  $sp$ , resultan de las combinaciones simples de N tramos tomados de a 2. Y así siguiendo hasta ubicar  $s = n_{sp}$  equipos. A priori se desconoce si la solución óptima del problema requiere de la ubicación de  $s = 1$  o todos los equipos,  $s = n_{sp}$ . Así, NEEb resulta de la suma de todas las combinaciones. Por ejemplo, en un alimentador con  $N = 100$  tramos, en los que se quiere ubicar hasta  $n_{sp} = 4$  equipos  $sp$ , se tendrá que el número de soluciones posibles, NEEb, resulta:  $100 + 4950 + 161700 + 3921225 = 4087976$ .

## 2.4 El Modelo PDP

Considerando las características reales de un alimentador MT radial y la confiabilidad del sistema, mediante los Índices definidos en el epígrafe 2.1, el problema de la ubicación de equipos  $sp$ , tiene como objetivo la minimización de todos los costos anuales [\$/año]: siendo CENS el costo anual de la ENS,  $\Sigma CA_{EqSP}$  la suma de los costos anuales correspondientes a la inversión en equipos  $sp$ , y  $\Sigma CA_{OyM}$  la suma de los costos anuales correspondientes a la Operación y Mantenimiento, sujeto a restricciones operativas y de confiabilidad. Su formulación clásica es la siguiente:

$$\text{Min } \{ \text{CENS} + \Sigma CA_{EqSP} + \Sigma C_{OyM} \} \quad (12)$$

Sujeto a:

1.- [Restricciones de Confiabilidad], donde  $SAIFI_{LIM}$ ,  $SAIDI_{LIM}$  y  $MAIFI_{LIM}$  son los valores límites aceptables para cada Índice, respectivamente:

$$SAIFI \leq SAIFI_{LIM} \quad (13)$$

$$SAIDI \leq SAIDI_{LIM} \quad (14)$$

$$MAIFI \leq MAIFI_{LIM} \quad (15)$$

2.- [Restricciones Operativas de Límites en Intensidades y Tensiones]

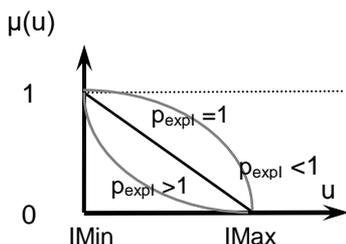
En este trabajo el grupo 2.- de restricciones se supone satisfecho. Los valores límites de los Índices de Confiabilidad, son definidos por la autoridad regulatoria.

Es frecuente observar una modelación alternativa, cuando no se dispone del costo imputable a la ENS. Para ello se elimina el término CENS en la función objetivo y se incorpora, en el grupo 1.- una restricción de la forma  $ENS \leq ENS_{LIM}$ .

En cualquiera de estos dos modelos, existe el problema de la valoración monetaria, en caso de la ENS, y técnico/económica (límites aceptables) en el resto de los índices. Con el objeto de resolver este

problema, en primer lugar los Índices de Confiabilidad del modelo (13)-(15), al igual que la ENS, se flexibilizan. Para ello se emplean Conjuntos Difusos (Números Difusos) cuya función de pertenencia mide el grado de satisfacción/aceptación de sus valores.

Para los Índices de Confiabilidad empleados, se supone: **a)** La existencia, como se dijo, de valores límites fijados por regulación, por debajo de los cuales no se aplica penalización alguna. Entonces se adopta como índice de mayor satisfacción, el valor resultante de decrementar el límite impuesto,  $I_{Lim}$ , un porcentaje  $pl\%$  (cualquier valor mayor que el establecido, tendrá aceptación máxima también):  $I_{MIN} = I_{Lim} \times (1-pl\%/100)$ ; **b)** Se adopta como índice de menor satisfacción, cierto valor  $I_{MAX}$ , que surge de simular su cálculo sin instalar ningún equipo sp en el alimentador (excepto el ubicado en la salida de la subestación); **c)** Se construye un Conjunto Difuso cuya función de pertenencia es lineal, a partir de estos dos valores extremos ( $I_{MIN}$  e  $I_{MAX}$ ); **d)** Se establece una escala de preferencias entre todos los índices de confiabilidad (incluido ENS), que arroja ponderadores exponenciales de los conjuntos difusos (Yager, 1977). Estos ponderadores,  $p_{expl}$ , afectan al conjunto contrayéndolo, si  $p_{expl} > 1$  o dilatándolo, si  $p_{expl} < 1$ . La *contracción* aumenta la importancia del índice de confiabilidad afectado, mientras que la *dilatación* la disminuye. Si se refiere como  $u$  la variable genérica para cualquiera de estos Conjuntos Difusos, siendo  $\mu(u)$  su función de pertenencia, el efecto de tales ponderadores se observa en la FIGURA 2.



**FIGURA 2: Conjunto Difuso con Función de Pertenencia Lineal modificada por Ponderación Exponencial. Contracción ( $p_{expl} > 1$ ) - Dilatación ( $p_{expl} < 1$ )**

Bajo estas consideraciones, se tendrá, considerando valores anuales:

Sea IC cualquiera de los índices considerados para la Simulación del SDEE MT real (SAIFI, SAIDI y MAIFI):

$$\mu(IC) = 1; \text{ si } IC < IC_{MIN} \tag{16}$$

$$\mu(IC) = \left[ \frac{IC_{MAX} - IC}{IC_{MAX} - IC_{MIN}} \right]^{p(IC)} ; \text{ si } IC_{MIN} \leq IC \leq IC_{MAX} \tag{17}$$

$$\mu(IC) = 0; \text{ si } IC > IC_{MAX} \tag{18}$$

Para definir el Conjunto Difuso solidario a la ENS, se procede también a una construcción lineal de su función de pertenencia, ponderada exponencialmente; sus valores máximo y mínimo de satisfacción son obtenidos como sigue: **a)**  $ENS_{MAX}$  resulta de calcular la ENS en las mismas condiciones que las fijadas para SAIFI, SAIDI y MAIFI; **b)**  $ENS_{MIN}$  resulta de calcular la ENS en una condición tal que todos los tramos del alimentador tengan instalados un equipo de sp no redundante. Imponer un valor cero como  $ENS_{MIN}$  no tiene correlato razonable en el costo de inversión requerido. Luego, se tiene:

$$\mu(ENS) = 1; \text{ si } ENS < ENS_{MIN} \quad (19)$$

$$\mu(ENS) = \left[ \frac{ENS_{MAX} - ENS}{ENS_{MAX} - ENS_{MIN}} \right]^{P(ENS)} ; \text{ si } ENS_{MIN} \leq ENS \leq ENS_{MAX} \quad (20)$$

$$\mu(ENS) = 0; \text{ si } ENS > ENS_{MAX} \quad (21)$$

Para definir el Conjunto Difuso solidario al Costo Anual de Inversión en Equipamientos sp, incluyendo el de Operación y Mantenimiento como un porcentaje del primero, se procede del siguiente modo: **a)** Se tiene un  $CA_{EqSPMIN}$  correspondiente a la situación en que se determina  $ENS_{MAX}$ ; **b)** Se tiene un  $CA_{EqSPMAX}$  correspondiente a la situación en que se determina  $ENS_{MIN}$ ; entonces:

$$\mu(CA_{EqSP}) = 1; \text{ si } CA_{EqSP} = CA_{EqSPMIN} \quad (22)$$

$$\mu(CA_{EqSP}) = \left[ \frac{CA_{EqSPMAX} - CA_{EqSP}}{CA_{EqSPMAX} - CA_{EqSPMIN}} \right]^{P(CA_{EqSP})} ; \text{ si } CA_{EqSPMIN} \leq CA_{EqSP} \leq CA_{EqSPMAX} \quad (23)$$

$$\mu(CA_{EqSP}) = 0; \text{ si } CA_{EqSP} > CA_{EqSPMAX} \quad (24)$$

Definidas las funciones de pertenencia, debe establecerse el valor de la función difusa de satisfacción para cierta alternativa de ubicación de un equipo sp. Ello requiere de un operador de confluencia, <C>, entre los Conjuntos Difusos, a efectos de obtener la *decisión maximizante estática* (Bellman y Zadeh, 1970). Esto es:

$$\mu_D = \mu(SAIFI) <C> \mu(SAIDI) <C> \mu(MAIFI) <C> \mu(ENS) <C> \mu(CA_{EqSP}) \quad (25)$$

Evolucionando mediante una PDP *hacia adelante*, tal como se explica en (Schweickardt y Pistonesi, 2010), se obtiene la ubicación óptima de los equipos sp en el SDEE considerado, resultando una *decisión maximizante dinámica*. El operador de confluencia, <C>, seleccionado es la t-norma Producto de Einstein. Se define del siguiente modo:  $t_{PE}: (x,y) \rightarrow$

$$\frac{x \times y}{2 - (x + y - x \times y)} \quad (26)$$

donde x e y son funciones de pertenencia genéricas. Para el Modelo propuesto, el cálculo del Producto de Einstein resulta de los siguientes pasos:

$$t_{PE}^1(\text{SAIFI}, \text{SAIDI}) = \frac{\mu(\text{SAIFI}) \times \mu(\text{SAIDI})}{2 - (\mu(\text{SAIFI}) + \mu(\text{SAIDI}) - \mu(\text{SAIFI}) \times \mu(\text{SAIDI}))} \quad (27)$$

$$t_{PE}^2(\text{SAIFI}, \text{SAIDI}, \text{MAIFI}) = \frac{\mu(\text{MAIFI}) \times t_{PE}^1}{2 - (\mu(\text{MAIFI}) + t_{PE}^1 - \mu(\text{SAIFI}) \times t_{PE}^1)} \quad (28)$$

$$t_{PE}(\text{SAIFI}, \text{SAIDI}, \text{MAIFI}, \text{ENS}, \text{CA}_{EqSP}) = \mu_D = \frac{\mu(\text{CA}_{EqSP}) \times \mu(\text{ENS}) \times t_{PE}^2}{\left\{ \begin{array}{l} 2 \times [2 - (\mu(\text{CA}_{EqSP}) + t_{PE}^2 - \mu(\text{CA}_{EqSP}) \times t_{PE}^2)] - \\ \mu(\text{ENS}) \times [2 - (\mu(\text{CA}_{EqSP}) + t_{PE}^2 - \mu(\text{CA}_{EqSP}) \times t_{PE}^2)] - \\ \mu(\text{CA}_{EqSP}) \times t_{PE}^2 + \mu(\text{ENS}) \times \mu(\text{CA}_{EqSP}) \times t_{PE}^2 \end{array} \right\}} \quad (29)$$

y desde aquí se obtiene, para la *decisión maximizante dinámica*,  $\mu_D^*$ , resultado de la PDP:

$$\mu(\text{CA}_{EqSP}) = \frac{\mu_D^* \times \mu(\text{ENS}) \times (2 - t_{PE}^2) + 2 \times \mu_D^* \times t_{PE}^2 - 4 \times \mu_D^*}{[\mu_D^* \times t_{PE}^2 + \mu(\text{ENS}) \times (\mu_D^* - t_{PE}^2) - 2 \times \mu_D^*]} \quad (30)$$

Entonces puede obtenerse el Costo Intrínseco de la ENS, como sigue: se intenta encontrar, bajo la hipótesis  $\mu_D = \mu_D^*$ , una expresión que relacione los cambios diferenciales en el  $\text{CA}_{EqSP}$  cuando se producen cambios diferenciales en la ENS. La expresión (30) puede formularse como:

$\mu(\text{CA}_{EqSP}) = f(\mu(\text{ENS}))$ ; de modo que, despejando  $\text{CA}_{EqSP}$ , resulta:

$$\text{CA}_{EqSP} = \mu_{CA_{EqSP}}^{-1}(f(\mu(\text{ENS}))) \quad (31)$$

por lo que:

$$\frac{d\text{CA}_{EqSP}}{d\text{ENS}} = \left( \frac{d\mu_{CA_{EqSP}}^{-1}}{df} \right) \times \left( \frac{\partial f}{\partial \mu_{ENS}} \right) \times \left( \frac{d\mu(\text{ENS})}{d\text{ENS}} \right) \quad (32)$$

Desde (29) se tiene:

$$\frac{\partial f}{\partial \mu_{ENS}} = \frac{\left\{ \left[ \mu_D^* \times (2 - t_{PE}^2) \right] \times \left[ \mu_D^* \times t_{PE}^2 + \mu(ENS) \times (\mu_D^* - t_{PE}^2) - 2 \times \mu_D^* \right] - \left[ (\mu_D^* - t_{PE}^2) \times \left[ \mu_D^* \times \mu(ENS) \times (2 - t_{PE}^2) + 2 \times \mu_D^* \times t_{PE}^2 - 4 \times \mu_D^* \right] \right\}}{\left[ \mu_D^* \times t_{PE}^2 + \mu(ENS) \times (\mu_D^* - t_{PE}^2) - 2 \times \mu_D^* \right]^2} \quad (33)$$

Finalmente, derivando según (32) y considerando (33), se tiene:

$$\frac{dCA_{EqSP}}{dENS} = \left( \frac{\partial f}{\partial \mu_{ENS}} \right) \times \left( \frac{P_{(CENS)}}{P_{(CA_{EqSP})}} \right) \times \left( \frac{CA_{EqSPMAX} - CA_{EqSPMIN}}{ENS_{MAX} - ENS_{MIN}} \right) \times \mu(CA_{EqSP}) \left( \frac{1 - P_{(CA_{EqSP})}}{P_{(CA_{EqSP})}} \right) \times \mu(ENS) \left( \frac{P_{(CENS)} - 1}{P_{(CENS)}} \right) \quad (34)$$

La expresión (34) resulta negativa, porque  $\frac{\partial f}{\partial \mu_{ENS}}$  lo será. Tiene la forma de un Costo Marginal de la ENS. Puede interpretarse, por analogía, como el incremento de costo de la última unidad de calidad producida  $\equiv$  no calidad no producida. Si se adopta la no calidad no producida como referencia, entonces cambia de signo, definiéndose positivo. Por otro lado, este costo no es fijado externamente de manera directa, sino que dependerá de la estructura datos-representación del modelo propuesto. Se lo designa como Costo Intrínseco de la Energía No Suministrada, y su expresión será:

$$CI_{ENS}^u = \left| \frac{dCA_{EqSP}}{dENS} \right| \quad (35)$$

### 3 MODELO HIPERHEURÍSTICO PARA LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE UN ÚNICO TIPO DE EQUIPO SP

El Modelo HiperHeurístico propuesto, es el desarrollado por los autores en (Schweickardt, Casanova y Gimenez, 2013). Pueden consultarse allí los detalles, de modo que serán presentadas aquí, brevemente, sus generalidades y aspectos orientados a la solución del problema.

A diferencia de una MetaHeurística, cuyo dominio es el Espacio de Soluciones del problema (a optimizar), la HiperHeurística tiene como dominio un Espacio o Conjunto de MetaHeurísticas. A través de su Función de Selección, determina cuál MetaHeurística de su dominio es la más adecuada para aplicar, en cierta instancia de decisión del problema, sobre el Espacio de Soluciones, evaluando su Función de Aptitud y la manera en que están siendo satisfechos los 5 Principios de Inteligencia de Grupo: Proximidad, Calidad, Diversidad de Respuesta, Estabilidad y Adaptación. De manera que la Función de Selección es a la HiperHeurística, lo que la Función de Aptitud es a la MetaHeurística, operando en cierta instancia de decisión del problema.

El Modelo HiperHeurístico desarrollado, es MultiObjetivo (porque lo son las MetaHeurísticas que integran su dominio), y del tipo Basado en Razonamiento, pues su Función de Selección está implementada mediante una Red Neuronal de Retropropagación Simple. Las MetaHeurísticas que componen su dominio son formas de la MetaHeurística PSO Canónica, denominadas X-PSO Formas MultiObjetivo o X-FPSO (debido a que la extensión de cada una de ellas, concebidas originalmente como estrategias MonoObjetivo, al dominio MultiObjetivo, se realiza asociando a cada Objetivo-R restricción un Conjunto Difuso –por ello el uso de la letra “F”, *Fuzzy*, antepuesta al acrónimo PSO-). Por estas razones el Modelo HiperHeurístico recibe, en el trabajo citado, el nombre HY X-FPSO CBR (CBR: *Case Based Reasoning*). La Función de Selección se implementa según los Indicadores de Inteligencia de Grupo desarrollados en (Casanova y Schweickardt, 2016).

Las Formas X-FPSO que componen el dominio del Modelo HiperHeurístico, son:

1) FPSO con Decaimiento Inercial, 2) FPSO con Factor de Constricción, 3) FEPSO -Evolutionary Particle Swarm Optimization-, y 4) FEPSO GISTT -*Global Individual Stochastic/Topology*-, introducida y desarrollada en (Schweickardt y Casanova, 2015).

La Función de Aptitud para las Formas X-FPSO, se obtiene desde la t-norma Producto de Einstein, aplicada sobre las Funciones de Pertenencia de cada Conjunto Difuso asociado a cada Objetivo y/o Restricción. En este caso, se tendrán las Funciones de Pertenencia:  $\mu(CA_{EqSP})$ ,  $\mu(SAIFI)$ ,  $\mu(SAIDI)$ ,  $\mu(MAIFI)$  y  $\mu(ENS)$ . Luego, la Función de Aptitud resultará  $t_{PE}\{\mu(CA_{EqSP}), \mu(SAIFI), \mu(SAIDI), \mu(MAIFI) \text{ y } \mu(ENS)\}$ , y el objetivo en cada iteración del Algoritmo para el Modelo HiperHeurístico, será Maximizar  $t_{PE}$ .

La variable de decisión para las Formas X-FPSO será discreta, adoptando 2 valores: 0 (no se ubica ningún sp), 1 (se ubica un sp, del único tipo considerado –Seccionador-). De manera que si  $nT$  es el número de tramos del SDEE MT, el número de estados que componen el NEEb, estará dado por las variaciones con repetición de 2 elementos tomados de  $nT$  (pues en la HiperHeurística se considera la el conjunto de sp, con  $nsp = nT$ ):

$$NEEb = 2^{nT} \tag{36}$$

Esta expresión conduce al mismo resultado que (11) al considerar que  $nsp = nT$ . En efecto, por el Teorema del Binomio de Newton:

$$(x+y)^{nT} = \sum_{s=1}^{nsp=nT} \frac{nT!}{s! \times (nT-s)!} \times x^{(nT-s)} \times y^s \tag{37}$$

Haciendo  $x = y = 1$ , se obtiene la suma de los coeficientes binomiales o números combinatorios dichos:

$$NEEb = 2^{nT} = \sum_{s=1}^{nsp=nT} \frac{nT!}{s! \times (nT-s)!} \tag{38}$$

La implementación del Algoritmo para el Modelo HiperHeurístico, se realizó bajo Computación Paralela, como se explica en (Schweickardt y Casanova, 2015). La construcción de los Conjuntos Difusos y la forma de cálculo para el Costo Intrínseco de la ENS, sigue los mismos pasos que los propuestos en la **SECCIÓN 2**, correspondientes al Modelo PDP.

En la TABLA 1, **SECCIÓN 5**, resultado de las Simulaciones realizadas, pueden compararse los resultados aplicando el Modelo PDP y el Modelo HiperHeurístico propuesto, para el mismo SDEE MT real.

#### 4 MODELO HIPERHEURÍSTICO PARA LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE VARIOS TIPOS DE EQUIPOS SP

Como se dijo, no es posible resolver mediante el Modelo PDP, el Problema de la Optimización de la Confiabilidad en SDEE MT, ubicando óptimamente más de un tipo de equipamiento sp, tal y como se observa en los sistemas reales. Sin embargo, mediante la HiperHeurística propuesta, este problema puede resolverse, a la vez que, por su Modelación Difusa MultiObjetivo, se preserva el indicador más importante de la optimización: el Costo Intrínseco de la ENS. Además, mediante los mismos desarrollos presentados en la **SECCIÓN 2**, epígrafe **2.4**, pueden determinarse Costos Intrínsecos para cualquier Indicador de Confiabilidad considerado.

En este caso, la HiperHeurística empleada es idéntica a la propuesta en la **SECCIÓN 3** (mismo dominio de MetaHeurísticas X-FPSO y misma Función de Selección –Red Neuronal de Retropropagación Simple-). La diferencia estriba en dos aspectos: a) Los tiempos de restauración en cada forma de ubicación de alguno de los tipos de equipos sp considerados y b) El número de estados del Espacio de Búsqueda NEEb.

Ambos dependen del número de tipos de equipos considerados en el problema. Se analizan cada uno seguidamente:

##### a) Efecto de la Ubicación de Equipos en Distintos Tramos de una Red:

Los parámetros requeridos para la solución del problema y la evaluación del efecto generado al ubicar distintos tipos de equipos SP, son los siguientes:

$\lambda_j$ : tasa de falla por año y por kilómetro del tramo j [falla/km año].

$C_i$ : costo del equipo i [\$].

$nvu_i$ : vida útil del equipo i [año].

$rd$ : tasa de descuento. Con  $nvu_i$  y  $rd$ , se calcula el Factor de Recuperación de Capital del equipo,  $Frc_i$ . Luego el Costo Anual del equipo resulta del producto  $CA_i = Frc_i C_i$ .

$t_c$ : tiempo para el conocimiento de la falla. Es el intervalo entre el instante en que ocurre la falla y el momento en que los operadores del sistema eléctrico toman conocimiento de ella [hs]. La automatización juega aquí un importante papel, puesto que si existe señalización del estado de las protecciones (por ejemplo en un panel), la magnitud de este tiempo es muy pequeña, de manera que teóricamente puede

considerarse cero.

$t_p$ : tiempo de preparación, que corresponde al tiempo requerido para la obtención de los recursos materiales necesarios para dar inicio a los trabajos de localización de la falla [hs].

$t_l$ : tiempo de localización de la falla [hs], que corresponde al traslado hasta las proximidades de la falla y la ejecución de pruebas con la finalidad de localizar en forma precisa el punto de falla [hs].

$t_r$ : tiempo de reparación, que es el intervalo que demora la ejecución de las tareas de reparación y/o recambio de los equipos fallados [hs].

$t_{CD}$ : tiempo de enfriamiento del aceite dieléctrico del interruptor, debido al arco extinguido durante el proceso de corte [hs].

Además, son necesarios los datos de la red sobre la cual se define el Modelo, entre los cuales se encuentran las longitudes de los tramos [km], las potencias demandadas [kVA] y la cantidad de usuarios.

La ubicación de equipos sp de distinto tipo en la red determina efectos distintos en las cargas conectadas a la misma, según qué equipos sean los más cercanos a ellas. Se consideran tres tipos de equipos SP: Interruptores (I), Seccionadores (D), y Fusibles (F).

Los Interruptores (I), operan ante una falla activa y permiten desconectar o conectar bajo carga el segmento de la red aguas abajo. Asociado a la reconexión, se requiere un tiempo de espera para el enfriamiento del aceite que extingue el arco generado durante el proceso de corte antes de poder reconectar. Pueden, además, ser telecomandados.

Los Seccionadores (D), no se accionan automáticamente ante una falla activa. Su función es desconectar todo el segmento de red aguas abajo para permitir la realización de maniobras de forma segura, teniendo en cuenta que no están diseñados para ser accionados bajo carga.

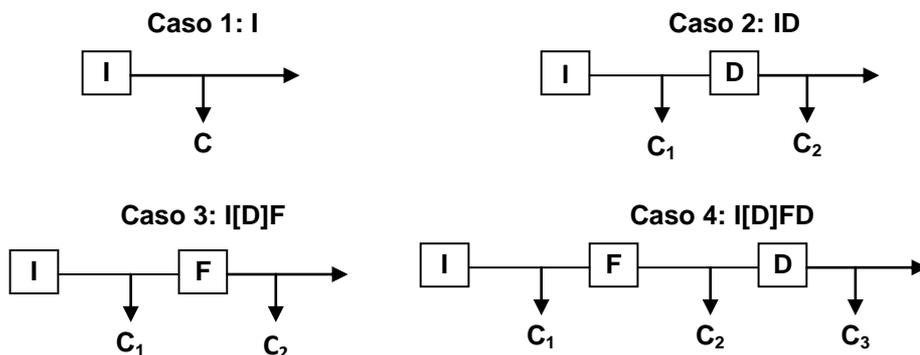
Por último, los Fusibles (F), operan solamente ante una falla activa, desconectando todo el segmento de la red aguas abajo y dejándolo sin suministro. No permiten maniobras y deben reemplazarse ante cada falla que produzca su accionamiento.

Los equipos que efectivamente segmentan la red son los Interruptores, ya que poseen ambas funcionalidades: reacción ante las fallas activas y maniobra bajo carga. Dentro de un segmento, esto es, en la parte de la red comprendida entre dos interruptores, pueden tenerse varias combinaciones de líneas, cargas (usuarios/subestaciones), Fusibles y Seccionadores. Las distintas combinaciones determinan cuáles de los usuarios se quedan sin suministro ante una falla y durante cuánto tiempo. En la FIGURA 3, se presentan cuatro casos que resumen todas las posibilidades de configuración de un segmento para estos tres tipos de equipos sp.

A continuación se explica cada Caso, y se establece el tiempo total sin suministro de energía,  $t_{SS}$  (puede haber más de una expresión, dependiendo de la contingencia que se presente), y el número de cortes (interrupciones) asociado,  $n_C$  – pares ( $t_{SS}$ ;  $n_C$ ) -.

**Caso 1: I:** En este caso, el más básico, entre dos I solo hay una combinación de líneas y cargas. Ante una falla en cualquiera de los tramos,

toda la red aguas abajo del interruptor queda sin suministro y no puede ser restablecido en ninguno de ellos hasta que la falla sea reparada. Se asume que en la salida del alimentador de la red MT, hay un interruptor debidamente ubicado, acoplado al transformador Alta/Media Tensión. Se tendrá, por lo dicho: ( $t_{SS} = t_c + t_p + t_l + t_r$ ;  $n_C = 1$ ).



**FIGURA 3: Cuatro Casos Posibles de Ubicación en Relación a las Maniobras y Tiempos de Interrupción del Servicio**

**Caso 2: ID:** En este caso, ante una falla en un tramo entre I y D se procede igual que en el Caso 1. Para una falla luego de D, se acciona I y se deja sin suministro aguas abajo. Sin embargo, el suministro para los tramos que se encuentran entre I y D puede restablecerse abriendo D, desconectando de esta manera toda la red aguas abajo de D y accionando I para restablecer el servicio para los usuarios entre I y D. Una vez reparada la falla, debe accionarse D para restablecer el servicio aguas abajo, no sin antes accionar I para poder hacerlo, interrumpiendo nuevamente el suministro. Una vez pasado el tiempo de enfriamiento de I, se restablece el servicio en toda la red. Se tendrán dos contingencias: ( $t_{SS}^1 = t_c + t_p + t_l + t_{cD}$ ;  $n_C = 1$ ), y ( $t_{SS}^2 = t_c + t_p + t_l + t_r + t_{cD}$ ;  $n_C = 2$ ).

**Caso 3: I[D]F:** En este caso, ante una falla en un tramo entre I y F se procede igual que en el Caso 2 o 1, dependiendo de si hay ubicados D o no. Para una falla luego de F, este se acciona y se deja sin suministro aguas abajo. Los usuarios entre I y F no se ven afectados por el corte. Nótese que puede haber equipos de tipo D entre I y F que no resultan de ninguna utilidad en este caso. Una vez reparada la falla, debe reemplazarse F, para lo cual se debe interrumpir el suministro aguas abajo de I. Suponiendo que el tiempo de enfriamiento de I es superior al tiempo de reemplazo del fusible, una vez transcurrido  $t_{cD}$  se restablece el servicio en toda la red. Se tendrán dos contingencias: ( $t_{SS}^1 = t_{cD}$ ;  $n_C = 1$ ), y ( $t_{SS}^2 = t_c + t_p + t_l + t_r + t_{cD}$ ;  $n_C = 1$ ).

**Caso 4: I[D]FD:** En este caso, ante una falla antes de D se procede igual que en el caso anterior. Para una falla luego de D, se acciona F dejando sin suministro aguas abajo. La falla no afecta aguas arriba de F. Sin embargo, considerando que  $t_r \gg t_{cD}$ , puede restablecerse el suministro a los usuarios entre F y D, abriendo D y reemplazando el fusible correspondiente. Para esto

último es necesario cortar el suministro desde I, reemplazar F y esperar el tiempo de enfriamiento para volver a accionar I, teniendo en cuenta que D debe abrirse antes de completar el proceso. Una vez realizada esta primera maniobra se repara la falla y debe volver a accionarse I, cortando el suministro, accionando D, y esperar  $t_{CD}$  para restablecer el suministro aguas abajo de D. Se tendrán tres contingencias:  $(t_{SS}^1 = 2 t_{CD}; n_C = 2)$ ,  $(t_{SS}^2 = t_c + t_p + t_i + 2 t_{CD}; n_C = 2)$ , y  $(t_{SS}^3 = t_c + t_p + t_i + t_r + 2 t_{CD}; n_C = 1)$ .

**b) Número de estados del Espacio de Búsqueda (NEEb):**

Al igual que en Modelo HiperHeurístico anterior, la variable de decisión para las Formas X-FPSO será discreta, adoptando 4 valores: 0 (no se ubica ningún SP), 1 (se ubica un I), 2 (se ubica un D) y 3 (se ubica un F).

De modo que si  $nT$  es el número de tramos del SDEE MT, el NEEb resultará de las variaciones con repetición de 4 elementos tomados de a  $nT$ :

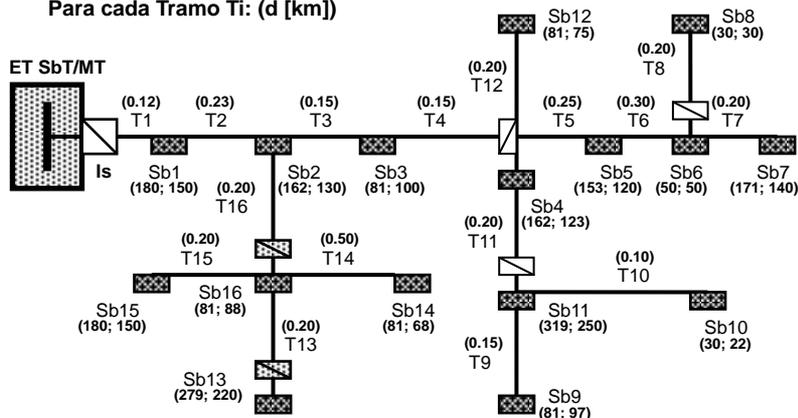
$$NEEb = 4^{nT} \tag{39}$$

**5 SIMULACIONES**

**5.1 Sistema Considerado**

El sistema considerado, cuyo esquema unifilar se representa en la FIGURA 4, se corresponde con una salida real de una Estación Transformadora 33/13.2 [kV] (Reductora desde el sistema de Subtransmisión, 33 [kV], al de Distribución Primaria en Media Tensión, 13.2 [kV]). Pertenece al SDEE de San Carlos de Bariloche. En tal salida, se han eliminado las interconexiones con otros alimentadores, las cuales permiten transferir alrededor de 1/4 de la carga ante contingencias.

Para cada Sb  $\equiv$  CT MTBT: ( P[kVA]; NumC)  
 Para cada Tramo Ti: ( d [km])



**FIGURA 4: Alimentador Real de MT adoptado para la Simulación. Ubicación Óptima de Seccionadores según los Modelos PDC (referencia), PDP e HiperHeurístico con un único tipo de equipo sp**

Se ha supuesto la existencia de un único interruptor a la salida de la

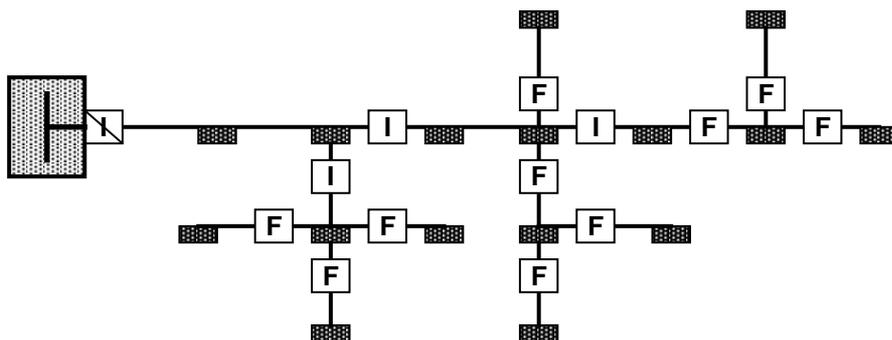
ET, indicado como  $l_s$ . La simulación pretende comparar los resultados entre los Modelos propuestos, sin hacer referencia a la confiabilidad real del alimentador. Esto se debe a que, por efecto de las interconexiones existentes en su topología real, el cálculo de la confiabilidad responde a un modelo en el cual intervienen, conjuntamente, todos los equipos  $sp$  ubicables en sus tramos y las capacidades de transferencia de carga a expensas de las interconexiones. Los datos del alimentador se presentan en la FIGURA 4. En la parte superior de cada tramo ( $T_i$ ) se indica su longitud en [km]. En la inferior de cada  $S_{bi} \equiv CT\ MT/BT$  (Centro de Transformación Media/Baja tensión), se indica el par (Potencia [kVA]; Cantidad de Clientes). Para los cálculos se ha considerado un factor de potencia de 0.95; una tasa de descuento  $t_d = 12\%$ ; para los tres tipos de equipos  $sp$ : Interruptores (I): costo,  $CI = 12000$  [US\$], vida útil,  $nvul = 15$  [años]; Seccionadores (D): costo,  $CD = 4000$  [US\$], vida útil,  $nvuD = 5$  [años]; Fusibles (F): costo,  $CF = 500$  [US\$], vida útil,  $nvuF = 1$  [años]. Respecto de los tiempos asociados a cada tipo de equipo  $sp$  y caso de contingencia o falla, se han adoptado los siguientes valores:  $t_c = 0$  [hs],  $t_p = 0$  [hs],  $t_i = 0.5$  [hs],  $t_r = 2.5$  [hs], y  $t_{CD} = 0.5$  [hs]; la tasa de falla por unidad de longitud y por año, se ha considerado constante:  $\lambda_j = \lambda = 0.32$  [fallas/año km]. Los valores de construcción para las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos solidarios a los índices de confiabilidad basados en clientes, resultaron:  $SAIFI_{MIN} = 0.24$ ,  $SAIFI_{MAX} = 1$ ;  $SAIDI_{MIN} = 1.5$ ,  $SAIDI_{MAX} = 3$ ;  $MAIFI_{MIN} = 0.45$ ;  $MAIFI_{MAX} = 1$ . Para la ENS, se tienen los valores límites:  $ENS_{MIN} = 39180$  [kWh/año],  $ENS_{MAX} = 1023.17$  [MWh/año]; y para el Costo Anual de los Equipos  $sp$ :  $CA_{EqSPMIN} = 0$ ,  $CA_{EqSPMAX} = 6800$  [US\$/año]. Los ponderadores exponenciales, fueron establecidos de forma consistente por el método de Yager (Yager, 1977), de manera tal que su suma resulte el número de criterios o Conjuntos Difusos (5, en este caso):  $p_{(SAIFI)} = 0.5$ ;  $p_{(SAIDI)} = 1$ ;  $p_{(MAIFI)} = 0.5$ ;  $p_{(ENS)} = 2$ ;  $p_{(CA_{EqSP})} = 1$ . Los valores correspondientes a costos, tasa de fallas, tiempos asociados a los diferentes tipos de  $sp$  e índices de confiabilidad, fueron proporcionados por la Empresa Distribuidora de San Carlos de Bariloche.

## 5.2 Resultados

En la FIGURA 4 se observa la ubicación óptima de un único tipo de equipo  $sp$ : Seccionador (D), conforme los Modelos, siguiendo la referencia (Schweickardt y Pistonesi, 2010): 1) PDC (adoptado como referencia y, como se dijo, fijado externamente el Costo de la ENS en 2 [US\$/kWh]); 2) PDP tal y como se describió en la **SECCIÓN 2**, epígrafe 2.4, y 3) el HiperHeurístico para un único tipo de equipamiento  $sp$  (Seccionador  $\equiv$  D), presentado en la **SECCIÓN 3**. Para el Modelo PDC sólo resultan ubicables 3 Seccionadores en los tramos 5, 8, 11 (indicados mediante un rectángulo con una línea diagonal, blanco). Tanto para el Modelo PDP como para el HiperHeurístico, resultaron las mismas ubicaciones, pero incorporando dos  $sp \equiv D$  más, en los tramos 13

y 16 (indicados mediante un rectángulo con una línea diagonal, sombreado).

En la FIGURA 5 se observa la ubicación óptima resultante, sobre el mismo SDEE real, desde el Modelo HiperHeurístico para tres tipos de equipos sp, presentado en la **SECCIÓN 4** (I, D y F).



**FIGURA 5: Ubicación Óptima de Equipos sp resultante del Modelo HiperHeurístico para tres tipos de equipos sp (I, D y F)**

PDP {D} – 1 Tipo de Equipo sp						
Criterio	Valor obtenido	Lím. Min.	Lím. Max.	Ponderador	$\mu$	$CI^u_{ENS}$ [US\$/año]
SAIFI [1/año]	0.43	0.24	1	0.5	0.81	1.67
SAIDI [hs/año]	0.88	1.5	3	1	0.94	
MAIFI [1/año]	0.57	0.45	1	0.5	0.84	
ENS [kWh/año]	47678	39180	68565	2	0.91	
CA <sub>EqSP</sub> [US\$/año]	1221.67	0	6100	1	0.71	
HiperHeurística {D} – 1 Tipo de Equipo sp						
Criterio	Valor obtenido	Lím. Min.	Lím. Max.	Ponderador	$\mu$	$CI^u_{ENS}$ [US\$/año]
SAIFI [1/año]	0.54	0.24	1	0.5	0.87	1.53
SAIDI [hs/año]	0.84	1.5	3	1	0.92	
MAIFI [1/año]	0.67	0.45	1	0.5	0.90	
ENS [kWh/año]	44678	39180	68565	2	0.94	
CA <sub>EqSP</sub> [US\$/año]	1821.67	0	6800	1	0.62	
HiperHeurística {I, D, F} – 3 Tipos de Equipos sp						
Criterio	Valor obtenido	Lím. Inf.	Lím. Sup.	Ponderador	$\mu$	$CI^u_{ENS}$ [US\$/año]
SAIFI [1/año]	0.43	0.24	1	0.5	0.85	1.2
SAIDI [hs/año]	0.88	1.5	3	1	0.95	
MAIFI [1/año]	0.57	0.45	1	0.5	0.88	
ENS [kWh/año]	39954	39180	68565	2	0.96	
CA <sub>EqSP</sub> [US\$/año]	5321.67	0	6800	1	0.67	

**TABLA 1: Resultados para los tres Modelos: PDP ubicando {D}, HiperHeurística ubicando {D}, e HiperHeurística ubicando {I, D y F}**

## 6 CONCLUSIONES

- 1) Se ha presentado un novedoso Modelo General para Optimizar la

Confiabilidad de SDEE MT, ubicando distintos tipos de equipamientos de Seccionamiento/Protección. Sin pérdida de generalidad, se han considerado tres tipos: Interruptores (I), Seccionadores (S) y Fusibles (F). Este Modelo, soportado en un Algoritmo HiperHeurístico con dominio en MetaHeurísticas X-FPSO MultiObjetivo y Basado en Razonamiento (Función de Selección implementada mediante una Red Neuronal de Retropropagación Simple), resuelve un Problema de Optimización Combinatoria, cuya solución aún se discute en el estado del arte.

2) El análisis de los resultados obtenidos en esta línea de Investigación, abordada fundamentalmente por el primer autor desde el año 2009, se comparan los resultados de tres Modelos aplicados sobre el mismo SDEE MT real: un Modelo basado en Programación Dinámica Posibilística (PDP) con el Modelo HiperHeurístico ubicando un único tipo de equipamiento SP (D), y luego con el Modelo General mencionado en 1). Se observa que el Modelo HiperHeurístico genera muy buenos (y mejores, comparado con el PDP) resultados. Su implementación mediante Computación Paralela, lo torna muy rápido y eficiente. El Modelo, además, puede extenderse a los SDEE en Baja Tensión (BT) situación de particular interés bajo el nuevo Paradigma de Generación Distribuida, el cual incorpora la figura de usuarios Micro-Generadores conectados a la red BT.

3) Los aportes principales del presente trabajo, estriban en la capacidad del tipo de HiperHeurística propuesta por los autores: resuelve de forma más eficiente que el Modelo PDP el Problema de la Ubicación Óptima de un único tipo de equipos sp –Seccionadores-, para minimizar la ENS y determinar su Costo Intrínseco, y es capaz, sin modificaciones en su estructura algorítmica e implementación computacional, de resolver mismo problema considerando más de un tipo de equipo sp. En este caso tres tipos. Este problema no puede ser resuelto aplicando el Modelo PDP.

4) El Concepto de Costo Intrínseco de la Energía No Suministrada (aplicable a cualquier Indicador), vale como instrumento regulatorio, pues a partir del mismo pueden ser definidas monetariamente penalizaciones por No Calidad de Servicio Técnico aplicables a los SDEE MT.

5) Finalmente, queda planteado como línea de investigación, actualmente abordada por los autores, la aplicación del Modelo HiperHeurístico propuesto, sobre Redes de un SDEE real con telecomando en sus diferentes tipos de equipos sp. Específicamente, es de gran importancia, bajo en nuevo paradigma de Generación y Micro-Generación Distribuida desde fuentes primarias de energía renovable, analizar la reconfiguración de las redes en tiempo real (12-20 [seg]) ante contingencias o fallas en dicha generación, minimizando la ENS.

## 7 REFERENCIAS

BELLMAN, R.; ZADEH, L. (1970): "DECISION-MAKING IN A FUZZY ENVIRONMENT". Management Science - 17 - págs. 141,164.

GÖNEN T. (1986): "ELECTRIC POWER DISTRIBUTION SYSTEM

ENGINEERING”, MacGraw-Hill, United States.

IEEE (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS) (2003): “IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability INDICES”, STD 1366TM.

CASANOVA C.; SCHWEICKARDT G. (2016): “ANÁLISIS DE LAS HABILIDADES DE METAHEURÍSTICA X-PSO MULTIOBJETIVO MEDIANTE INDICADORES DE INTELIGENCIA DE GRUPO. APLICACIÓN EN EL BALANCE DE CARGA EN REDES ELÉCTRICAS DE BAJA TENSIÓN”. Revista de la Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa – Nro. 40 – págs. 23, 42.

SCHWEICKARDT G.; CASANOVA C. (2015): “MODELOS HIPERHEURÍSTICOS BASADOS EN RAZONAMIENTO CON PROCESAMIENTO PARALELO Y DOMINIO EN METAHEURÍSTICAS X-PSO Y AFS MULTIOBJETIVO”. Revista de la Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa – Nro. 37 – págs. 7, 26.

SCHWEICKARDT G.; CASANOVA C.; GIMENEZ J. (2013): “HIPERHEURÍSTICA BASADA EN RAZONAMIENTO CON DOMINIO EN METAHEURÍSTICAS X-FPSO MULTIOBJETIVO. APLICACIÓN SOBRE UN OPTIMIZACIÓN DINÁMICA POSIBILÍSTICA. PARTE 1”. Revista de la Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa – Nro. 34 – págs. 8, 29.

SCHWEICKARDT, G.; PISTONESI, H. (2010): “UN MODELO POSIBILÍSTICO PARA ESTIMAR EL COSTO INTRÍNSECO E LA ENERGÍA NO SUMINISTRADA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA”. Revista Dyna –Vol. 77– Nro. 162 - págs. 249,259.

YAGER R. (1977): “MULTIPLE OBJECTIVE DECISION MAKING USING FUZZY SET”. International Journal Man-Machine Studies, 9, págs. 53,64.