Energética
ISSN: 0120-9833
energetica_nal@unal.edu.co
Universidad Nacional de Colombia
Colombia

Revista Energética Número 40, Diciembre de 2008 - ISSN 0120-9833

ADAPTACIÓN ECONÓMICA DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA SUSTENTADA EN LA OPTIMIZACIÓN POSIBILÍSTICA

Gustavo Alejandro Schweickardt[1], Vladimiro Miranda[2] & Héctor Pistonesi[1]
1. Instituto de Economía Energética/Fundación Bariloche, Argentina
2. Instituto de Ingeniería y Sistemas de Computación (INESC), Universidad de Porto, Portugal
gustavoschweickardt@ciudad.com.ar

Recibido para evaluación: 27 de Agosto de 2008
Aceptación: 5 de Diciembre de 2008
Entrega de versión final: 10 de Diciembre de 2008

Resumen

El concepto de Sistema Económicamente Adaptado, aplicado a los Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica (SDEE), se sustenta en el Paradigma Económico Neoclásico. Se lo vincula sólo a la eficiencia productiva que implica la expansión y operación del SDEE a mínimo costo. Supone, adicionalmente, un equilibro permanente, motivo por el cual tal eficiencia se debe presentar, inclusive, en el futuro, no obstante las decisiones de planificación se adopten en el presente. Ignora las incertidumbres o bien les confiere un carácter estocástico que no necesariamente exhiben. En este trabajo se presenta una definición para el grado de desadaptación de un SDEE, desde un enfoque que se sustenta en dos conceptos: las Distribuciones de Posibilidad, por una parte, y la idea de Arrepentimientos, por la otra, en el dominio de alternativas valuadas como números difusos. Estos conceptos constituyen el fundamento de la Optimización Posibilística. Se presenta la aplicación del modelo en un SDEE real, bajo las condiciones regulatorias vigentes en Argentina, en el período de control quinquenal (2003-2007).

Palabras Clave: Optimización Posibilística; Costos Difusos; Riesgo Intrínseco; Arrepentimiento Difuso; Sorpresa; Grado de Desadaptación.

Abstract

The concept of an Economically Adapted System, applied on Electric Distribution Networks, is based on the Neoclassic Economics Paradigm. It is related only to the productive efficiency, which implies the expansion and operation of systems networks with a minimum cost. It assumes as well a permanent equilibrium, which is a reason for establishing that such efficiency must take place even in the future, regardless that the planning decisions are made in the present. It ignores the uncertainties, or it renders them a stochastic nature, which they do not necessarily show to have. In this work a definition to the de-adaptation system degree, from a different approach, is presented. It is based on two major concepts: Possibility Distributions and Regret, considering the framework of fuzzy numbers valued alternatives. This concepts are the fundations of Possibilistic Optimization. An application on the real system, under regulatory scheme of Argentina at the tariff control period (2003-2007), is presented.

Keywords: Possibilistic Optimization; Fuzzy Costs; Intrinsic Risk; Fuzzy Regret; Sur prise; De-adaptation Degree.

1. INTRODUCCIÓN

El Modelo de Optimización Posibilística ha sido presentado para abordar la Planificación de la Expansión de los Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica en el Mediano-Corto Plazo en (Schweickardt y Miranda, 2007 a). Se procurará definir, a partir se sus elementos, el grado de desadaptación que el SDEE exhibe en cierta etapa, respecto de su evolución prevista, conforme las críticas vertidas sobre la noción neoclásica de la adaptación económica, empleada en los esquemas regulatorios aplicados en Latinoamérica (Schweickardt y Pistonesi, 2007). La desadaptación del sistema, es entendida como un apartamiento del estado real respecto del resultante en el pronóstico de expansión, para cierta etapa del horizonte temporal considerado. Se asume que cada criterio para evaluar la aptitud del sistema (Costo, Energía No Suministrada, etc.) se corresponde con una restricción/objetivo en una optimización clasica, y que tiene una valoración conferida por el regulador, que refleja su costo social de oportunidad. Esta hipótesis resulta sostenible, según puede observarse en la mayoría de los esquemas regulatorios (particularmente de Latinoamérica), basados en incentivos-penalizaciones.

En la definición del modelo, se supone que han sido identificadas soluciones factibles de un espacio de búsqueda, sobre el que deberá definirse la estrategia o alternativa más satisfactoria de expansión para el sistema. Por tal motivo, la técnica empleada se sustenta en la Programación Dinámica (PD). Tales soluciones responden a distintas configuraciones topológicas, con su equipamiento asociado, que pueden, en mayor o menor medida (mérito), cumplir los requerimientos de operación del sistema bajo ciertas restricciones en cierto año de corte (etapa) del período de estudio. Se las referirá como variantes. La Optimización exhibe un carácter posibilístico, debido a que las incertidumbres del sistema, de naturaleza no estocástica o fundamental propuesta por Keynes (Lavoie, 1992), son modeladas mediante números difusos, los cuales pueden ser interpretados como distribuciones de posibilidad (Schweickardt, 2003). Los números difusos, resultan ser un caso particular de los conjuntos difusos (normales y convexos). Se introducirán los aspectos esenciales para sus operaciones, citando referencias bibliográficas para su profundización. El trabajo tendrá dos secciones. En la primera se introduce el modelo y su soporte teórico-metodológico, para luego definir, en términos de sus elementos, una expresión para el grado de desadaptación del sistema. En la segunda, se presenta una aplicación sobre un SDEE real bajo las condiciones regulatorias vigentes en la Argentina, desarrollando las formulaciones específicas necesarias.

2. SECCIÓN I: EL MODELO DE OPTIMIZACIÓN POSIBILÍSTICA

2.1. Antecedentes

Desde la Programación Dinámica (Bellman y Dreyfus, 1962) puede considerarse un enfoque a través del llamado Principio de Optimalidad de Bellman-Zadeh para tratar con incertidumbres de naturaleza no estocástica, representadas mediante conjuntos difusos (Bellman y Zadeh, 1970). Se concibe así la denominada Programación Dinámica Difusa (PDD). En ésta, tanto las Restricciones como la Función Objetivo son modeladas mediante conjuntos difusos. De este modo el problema de optimización consiste en determinar la Decisión Maximizante sobre el conjunto conformado por la intersección de los Objetivos y las Restricciones difusas; conjunto, por tal motivo, denominado de Decisión Difusa. La PDD requiere, entonces, de un conjunto de variantes discretas cuyos valores asociados a cada criterio-restricción, a través de sus correspondientes funciones de pertenencia, son mapeados sobre los conjuntos difusos Objetivo-Restricciones. El resultado implica evolucionar según una Trayectoria Óptima, conformada bajo la premisa de que todo estado óptimo de la misma, se deduce de aquella variante a la que le corresponde el valor máximo de pertenencia en el Conjunto Difuso de Decisión. Adicionalmente, el tomador de decisiones puede introducir una valoración en la importancia relativa de tales criterios-restricciones. Entre los métodos vinculados a este procedimiento, se destaca el de los Ponderadores Exponenciales de Yager (Yager, 1977). Estos modifican cada función de pertenencia conforme la importancia del criterio-restricción, alterando su participación en la intersección referida. Con ello se impacta convenientemente sobre la Decisión Maximizante. Una formulación completa para los SDEE, puede verse en (Schweickardt y Miranda, 2007 b). En este campo de aplicación, los esquemas regulatorios más avanzados sostienen la hipótesis de que para cada criterio-restricción del problema, existe una valoración originada en su costo económico. En tal contexto, la PDD presenta dos dificultades principales: **a)** Genera una Trayectoria discreta de evolución, sobre un espacio de estados determinístico. De esta manera se "desvanecen" las incertidumbres imposibilitando su propagación en la dinámica del sistema. Este aspecto es de suma importancia cuando se pretende evaluar el impacto que las incertidumbres de la estrategia óptima resultante, tienen sobre algún proceso de cálculo ulterior. Por ejemplo, el caso concreto de asignar los costos vinculados al plan físico de expansión de un SDEE, basado en tal estrategia, con propósitos tarifarios; **b)** Existe una consideración implícita del riesgo en las decisiones adoptadas, definiendo a priori un orden de importancia en los criterios-restricciones que se integran en la función objetivo. Sería más útil contar con una medida de riesgo explícita. Su naturaleza se vincularía a la estructura de incertidumbres inherente al sistema y no a la aversión o propensión al riesgo que el tomador de decisiones manifieste, implícitamente, mediante aquel proceder. Tales limitaciones sugieren la exploración de un modelo de optimización diferente, bajo la hipótesis de que los criterios-restricciones, aún con incertidumbres, cuenten con valores expresados según sus costos económicos. Por ello el modelo propuesto persigue dos objetivos: **a)** Dar tratamiento a las incertidumbres inherentes al sistema, preservando el impacto que las mismas puedan producir en cálculos ulteriores a la obtención de la estrategia de expansión; **b)** Obtener una medida del riesgo que permita acotar el mérito de la estrategia de expansión seleccionada. En el núcleo de este modelo persisten los elementos básicos de la PDD (Conjuntos Difusos y el Principio de Optimalidad de Bellman), pero se integran de un modo diferente. Asimismo, son incorporados otros elementos cuyos conceptos se presentarán en los desarrollos siguientes, no contemplados en (Schweickardt y Miranda, 2007 a).

2.2. El modelo optimización posibilítica

2.2.1. Objeto

El modelo de optimización propuesto, se centra en obtener una estrategia de expansión para el sistema en estudio, sin las dos limitaciones referidas en el apartado anterior. Interesa la idea de que la trayectoria solución sea conducida por un cierto nivel de riesgo (entendido como un a–corte del Conjunto Difuso de Decisión), por debajo del cual no pueda sostenerse como aceptable. Para ello, es aplicada una técnica de Programación Dinámica, donde las incertidumbres del Sistema son representadas bajo la forma de números difusos. De este modo, se persigue una Maximización/Minimización de una Función Objetivo que resultará difusa a raíz de su dependencia de variables difusas, hecho sustentado analíticamente a partir del Principio de Extensión, formulado por (Doubois y Prade, 1980). La expresión matemática que gobierna la Estrategia de Optimización, como se verá, es el Principio de Optimalidad de Bellman clásico extendido al dominio difuso.

2.2.2. El Problema de la Comparación entre Números Difusos

Si se asume que las alternativas en un proceso de decisión son valuadas, a los efectos de preservar las incertidumbres, mediante números difusos, un primer problema es establecer una forma de comparar - para poder optar según el mérito resultante. Considérense dos números difusos **A** = A(ā) y **B** = B(ā), definidos según (Kaufmann y Gupta, 1985), mediante el acoplamiento de un segmento de confianza (expresado entre corchetes) y un nivel de presunción (variable ā o ā –corte), indicando los subíndices 1 y 2 el extremo inferior y superior, respectivamente, de tal segmento:

$$\forall\, \bar{a} \in [0,1]\,,\ \mathbf{A} = [\, a_1(\bar{a})\,,\, a_2(\bar{a})\,] \text{ y } \mathbf{B} = [\, b_1(\bar{a}), b_2(\bar{a})\,] \quad (1)$$

Entonces, en cuanto al ordenamiento de estos números difusos, puede decirse que:

$$\mathbf{A} \leq \mathbf{B}\,, \text{ si: } \forall\, \bar{a} \in [0,1]\,,\ a_1(\bar{a}) \leq b_1(\bar{a}) \text{ y } a_2(\bar{a}) \leq b_2(\bar{a}) \quad (2)$$

$$\mathbf{A} \geq \mathbf{B}\,, \text{ si: } \forall\, \bar{a}\, [0,1]\,,\ a_1(\bar{a}) \geq b_1(\bar{a}) \text{ y } a_2(\bar{a}) \geq b_2(\bar{a}) \quad (3)$$

Es claro que si (2) o (3) no se satisfacen, los números difusos **A** y **B** no resultan comparables. Se concluye así en que los números difusos no presentan una estructura de orden total, sino parcial. Por otra parte, sean los operadores $\wedge$ y $\vee$, con la siguiente significación:

$$a \wedge b = \text{Min}\,(a, b) = \{a, \text{ si } a \leq b\,;\quad b, \text{ si } b \leq a\} \quad (4)$$

$$\text{y: } a \vee b = \text{Max}\,(a,b) = \{a, \text{ si } a \geq b\,;\quad b, \text{ si } b \geq a\} \quad (5)$$

Los mismos pueden ser extendidos al dominio difuso, conduciendo a las expresiones ($\langle\wedge\rangle$ y $\langle\vee\rangle$ son los operadores extendidos):

$$\forall\, \bar{a} \in [0,1]\,,\ \mathbf{A} = [\, a_1(\bar{a})\,,\, a_2(\bar{a})\,] \text{ y } \mathbf{B} = [\, b_1(\bar{a})\,,\, b_2(\bar{a})\,]:$$

$$\mathbf{A} \langle\wedge\rangle \mathbf{B} = [a_1(\bar{a})\,,\, a_2(\bar{a})]\ \ [b_1(\bar{a})\,,\, b_2(\bar{a})] = [a_1(\bar{a})\ \ b_1(\bar{a})\,,\, a_2(\bar{a})\ \ b_2(\bar{a})] \quad (6)$$

$$\mathbf{A} \langle\vee\rangle \mathbf{B} = [a_1(\bar{a})\,,\, a_2(\bar{a})]\ \ [b_1(\bar{a})\,,\, b_2(\bar{a})] = [a_1(\bar{a})\ \ b_1(\bar{a})\,,\, a_2(\bar{a})\ \ b_2(\bar{a})] \quad (7)$$

Según (Kaufmann y Gupta, 1985), la expresión (6) representa el Mínimo Difuso de A y B, mientras que la (7) representa el Máximo Difuso. Estas definiciones resultan en una fusión entre ambos números, compuesta por secciones de uno y otro. Esta idea de Máximo (o Mínimo), no resulta de utilidad para establecer un ordenamiento de preferencias, ya que se desvanece la representatividad que cada número difuso tiene respecto de la alternativa correspondiente. Se debe preferir A sobre B ó bien B sobre A, pero no una fusión de ambos.

2.2.3. Comparación Parcial de Alternativas Valuadas en Números Difusos. Concepto de Riesgo Intrínseco

A partir de lo dicho, se propone para el modelo que dos alternativas valuadas en números difusos se comparen parcialmente. Esto significa limitar la alternativa dominante, según la característica funcional de los conjuntos difusos que son comparados, evitando la pérdida de individualidad de tales números respecto de las alternativas que representan. Esto requiere, como condición necesaria, que las expresiones (2) y (3) sean siempre satisfechas, dependiendo del contexto del problema (minimización o maximización). Pero ello no constituye una condición suficiente. Para aclarar este concepto, y sus implicancias, considérese la FIGURA 1. En la misma se representan dos Números Difusos Triangulares (NDT), A y B. Sin pérdida de generalidad, se han adoptado estas formas por simplicidad en el desarrollo: A = (a- δ_1 ; a ; a + δ_2) y B = (b- δ_1 ; b ; b + $\delta_{2\,B}$), con $\delta_{i\,A,B} \geq 0$.

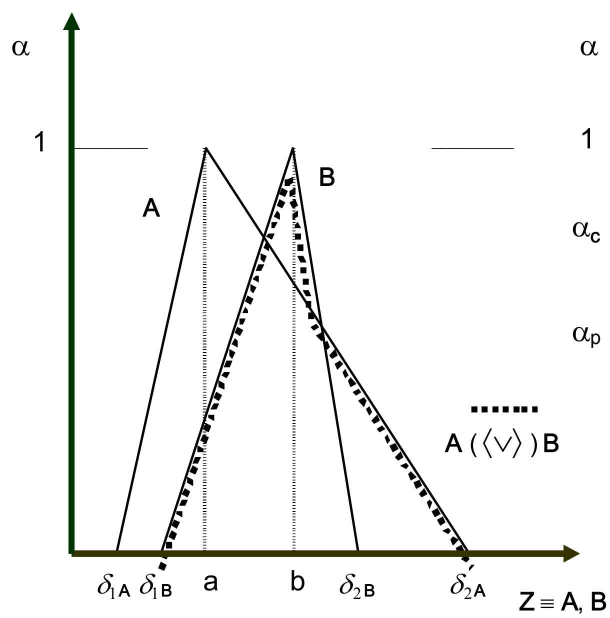

Figura 1. Máximo Difuso (Kauffman & Gupta)

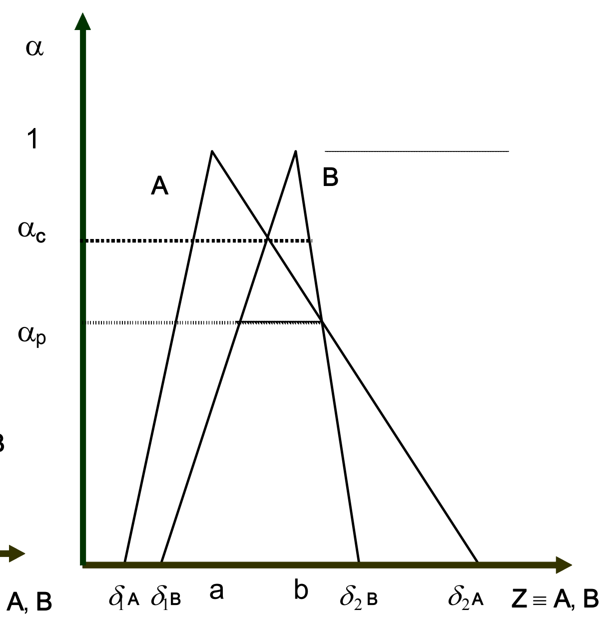

Figura 2. Comparación Parcial

La primer implicancia es que, suponiendo un contexto de minimización, la expresión (2), **A**≤ **B**, se satisface siempre que se cumpla a ³ ap (condición necesaria). Sin embargo, tal situación no garantiza la dominancia de la alternativa A sobre la B. Para ello, se requiere un nivel de certidumbre ac > ap, tal que no sólo se satisfaga (2), sino que la alternativa A domine a la B de manera incontestable (sean cuales fueren las ocurrencias en los valores de **A**(a) y **B**(a)). Esto es (condición suficiente):

$$\mathbf{A}(\alpha \geq \alpha c) \leq \mathbf{B}(\alpha \geq \alpha c) \Rightarrow \text{Min}(\mathsf{A}_{\alpha_c}, \mathsf{B}_{\alpha_c}) = \mathsf{A} \quad (8)$$

Se infiere, fácilmente, la expresión de estructura según (8) para un contexto de maximización. La segunda implicancia, se refiere al carácter que le puede ser conferido al nivel de certidumbre αc. Para niveles más bajos, α < αc, como se observa en la **Figura 2**, pueden existir ocurrencias en los valores de **A**(α) y **B**(α), tales que satisfagan o no la expresión (8) (o su correlato en un contexto de maximización). Esta condición, de persistir en la dominancia de la alternativa A sobre la B, entraña un riesgo para el tomador de decisiones. De manera que el nivel de certidumbre αc, tiene un carácter umbral de aceptación para, por caso, (8). Por ello, puede interpretarse como una definición operacional de riesgo, en el proceso de comparación parcial propuesto. Se lo denominará Umbral de Riesgo Intrínseco, ya que sólo depende de la estructura de incertidumbres inherente al modelo y no de factores externos. Por simplicidad se lo referirá, en lo que sigue, como Riesgo Intrínseco:

$$\Theta_i = \alpha c \qquad (9)$$

De esta forma, toda comparación parcial de alternativas valuadas en números difusos, estará acotada por un Riesgo Intrínseco, $0 \leq = \alpha c \leq 1$.

2.2.4. Ordenamiento Lineal de Decisiones Valuadas en Números Difusos. El Criterio del Mínimo Colapso de los Arrepentimientos Difusos

Un aspecto que contempla el modelo propuesto, consiste en establecer una clara diferencia entre decisiones sobre números difusos y decisiones sobre alternativas valuadas en números difusos. Esta diferencia es enfatizada por lo siguiente: si se intenta establecer una escala de preferencias entre números difusos, omitiendo la pérdida de incertidumbre, entonces puede emplearse algún criterio para seleccionar un valor como más verosímil, tal como se explica en la expresión (16), más adelante en el texto. Pero si se trata de establecer una escala de preferencias entre alternativas valuadas sobre números difusos, en procesos vinculados a la toma de decisiones, la solución requerida es más compleja. En efecto, debería ser considerada una medida de arrepentimiento por haber escogido, de entre varias, una determinada alternativa en lugar de la que resulte mejor. El concepto de Arrepentimiento Difuso, en el contexto de aplicación de los SDEE, ha sido sugerido por (Miranda y Proença, 1997) y por (Schweickardt, 2003). El desarrollo se sintetiza a continuación: si un cierto futuro (escenario), k, fuese conocido anticipadamente (sin incertidumbres), se estaría en condiciones teóricas para seleccionar una alternativa óptima, tal que minimice, por caso, una función de costo $f_{c,k}$. Al valor resultante se lo indica como $fOp_{c,k}$. Este valor recibe el nombre de óptimo condicional. Si se seleccionase una alternativa i, diferente de la óptima condicional, entonces el arrepentimiento determinístico (no hay incertidumbres), resultará:

$$R_{i,k} = r(f_{c,i} - fOp_{c,k}) \qquad (10)$$

donde r es una función cualquiera que intente ponderar la importancia de la diferencia en la elección. Considerando el caso más simple, r es lineal, se tiene:

$$R_{i,k} = f_{c,i} - fOp_{c,k} \qquad (11)$$

Si fueran contempladas las incertidumbres, valuando las alternativas en números difusos, (11) puede extenderse al dominio difuso:

$$R_{i,k} = f_{c,i} \langle - \rangle fOp_{c,k} \qquad (12)$$

donde: $\langle - \rangle$ representa la sustracción extendida. Supóngase, sin pérdida de generalidad, un contexto de minimización de la función de costo. Los valores que interesan en (11) son los positivos. Para tal contexto, los resultados negativos y cero implican ausencia de arrepentimiento en la decisión adoptada/alternativa seleccionada. Una situación más general, correspondería a un proceso de decisión entre dos alternativas, A y B, para las cuales no se conoce el óptimo condicional. Deben calcularse entonces, dos arrepentimientos (en el dominio difuso), donde $A|B$ significa preferir la alternativa A en lugar de la B:

$$R[A|B] = A \langle - \rangle B \qquad (13)$$

$$R[B|A] = B \langle - \rangle A \qquad (14)$$

y escoger aquella alternativa que arroje el menor. La expresión para (13), por caso, conforme las operaciones definidas entre números difusos, resulta:

$$\forall\, \bar{a} \in [0,1],\ A = [\, a_1(\bar{a}) , a_2(\bar{a}) \,] \text{ y } B = [\, b_1(\bar{a}) , b_2(\bar{a}) \,]:$$

$$R[A|B] = [\, \mathrm{Max}\,\{ 0 ; (a_1(\bar{a}) - b_2(\bar{a}))\} ; \mathrm{Max}\{ 0 ; (a_2(\bar{a}) - b_1(\bar{a})) \} \,] \qquad (15)$$

definición que respeta la sustracción de dos números extendida al dominio difuso (Kaufmann y Gupta, 1985), ignorando valores positivos. El concepto de arrepentimiento difuso así entendido, se introduce en el modelo ante situaciones en las que el riesgo intrínseco de la comparación parcial resulta tan elevado, que es preferible ignorar una de las dos alternativas que se comparan. Por ignorar debe entenderse eliminar la alternativa que exhibe el mayor arrepentimiento del espectro de opciones. Como ejemplo, considérense los NDT: $A = (a-\delta_{1A} ; a ; a+\delta_{2A}) = (1,10,10)$ y $B = (b-_B ;$

b ; $b +_B$), si el riesgo intrínseco de la comparación parcial resultase inadmisible, entonces se aplicaría este nuevo criterio: 1) se calculan los arrepentimientos difusos; 2) Se aplica algún criterio para escoger el valor más representativo. A este proceso se lo refiere en este contexto como colapso - Cpso (Schweickardt y Miranda, 2007 a); y 3) se comparan los números así obtenidos (colapsos), eliminando del espectro de opciones la alternativa correspondiente al mayor. El criterio de colapso Removal, es definido para un NDT como:

$$\mathrm{Rem}(Z) = z_m + \frac{1}{2} \times \left[\int_{z_m}^{z_2} R(z)\,dz + \int_{z_1}^{z_m} L(z)\,dz \right] \quad (16)$$

donde: $L(z)$ y $R(z)$ son las funciones de pertenencia a izquierda y derecha, respectivamente, del valor más verosímil z_m (abscisa del vértice de cada triángulo); z_1 y z_2 son los valores 0 de estas funciones. Se tiene, para los pasos propuestos (contexto de minimización): $\mathrm{Rem}\{R[A|B]\}$ = 2.847; $\mathrm{Rem}\{R[B|A]\}$ = 2.347, eliminándose la alternativa A (se considera dominante a la B).

Entonces: cuando la comparación parcial exhibe un nivel de riesgo intrínseco inadmisible, la preferencia entre dos alternativas es establecida mediante un criterio complementario. Este Criterio del Mínimo Colapso de los Arrepentimientos Difusos (MCRD), (de los números difusos en los que las alternativas son valuadas), define cuál alternativa resulta dominante según el contexto de selección (minimización o maximización). Si se tiene un conjunto de varias alternativas valuadas en números difusos, el criterio propuesto se aplica considerándolas de a pares. A tal efecto, puede comprobarse (Schweickardt, 2003) que existe transitividad entre los colapsos de los arrepentimientos difusos: Sean A, B, y C tres alternativas valuadas según los números difusos A, B y C, correspondientemente. Sea Cpso, el obtenido por cualquier criterio, por caso (16). Entonces: si $\mathrm{Cpso}\{R[A|B]\} \leq \mathrm{Cpso}\{R[B|A]\}$ y $\mathrm{Cpso}\{R[B|C]\} \leq \mathrm{Cpso}\{R[C|B]\} \Rightarrow \mathrm{Cpso}\{R[A|C]\} \leq \mathrm{Cpso}\{R[C|A]\}$ (si A es preferible a B y B lo es a C, entonces A lo es a C). La transitividad no depende ni de la función de pertenencia del número difuso, ni del criterio de colapso empleado. Es claro que el criterio, una vez seleccionado, debe ser único. Se conforma, entonces, un ordenamiento lineal de preferencias entre alternativas valuadas en números difusos, a través del criterio MCRD.

2.2.5. Dinámica del Modelo. Extensión del Principio de Optimalidad de Bellman al Dominio Difuso

La Programación Dinámica se fundamenta en el denominado Principio de Optimalidad de Bellman (Bellman y Dreyfus, 1962), el cual requiere considerar al problema abordado, como un proceso de decisión Multi-Etapa, en el que la política óptima es determinada recursivamente. Puede enunciarse del siguiente modo: Supuesto el problema divisible en etapas, el valor de la función a optimizar (Función Objetivo) correspondiente a la vinculación entre un estado j de la etapa k y un estado i de la etapa $k-1$, depende únicamente del valor de la función en el estado i y del valor correspondiente a la variación de la función entre ambos estados (j de la etapa k ; i de la etapa $k-1$). Tal variación, en un contexto de minimización, es referida como costo (en sentido lato) de transición entre ambos estados de sendas etapas. De esta forma, el principio de optimalidad, resulta gobernado por la siguiente expresión: Para N etapas:

$$f^*(j,k) = \mathrm{Opt}\left\{ f^*(i,k-1) + C_{tr}\left({}^{k-1}_{i}, {}^{k}_{j} \right) \right\};\ \left\{ \forall\, i = 1..N \in (k-1) \right\} \quad (17)$$

donde: Opt: Óptimo (Mínimo – Máximo, según el problema); f^*: Valor Óptimo de la Función Objetivo f en el estado y etapa considerados; (j, k): estado j correspondiente a la etapa k; $(i, k-1)$: estado i correspondiente a la etapa $k-1$; Ctr: variación de la función f entre los estados $(i , k-1)$ y (j, k) - Costo de Transición entre ambos estados de sendas etapas en un contexto de minimización. Esta formulación puede ser extendida al dominio difuso porque el principio de extensión (Kaufmann y Gupta, 1985) para las operaciones algebraicas involucradas en (17), resulta aplicable. En efecto, se trata de la adición e, implícitamente, de la sustracción que tiene lugar al comparar, en contextos de minimización, las transiciones desde el estado i de la etapa $(k-1)$, al j de la etapa k (supuesta una dinámica "hacia delante": $(k-1)$! k). De modo que, fijando un contexto de minimización, puede proponerse la siguiente forma del Principio de Optimalidad de Bellman Extendido:

$$f^*(j,k)_{\Theta_i} = \mathrm{Min}\left\{ f^*(i,k-1) \langle + \rangle C_{tr}\left({}^{k-1}_{i}, {}^{k}_{j} \right) \right\}_{\Theta_i},\ \left\{ \forall i \in (k-1) \right\} \quad (18)$$

siendo: $f^*(i,k-1)$, $C_{tr}\left(^{k-1}_{i},^{k}_{j}\right)$ y $f^*(j,k)$ números difusos, acotados según un riesgo intrínseco Θ_i (j, k) $= \text{Max}\left\{\Theta_i\left[f^*(i,k-1)\right]; \Theta_i\left[C_{tr}\left(^{k-1}_{i},^{k}_{j}\right)\right]\right\}$ (el mayor de los riesgos intrínsecos de los operandos); y $\langle + \rangle$ la adición extendida. El espacio de búsqueda donde tal dinámica difusa será aplicada, resultará dividido en N etapas, cada una de las cuales exhibirá variantes (estados) valuadas en números difusos, generados por aplicación de (18). La variante óptima en cada etapa, tendrá una dominancia acotada por cierto umbral de riesgo intrínseco Θ_i. Como la trayectoria de evolución se obtiene recursivamente, a partir del conjunto ordenado de las variantes óptimas por etapa, e_k^*, *su riesgo intrínseco asociado resultará el mayor de los riesgos intrínsecos obtenidos en cada* e_k^* : $\Theta^T{}_i =$

$$\text{Max}\left\{\Theta_i\left(e_k^*\right)\right\}; \forall k = 1..N \qquad (19)$$

2.2.6. La Restricción de Riesgo Extrínseco y el Concepto de Sorpresa

El criterio MCRD es un complemento de la comparación parcial, aplicable cuando el riesgo intrínseco resulta inadmisible. Se introduce formalmente en el modelo, mediante una restricción que establezca cuál es la propensión al riesgo del tomador de decisiones. Se aceptarán trayectorias solución que exhiban un riesgo intrínseco menor o igual al impuesto externamente. Este umbral y su restricción asociada, se denominarán de Riesgo Extrínseco, $\Theta^T{}_{ex}$.

Se deberá cumplir: $\Theta^T{}_i = \text{Max}\left\{\Theta_i\left(e_k^*\right)\right\} \leq ;$ (20)

Si no se satisface (20), se procede de la siguiente forma: 1) Se identifica cuál es estado óptimo, e_k^*, que impone el $\Theta^T{}_i$. Tal estado se referirá como estado crítico, $e_{k\,Crit}^*$ y la comparación parcial correspondiente, como comparación parcial crítica; 2) Se aplica el criterio MCRD, eliminando aquella variante de mayor arrepentimiento en la comparación parcial crítica (que condujo a $e_{k\,Crit}^*$); 3) Se observa el conjunto modificado $\left\{\Theta_i\left(e_k^*\right)\right\}$ $\forall k = 1..N$, verificando, nuevamente, si se satisface (20). De no cumplirse, se repite el procedimiento desde 1). Al riesgo intrínseco así obtenido, luego de n eliminaciones de variantes óptimas por MCRD, se lo referirá como riesgo intrínseco de *n-ésima* opción, $\Theta^T{}_{i,n}$. De manera que $\Theta^T{}_{i,0} \equiv \Theta^T{}_i$. Cada aplicación del criterio MCRD, si bien disminuye el riesgo intrínseco de la trayectoria solución, implica una pérdida. La misma se relaciona con el rechazo de cierta variante para la cual, de ocurrir valores que vulneren el nivel de riesgo $\Theta^T{}_{i,n}$, podrían haber resultado costos de transición menores. Una medida de tal pérdida, la constituye el colapso del arrepentimiento originado en la preferencia de la variante rechazada, sobre la comparación parcial crítica. Considérese dos alternativas V_1 y V_2, valuadas en los números difusos V_1 y V_2, corrrespondientemente, sobre las que se define cierta comparación parcial crítica. Si V_1 y V_2 definen $e_{k\,Crit}^*$ con un cierto riesgo intrínseco de j-ésima opción, , y $\Theta^T{}_{i,j}$ V_1 resulta preferible a V_2 por aplicación del criterio MCRD, entonces $\text{Cpso}\{R[V_1| V_2]\} \leq \text{Cpso}\{R[V_2,| V_1]\}$. Por lo que la pérdida en cuestión, estará dada por $\text{Cpso}\{R[V_2,| V_1]\}$. Este valor será referido en el modelo como Sorpresa, S. Generalizando: Si $(V_1, V_2) \equiv e_{k\,Crit}^*$ con $\Theta^T{}_{i,j}$, entonces:

$$S^T{}_j = \text{Cpso}\{R[V_2,| V_1]\} \qquad (21)$$

y la Sorpresa Total, con un riesgo intrínseco $\Theta^T{}_{i,n}$,

$$\text{será: } S^T{}_n = \sum_{j=0}^{n} S^T{}_j \qquad (22)$$

Se concluye en que cada Trayectoria o Solución Dinámica, tendrá asociado, como medida de mérito, el siguiente Vector de Aceptación:

$$\left[T^S\right] = \begin{bmatrix} \Theta^T{}_{i,n} \\ S^T{}_n \end{bmatrix} \qquad (23)$$

2.2.7. Formulación del Modelo de Optimización Posibilística

Sea el problema dividido en N etapas y f una función de costo difusa cuyos m componentes, f_j, $j \in [1\ldots m]$ asociados a sendos criterios de optimización, son conocidos conforme cada transición entre etapas.

Entonces el problema se establece como sigue: Obtener recursivamente, según el nivel de riesgo intrínseco Θ_i:

$$f^*(j,k)_{\Theta_i} = \mathrm{Min}\left\{f^*(i,k-1)\ \langle + \rangle\ C_{tr}\left({}_{i}^{k-1}, {}_{j}^{k}\right)\right\}_{\Theta_i},\ \left\{\forall i \in (k-1)\right\}$$

$$\left\{\forall j \in k\right\} \text{ y } \forall k = 1..N \tag{25}$$

Sujeto a: (Restricciones de Riesgo y de Sorpresa)

1) $\Theta^{T}_{i,n} = \mathrm{Max}\left\{\Theta_{i,r}\left(e_k^{*}\right)\right\} \leq \Theta^{T}_{ex}$ (Riesgo Intrínseco de n-ésima opción $\leq$ Riesgo Extrínseco) (26)

2) $S^{T}_{n} \leq S^{T}_{ext}$ (Sorpresa de Orden $n \leq$ Sorpresa Extrínseca) (27)

La Trayectoria (o solución) T es difusa, puesto que existen infinitas ocurrencias en los segmentos de confianza acotados por $\Theta^{T}_{i,n}$, por las cuales el sistema puede evolucionar. Cada una de estas soluciones, satisface un Vector de Aceptación definido en (23). Es razonable imponer, eventualmente, la restricción 2) en el contexto de minimización considerado. La Sorpresa constituye una medida del costo (sobre costo) que podría haberse evitado por ocurrencias de las alternativas eliminadas (por aplicación del criterio MCRD).

2.3. El Grado de Desadaptación del Sistema basado en la Optimización Posibilística

Aplicado el programa formulado en (25), se obtienen segmentos de confianza para la función de costo, al nivel de riesgo $\Theta^{T}_{i,n}$, en cada etapa E de subdivisión del problema: $[f_1^{*E}, f_2^{*E}]_{\Theta^{T}_{i,n}}$, con cierta S^{T}_{n}. Si bien Si bien las consideraciones siguientes pueden hacerse sobre cualquier etapa, supóngase, sin pérdida por ello de generalidad, que $E \equiv N$. Este proceder resulta congruente con la forma en que se intenta evaluar la adaptación del sistema, al finalizar el período de control regulatorio en los SDEE. Sea m el criterio Costo de Inversión. Si son observados los valores reales de los costos, para cada uno de los $m-1$ criterios restantes considerados: $f_{r,j}^{N}$, con $j \in [1\ldots m-1]$, y se comparan con los respectivos segmentos de confianza al nivel $\Theta^{T}_{i,n}$, entonces existirá Adaptación

$$f_{r,j}^{N} \in [f_{1,j}^{*N}, f_{2,j}^{*N}]_{\Theta^{T}_{i,n}} \quad \forall ;j \in [1\ldots m] \tag{28}$$

A efectos de aclarar las ideas, se desarrollan pensando en la Adaptación Económica de un SDEE. La Adaptación Estricta, significa que todos los criterios valorizados económicamente, exceptuando las inversiones, se encuentran dentro de sus respectivos segmentos de confianza, al nivel de riesgo resultante, $\Theta^{T}_{i,n}$. El costo de Inversión es el criterio conductor en este modelo, ya que se reconoce previamente y se supone solidario a las mejoras en el resto de los criterios. En tal sentido, la expresión (28) intenta asegurar, en el contexto de incertidumbres aceptado, que las inversiones reconocidas en la planificación tuvieron el destino comprometido. El intento y no certeza, es consecuencia de la posibilidad de que las inversiones no fuesen realizadas tal y como fueron reconocidas, y sin embargo los costos de no calidad, atribuibles al resto de los criterios, se mantengan en niveles aceptables. El sistema, aún en tales condiciones y por efecto de las incertidumbres, se mantendría en una condición de adaptación estricta. Sin embargo, debe considerarse otro grado cualitativo de adaptación: si la expresión (28) no se satisface, pero se cumple que:

$$\sum_{j=1}^{m-1} f_{r,j}^{N} \text{ d'' } \sum_{j=1}^{m-1}\left(f_{2,j}^{*N}\right)_{\Theta^{T}_{i,n}} + S^{T}_{n} \tag{29}$$

entonces el sistema se encontrará Adaptado (en sentido amplio). En tal situación, se reconoce el efecto que pudiera tener la Sorpresa obtenida, como una medida de sobre-costo que alteraría la condición estricta, debido a que su posible ocurrencia fue aceptada en la optimización (posibilística) del sistema.

De estas consideraciones, se propone formular el Grado de Desadaptación del sistema, en la etapa N, como:

$$GrDeap_N = MAX \left\{ 0, \frac{\sum_{j=1}^{m-1} \left[f_{r,j}^{\ N} - \left(f_{2,j}^{\ *N} \right)_{\Theta^{T,n_i}} \right] + S^T_{\ n}}{\sum_{j=1}^{m-1} \left(f_{2,j}^{\ *N} \right)_{\Theta^{T,n_i}} + S^T_{\ n}} \right\} \quad (30)$$

el cual respeta los dos principios sustantivos del modelo: Distribuciones de Posibilidad y Arrepentimentos.

3. SECCIÓN II: LA APLICACIÓN DEL MODELO A UN SDEE REAL

3.1. El Contexto Regulatorio

El contexto regulatorio considerado, aplica un equema genéricamente designado con el nombre de Regulación por Incentivos. En este caso, existe un período de control, denominado período tarifario, en el que el Regulador controla los costos de las empresas distribuidoras. En tal período, de corto/mediano plazo, se deben optimizar las inversiones sujetas a restricciones de calidad eléctrico/ambiental, cuya violación supone la aplicación de penalizaciones. Específicamente, para el SDEE en estudio, perteneciente a la Provincia de Río Negro, Argentina, se consideran los siguientes aspectos: a) la Distribución separada de la Comercialización. Comprende la planificación y operación de las redes. El Costo de Distribución (CD) es el costo imputable a tal explotación, excluyéndose cualquier componente comercial; b) Al desacoplar costos e ingresos para el período de control, se enfatiza la necesidad de emplear modelos capaces de tratar con las restricciones de calidad; c) El problema de optimización es multi-criterio. Las variables asociadas a los mismos enfrentan un entorno de incertidumbres no estocásticas (fundamentales); d) La regulación fija valores para las penalizaciones referidas. Criterios no dominados se traducen, así, en valores económicos agregables (por caso: Energía No Suministrada e Inversiones: mayor costo de inversión $\Rightarrow$ menor costo por no calidad de suministro, por ello ninguno domina al otro).

3.2. Criterios Considerados para Evaluar el Mérito de las Soluciones Obtenidas

Los criterios considerados en la aplicación del modelo son:

INV: Inversiones; PERD: Pérdidas; ENS: Energía No Suministrada; ESMCC: Energía Suministrada en Malas Condiciones de Calidad y NCA: No Calidad Ambiental. El significado de cada uno se describirá seguidamente.

3.2.1. Incertidumbres Financieras

Se vinculan con la tasa de rentabilidad empleada para evaluar los costos equivalentes de capital. El enfoque CAPM (Capital Asset Pricing Model) desarrollado en (Bodie et. al, 1999), es el adoptado. Evalúa la tasa de rentabilidad mediante la expresión:

$$t_{CAPM} = t_f + r_{SIE} \times (t_m - t_f) \quad (31)$$

donde: t_{CAPM} es la Tasa de Rentabilidad según el enfoque CAPM; t_f recibe el nombre de Tasa de Rentabilidad Libre de Riesgo; r_{SIE} es el Riesgo Sistemático de la Industria Eléctrica; t_m es la Tasa de Retorno según una cartera diversificada (portfolio) de inversiones; y $(t_m - t_f)$ suele referirse como Premio por Riesgo del Mercado. Todos los parámetros de (31) pueden ser tratados como variables difusas, al incorporar su naturaleza incierta. Las operaciones involucradas satisfacen el principio de extensión. Se concibe, así, una tasa difusa de retorno que modela las incertidumbres de carácter financiero:

$$t_{CAPM} = t_f \langle + \rangle\ r_{SIE} \langle \times \rangle\ (t_m \langle - \rangle\ t_f) \quad (32)$$

La expresión (32) contiene una sustracción extendida que involucra a la tasa t_f, a su vez, sumando. Debe procederse en el cálculo con el cuidado que requiere la adecuada propagación de incertidumbres dependientes. Cada variante de equipamiento tendrá asignado un costo difuso de capital. Estará afectado de incertidumbres en los precios y, en menor medida, imputables a cambios tecnológicos. Se calcula una anualidad, a través de la expresión extendida al dominio difuso del Factor de Recuperación de Capital:

$$FRC_m = \left[\left\langle \frac{t_{CAPM} \langle \times \rangle \left(1 \langle + \rangle t_{CAPM} \right)^{\langle n_{vu^m} \rangle}}{\left(1 \langle + \rangle t_{CAPM} \right)^{\langle n_{vu^m} \rangle} \langle - \rangle 1} \right\rangle \right] \quad (33)$$

donde: n_{vu^m} : vida útil del equipamiento m expresada en años. Hay dos aspectos que merecen ser explicados: a) La tasa de interés (t_{CAPM}) representa el costo de oportunidad del capital. Al considerarla un número difuso, implica que su verdadero valor tendrá asociada una distribución de posibilidades. Por recuperación difusa del capital, a través de esta tasa, debe entenderse que cada unidad del capital exhibe una recuperación anual representada, también, mediante una distribución de posibilidades. El capital podrá o no ser recuperado a su verdadero costo de oportunidad. Puede que sea recuperado a un valor mayor o a un valor inferior. Esta constituye la incertidumbre fundamental modelada; b) En su formulación matemática determinística, el FRC resulta del desarrollo de una serie. Para su extensión al dominio difuso, debe procederse considerando las incertidumbres dependientes. La expresión (33) no puede ser calculada mediante las reglas de la aritmética difusa. Requiere un tratamiento en el cual, para cada valor de α, se observe el signo con que afectan las incertidumbres al resultado. Este método, denominado análisis de sensibilidad, es aplicable a todas las expresiones difusas con incertidumbres dependientes, en las que existen operaciones tales como la sustracción y/o división extendida. La expresión resultante, proviene de desarrollar linealmente por serie de Taylor la función FRC, en un entorno de su valor de máxima posibilidad (verosimilitud). Se obtiene un incremento difuso que, sumado a aquel, resulta en la variable difusa aproximada: $$\mathbf{FRC}_m = \mathrm{FRC}_m \left\langle + \right\rangle \Delta\mathbf{FRC}_m \tag{34}$$

3.2.2. Incertidumbres en la Demanda

El pronóstico de la demanda constituye una de las principales fuentes de incertidumbre para sistema. Pueden ser modeladas en base a una diversidad de métodos (Schweickardt, 2003) que van desde Modelos Econométricos, Analíticos hasta más sofisticados, que tratan con Econometría Difusa. A partir de cualquiera de ellos, es posible obtener una distribución de posibilidades asociada al pronóstico de demanda. Para la aplicación es un dato.

3.2.3. Incertidumbres en las Pérdidas de Potencia Activa

Las herramientas que son empleadas para el Análisis del Funcionamiento del SDEE en estudio, deben extenderse al dominio difuso. En particular, a efectos de calcular las pérdidas difusas, se requiere de la aplicación del Flujo de Potencia extendido a tal dominio (Miranda et. al., 1990). Esta herramienta permite estimar perfiles de tensión nodales y pérdidas del sistema mediante distribuciones de posibilidad. Al ser difusa la demanda global del sistema, lo serán las demandas en cada uno de sus nodos. De manera que el Flujo de Potencia Difuso, tomará como datos las demandas activa y reactiva difusas, por nodo, y generará las distribuciones de posibilidad mencionadas. Entre ellas, la de las pérdidas, conforme la modificación del método introducida en (Schweickardt, 2003). En las referencias citadas, particularmente en la primera, se encuentran muy detalladas las bases de su formulación. Interesan, a los efectos de imputarles un costo económico posteriormente, las pérdidas activas difusas. Para su cálculo no pueden emplearse operaciones extendidas, sino que debe recurrirse al análisis de sensibilidad. Ello permite tratar con las incertidumbres de las pérdidas en cada vínculo o rama, que son dependientes de las demandas de nodo. El procedimiento, muy sintéticamente, se describe mediante los siguientes pasos: a) Sobre el SDEE se corre un Flujo de Potencia, tomando como datos los valores de máxima verosimilitud ($\alpha = 1$) en cada distribución de posibilidad dato (P, Potencia Activa; Q, Potencia Reactiva y/o $|U|$, Módulo de Tensión, dependiendo del tipo de nodo). El vector de estado obtenido se refiere como punto de operación del sistema (PO); b) Se construye una Matriz de Sensibilidad en los vínculos, para cada tipo de Inyección (P, Q) en los nodos. Se recurre, para ello, a un desarrollo en Serie de Taylor, linealizando los flujos de potencia y pérdidas en cada vínculo. Estas matrices permiten identificar si, ante determinado incremento respecto del punto de operación, en cierta barra i, sobre la inyección P_i o Q_i, se genera un incremento del mismo signo en las pérdidas sobre el vínculo j del sistema. Los elementos se indicarán, por ello, como s_{ijP}, s_{ijQ}; c) Para cada valor de α y cada inyección P_i/Q_i, por ejemplo para la Potencia Activa, P_i: si s_{ijP} e” $0 \Rightarrow P_i(\alpha) = P_{iPO} + |\Delta P_{i,Der}(\alpha)|$, si $s_{ijP} < 0 \Rightarrow P_i(\alpha) = P_{iPO} - |\Delta P_{i,Izq}(\alpha)|$. Der - Izq: Representan las funciones de pertenencia a izquierda/derecha, respectivamente. Se procede igual sobre la Q_i; d) Se corre un Flujo de Potencia, con los nuevos vectores $[P_i]$,$[Q_i]$, resultando las pérdidas para el -corte considerado; e) Continúa el procedimiento $\forall \alpha \leq 1$, obteniéndose, en cada vínculo j del SDEE, las pérdidas difusas activas:

$$\mathbf{perd}_j = \mathrm{perd}_j \left\langle + \right\rangle \Delta\mathbf{perd}_j \tag{35}$$

Las pérdidas difusas totales, extendidas a todos los vínculos del SDEE, resultan:

$$\mathbf{perd}_T = \sum_{1}^{nv} \mathbf{perd}_j \tag{36}$$

3.2.4. Incertidumbres en la Energía No Suministrada

El criterio ENS se vincula a la continuidad del suministro (calidad del servicio técnico). Los dos aspectos que las regulaciones avanzadas controlan en tal sentido, son la Frecuencia de Interrupciones y la Duración Total de la Interrupción. En general, pueden integrarse en una única medida que pondere la energía no suministrada referida a cierto período (anual - semestral). En el modelo de confiabilidad aplicado, se consideran los siguientes aspectos: 1) La expresión genérica correspondiente a la ENS resulta:

$$\mathrm{ENS} = \xi \times T_M \times P_M \tag{37}$$

donde: ENS está referida a cierto período (año) [MWh/año]; ξ es la Tasa de Fallas o número de fallas por período (año) [fallas/año]; T_M es el Tiempo Medio de Interrupción [h] y P_M es la Potencia Media interrumpida en el período considerado (año) [MW]; 2) Los modelos de confiabilidad consideran procesos estocásticos, resultando así la tasa ξ. Al representarla como un número difuso, se tendrá una distribución de posibilidades asociada a la incertidumbre en la ocurrencia del valor más esperado de la variable aleatoria ξ. Idéntico razonamiento se aplica respecto de los parámetros T_M y P_M; 3) Se puede, entonces, concebir una ENS (difusa). Al considerar el principio de extensión sobre la expresión (37), la aritmética difusa resulta directamente aplicable, ya que la operación producto extendido no tiene impacto sobre las incertidumbres dependientes. Sin embargo, al intervenir las tasas de fallas y tiempos medios de interrupción individuales de cada componente de un sistema, debe procederse contemplando tal dependencia. Por ejemplo, en un sistema radial, para garantizar el suministro a cierto usuario se requieren en funcionamiento todos los componentes situados entre la fuente y el punto de suministro:

$$\xi_S = \sum_{i=1}^{NC} \xi_i \,;\, T_{MS} = \frac{1}{\xi_S} \times \sum_{i=1}^{NC} \xi_i \times T_{Mi} = \frac{\sum_{i=1}^{NC} \xi_i \times T_{Mi}}{\sum_{i=1}^{NC} \xi_i} \tag{38}$$

donde: el subíndice s refiere al sistema; el i a cada componente individual y NC es el número de componentes entre la fuente y el punto de suministro. Desde (8), procediendo por un análisis de sensibilidad, $\forall\ 0 \leq \alpha \leq 1$, se tienen las extensiones difusas:

$$\xi_S = \sum_{i=1}^{NC} \xi_i \,;\, T_{MS} = T_{MS} \langle + \rangle \Delta T_{MS} \tag{39}$$

y para cada alimentador principal:

$$\mathrm{ENS} = \left[\sum_{i=1}^{Nt} \xi_i \langle \times \rangle l_i \langle \times \rangle \left(\sum_{j=1}^{Na} P_j \langle \times \rangle T_{M\ j}^{\ a} \langle + \rangle \sum_{k=1}^{Nr} P_k \langle \times \rangle T_{M\ k}^{\ r} \right) \right] \tag{40}$$

donde: ξ_i es tasa de fallas (difusa) por unidad de longitud del tramo i [fallas/año-km]; l_i es la longitud del tramo i [km]; P_j, P_k son las potencias medias (difusas) en los nodos j, k, respectivamente [kW]; $T_{M\ j}^{\ a}$ es el tiempo medio de aislación de la falla (difuso) en el nodo j [h]; $T_{M\ k}^{\ r}$ es el tiempo medio de reparación de la falla (difuso) en el nodo k [h]; N_t es el número de tramos del alimentador; N_a es el número de tramos del alimentador sin servicio antes de aislar la falla; N_r es el número de tramos del alimentador sin servicio hasta reparar la falla; ENS es la Energía no Suministrada difusa [kWh]. Para los dos criterios restantes, ESMCC y NCA, el modelado de las incertidumbres resulta más claro al componer el costo difuso asociado a los mismos.

3.3. Costos Difusos Asociados a cada Criterio

3.3.1. Costo Difuso del Capital (CINV)

Se expresa mediante una anualidad difusa, CINV $= An_{V^{j,k}}$ [\$/año]. Mediante el Factor Difuso de Recuperación de Capital resulta:

$$An_{V^{j,k}} = \sum_{m=1}^{m_e} C_m \langle \times \rangle FRC_m = \sum_{m=1}^{m_e} C_m \langle \times \rangle \left[\left\langle \frac{t_{CAPM} \langle \times \rangle \left(1 \langle + \rangle t_{CAPM}\right)^{\langle n_{vu}{}^m \rangle}}{\left(1 \langle + \rangle t_{CAPM}\right)^{\langle n_{vu}{}^m \rangle} \langle - \rangle 1} \right\rangle \right] \tag{41}$$

donde: $An_{V^{j,k}}$: anualidad difusa para la variante v, en el estado j, de la etapa k; m es cada equipamiento empleado en tal variante, hasta m_e, y C_m es su costo difuso. El cálculo debe respetar la formulación (34).

3.3.2. Costo Anual Difuso de las Pérdidas (CPERD)

Requiere de un $\mathsf{CPD_E}$ [$/kW-año], estimado para el precio de compra de potencia, sobre las pérdidas difusas globales obtenidas. Se tiene (desde (36)):

$$\mathbf{CPERD} = \mathbf{CPD_E} \left\langle \times \right\rangle \mathbf{perd_T} = \mathbf{CPD_E} \left\langle \times \right\rangle \sum_{1}^{nv} \mathbf{perd_j} \quad (42)$$

3.3.3. Costo Anual Difuso de la Energía No Suministrada (CENS)

Las penalizaciones fijadas por la regulación argentina, por cada [kWh] de Energía no Suministrada, son valores determinísticos, no obstante pueda especularse sobre su incertidumbre como costo social de oportunidad.

El costo difuso CENS resultará del producto de la penalización, $\mathsf{p_{ENS}}$, y la expresión (40):

$$\mathsf{CENS} = \mathsf{p_{ENS}} \times \left[\sum_{i=1}^{Nt} \xi_i \left\langle \times \right\rangle \mathsf{l_i} \left\langle \times \right\rangle \left(\sum_{j=1}^{Na} \mathsf{P_j} \left\langle \times \right\rangle \mathsf{T_M}{}^{a}_{j} \left\langle + \right\rangle \sum_{k=1}^{Nr} \mathsf{P_k} \left\langle \times \right\rangle \mathsf{T_M}{}^{r}_{k} \right) \right] \quad (43)$$

3.3.4. Costo Anual Difuso de la Energía Suministrada en Malas Condiciones de Calidad (CESMCC)

La ESMCC se refiere a la Calidad del Producto Técnico Tensión de Suministro, en determinado punto del sistema. Las regulaciones más avanzadas penalizan esta no calidad a nivel usuario/nodo. Para valorizar el criterio ESMCC como un costo de no calidad difuso, se propone el siguiente método, representado en la Figura 3: 1) La tensión en cada nodo, para cierto estado de operación del sistema, está representada por una distribución de posibilidades (resultado del Flujo de Potencia Difuso). Esto implica que cada valor de tensión tiene asociada una posibilidad de ocurrir; 2) Cada tensión de nodo, podrá violar la tolerancia impuesta por la regulación, con cierta posibilidad. Es decir que podría existir un α-corte por debajo del cual, ocurrirían valores de la tensión que vulneren los límites de calidad impuestos. Por ocurrencia se interpretará, entonces, ocurrencia fuera del límite tolerado;

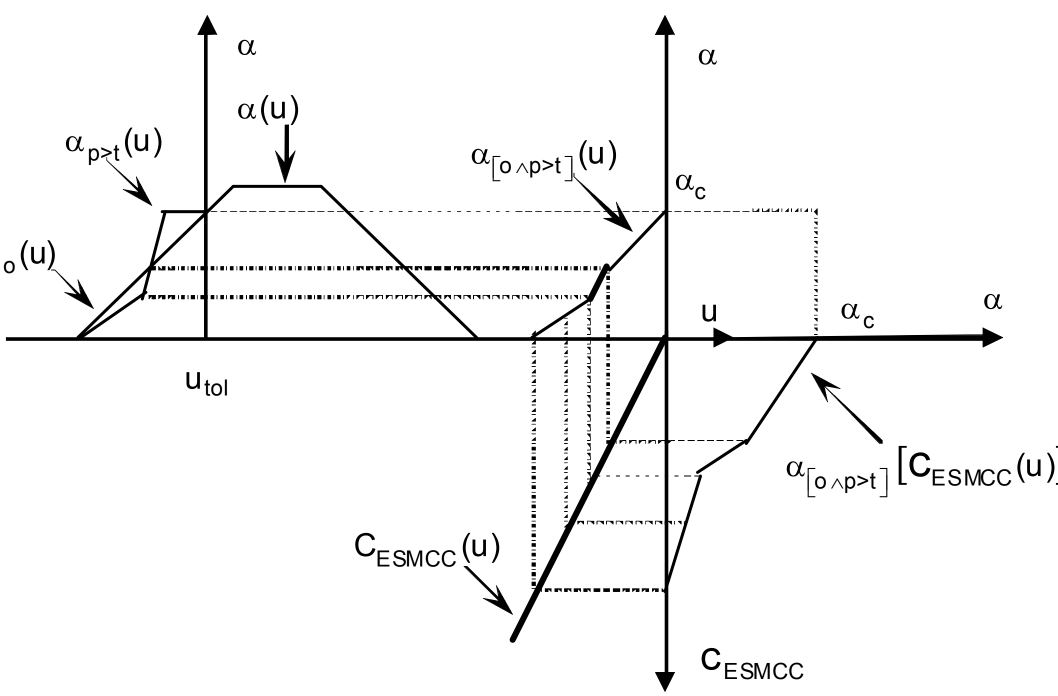

Figura 3. Construcción de la distribución de posibilidad del CESMCC

3) Adicionalmente, cada valor de tensión de nodo tendrá asociada una posible *persistencia*. Se define el significado de la variable *persistencia* en términos *linguísticos* (Dubois y Prade, 1980), como: *la tensión persiste más de un tiempo* t. Luego, la relación valor de tensión-persistencia puede representarse por otra distribución de posibilidades. Se adopta el valor de máxima verosimilitud de persistencia ($\alpha = 1$) para cada valor de tensión. Esto equivale a colapsar la distribución de posibilidades de persistencias, para cada valor de tensión, en su valor de máxima verosimilitud. De modo que puede construirse una nueva distribución de posibilidades, que permite asignar una única *posibilidad de persistencia*, a cada valor de tensión; 4) Luego, dado que la *ocurrencia* y la *persistencia* exhiben una evidente correlación (para que algo persista, primero debe ocurrir), se propone construir la distribución de posibilidades de la *variable lingüística*: *tensión fuera de tolerancia persistente más de un tiempo* t. Para ello se emplea una *convolución min* (Kaufmann y Gupta, 1985) de las dos distribuciones de posibilidad individuales (*ocurrencia* y *persistencia más de un tiempo* t), que se expresa como sigue:

$$\alpha_{\left[o \wedge p>t\right]}(u) = \alpha_o(u) \wedge \alpha_{p>t}(u) = \mathrm{Min}\left\{\alpha_o(u), \alpha_{p>t}(u)\right\} \qquad (44)$$

donde: u es la tensión; $\alpha_o(u)$ es distribución de posibilidades de la tensión fuera de tolerancia (*ocurrencia*) y $\alpha_{p>t}(u)$ es la distribución de posibilidades de la tensión *persistente* más de un tiempo t. Así $\alpha_{\left[o \wedge p>t\right]}(u)$ será la *distribución de posibilidades de la tensión fuera de tolerancia persistente más de un tiempo* t; 5) La penalización (costo) que la regulación impone por esta no calidad, puede expresarse como una función, $CESMCC(u)$, creciente con el valor de tensión no tolerada. La misma se supone lineal, aproximándo los escalones de penalización impuestos regulatoriamente. Por composición entre el conjunto difuso $\alpha_{\left[o \wedge p>t\right]}(u)$ y esta función, *se obtiene el costo difuso para cada [kWh] suministrado a la tensión difusa fuera de tolerancia, cuya persistencia es mayor que cierto tiempo* t. La función difusa $CESMCC(u) \equiv \alpha_{\left[o \wedge p>t\right]}\left[C_{ESMCC}(u)\right]$, queda, de tal modo, expresada en [$/kWh de ESMCC].

3.3.5. Costo Anual Difuso de la No Calidad Ambiental (CNCA)

El criterio NCA carece de un aspecto específico que sea valorizado económicamente. Si se reconoce la existencia de la siguiente jerarquía conceptual: *No Calidad Ambiental* $\rightarrow$ *Aspecto que debe ser considerado* $\rightarrow$ *Magnitud que lo representa*, entonces la incertidumbre en la valoración, se debe a que no se conoce precisamente: a) qué debe ser valorizado (magnitud involucrada) y b) resuelta la cuestión a), cuánto vale, socialmente, la magnitud definida en términos del bienestar que pueda generar. Se propone el procedimiento siguiente: 1) el aspecto que intenta ser valorizado en el marco del presente modelo de optimización, responde al Impacto Visual o Contaminación Visual; 2) Se definen zonas con diferente necesidad de calidad visual; 3) se consideran las magnitudes: a) km de Líneas y b) Número de Subestaciones de Transformación, cuyos típicos constructivos impactan visualmente; 4) Existe una penalización por cada apartamiento de un típico constructivo, respecto de su tolerado, conforme cada zona. Cada penalización, si bien es definida como un número, *exhibirá una clara incertidumbre de valor*. Por ello se adoptará un *costo difuso de penalización*; 5) Resumiendo estas consideraciones, la expresión empleada para estimar el $CNCA$, resulta:

$$CNCA = \sum_{z=1}^{Nzonas}\left[\sum_{j=1}^{Nnt}\left[\sum_{i=1}^{N_{Lin}^{z,j}} C_{Lin\,i,j}^{IV,z}\left\langle\times\right\rangle l_{i,j}^{z}\left\langle+\right\rangle\sum_{k=1}^{N_{Sub}^{z,j}} C_{Sub\,k,j}^{IV,z}\right]\right] \qquad (45)$$

donde: z: Zona; j: Nivel de Tensión; N_{Zonas}: Cantidad de Zonas Identificadas (por ejemplo: $1 \equiv$ Residencial, $2 \equiv$ Céntrica, $3 \equiv$ Rural, $4 \equiv$ Parque Nacional); Nnt: Cantidad de Niveles de Tensión (por ejemplo: $1 \equiv$ Baja Tensión, $2 \equiv$ Media Tensión, $3 \equiv$ Alta Tensión); $C_{Lin\,i,j}^{IV,z}$: Costo (Difuso) de Impacto Visual por Tipo Constructivo de Línea, no permitido para el tramo de línea i, en el nivel de tensión j, definido para la zona z [$/km de Línea-año]; : longitud del tramo i de línea en el nivel de tensión j, cuya traza está en la zona z [km];

$N_{Lin}^{z,j}$: Número de tramos de línea que violan los tipos constructivos definidos en la zona z, para el nivel de tensión j; $C_{Sub\,k,j}^{IV,z}$: Costo (Difuso) de Impacto Visual por Tipo Constructivo de Subestación no permitido, para la subestación k, en el nivel de tensión j, emplazada en la zona z [$/Subestación-año]; $N_{Sub}^{z,j}$: Número de Subestaciones que violan los tipos constructivos definidos en la zona z, para el nivel de tensión j.

3.4. Simulación

3.4.1. Generalidades de SDEE

El SDEE considerado, ubicado en Bariloche, en la patagonia argentina, cubre un área de 350 [km^2]. Sirve, aproximadamente, a 40000 usuarios cuya demanda es en su mayor parte comercial y residencial (80%). Se opera en anillo abierto, teniéndose alimentadores radiales. Es abastecido en 33 [kV] (Subtransmisión - SbT) y tiene tres subestaciones 33/13.2 [kV] (Media Tensión - MT). El sistema de Media Tensión, tiene cerca de 500 Subestaciones de 13,2/0,38 [kV] (Baja Tensión - BT). Esta ubicado en la punta del Sistema Interconectado Nacional Argentino y depende de una única línea de abastecimiento en 132 [kV]. Ante contingencias, se dispone de generacíon en reserva fría que cubre sólo el 40% de la demanda pico. La misma es de unos 40 MW y resulta de caracter fuertemente estacional, como consecuencia del turismo invernal. Las condiciones climáticas locales son relativamente extremas (nieve, hielo y fuertes vientos) y la geografía corresponde a una zona de montañas. Estos aspectos son importantes al momento de considerar la calidad, tanto de servicio/producto técnico, como ambiental (el paisaje es el principal atractivo para el turismo, que define la industria más importante de la ciudad). Las simulaciones se realizan sobre un área urbana que exhibe todas las características descritas arriba, cubriendo, aproximadamente, un 30% (extensión y demanda) del SDEE completo. En todas las variables de los criterios, las incertidumbres se han modelado mediante números difusos trapezoidales (NDTr). Este tipo de distribución de posibilidades es de aplicación frecuente en los sistemas de potencia. Se formulan mediante la notación ($ndtr_{izq;\,\alpha=0}$; $ndtr_{izq;\,\alpha=1}$; $ndtr_{der;\,\alpha=1}$; $ndtr_{der;\,\alpha=0}$), que son sus vértices. En ellos, parece violarse la normalización del conjunto difuso, pues existen infinitos valores de posibilidad $\alpha = 1$ ($\in$ [$ndtr_{izq;\,\alpha=1}$; $ndtr_{der;\,\alpha=1}$]. Se resuelve considerando el promedio [$ndtr_{izq;\,\alpha=1} + ndtr_{der;\,\alpha=1}$]/2 como valor central o más verosímil. Los valores monetarios asumen 1 $ = 1 dólar EEUU. Las magnitudes mensualizadas, son luego anualizadas.

3.4.2. Datos Considerados

No es posible porporcionar la totalidad de los datos, ni presentar todas las simulaciones efectuadas. Serán desarrollados aquellos aspectos que permitan observar la coherencia del modelo descrito con la optimización posibilística, planteando ciertos cálculos, y mostrando resultados que se comportan como entradas del tal optimización. El supraíndice MV, indicará el valor más posible (Máxima Verosimilitud).

A.- Tasa Difusa de Retorno: la tasa determinística, calculada por el método CAPM, resultó $t_{CAPM}^{MV} = 11.8\%$. La extensión al dominio difuso, arroja la expresión: $t_{CAPM} = ((t_{CAPM}^{MV} - 0.15 \times t_{CAPM}^{MV}); (t_{CAPM}^{MV} - 0.05 \times t_{CAPM}^{MV}); (t_{CAPM}^{MV} + 0.05 \times t_{CAPM}^{MV}); (t_{CAPM}^{MV} + 0.15 \times t_{CAPM}^{MV})) = (10.03; 11.21; 12.39; 13.57)\%$.

B.- Factor Difuso de Recuperación de Capital: Es función de la Etapa del sistema, clasificada como sigue: 1) ELSbT (30 años): Líneas de Subtransmisión en 33 [kV]; 2) ESbTMT (30 años): Subestaciones 33/13.2 [kV]; 3) ELMT (25 años): Líneas de Media Tensión en 13.2 [kV]; 4) EMTBT (20 años): Subestaciones 13.2/0.38 [kV] y 5) ELBT (20 años): Líneas de Baja Tensión. Con estos valores y la t_{CAPM} anterior, resulta: $FRC_{ELSbT} = FRC_{ESbTMT} = (0.1060; 0.1169; 0.1277; 0.1385)$; $FRC_{ELMT} = (0.1101; 0.1205; 0.1309; 0.1413)$ y $FRC_{EMTBT} = FRC_{ELBT} = (0.1174; 0.1272; 0.1371; 0.1470)$.

C.- Costo de las Pérdidas: Se adopta el valor fijado por CAMMESA (Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A) para la Etapa de Compra (E = SbT, en (42)): 5.4 [$/kW-mes]. Su extensión al dominio difuso sigue la misma regla que la t_{CAPM}, obteniéndose: $CPD_{ESbT} = (4.59; 5.13; 5.69; 6.21)$ [$/kW-mes].

D.- Costo de la Energía No Suministrada: Las penalizaciones que fija la regulación, dependen de la categoría tarifaria. Se tienen los siguientes valores: 1) Residencial y General (no industrial): 1.4 [$/kWh]; 2) Grandes Demandas en BT: 2.27 [$/kWh] y 3) Grandes Demandas en MT: 2.71 [$/kWh]. Se aplican sobre aquellas interrupciones mayores de 3 [min]. El período de referencia para las tasas de falla en los modelos de confiabilidad es el semestre, según el marco regulatorio. En el cálculo se anualiza.

E.- Costo de la Energía Suministrada en Malas Condiciones de Calidad: La penalización resulta aplicable cuando los niveles de tensión registrados vulneran los comprometidos durante un tiempo mayor al 3% del período de medición. Este es el sentido de definir una distribución posibilidad de persistencia, no obstante la hipótesis adoptada, que se explica más abajo en 1). Los valores de penalización se presentan en la Tabla1 (zona Urbana). Son definidas en términos de la variación de la tensión nominal: $\Delta u_u = |u_{Nom} - u| / u_{Nom}$, siendo u la tensión registrada. Considerando el alto grado de radialidad que caracteriza al sistema en estudio, se ha procedido del siguiente modo: 1) La persistencia de la tensión fuera de tolerancia, se supone un número determinístico igual a 1. Esto implica que la distribución de posibilidades de tensión de nodo fuera de tolerancia más de un tiempo t, se reduce a la distribución de posibilidades de la tensión de nodo (fuera de tolerancia) resultado del Flujo de potencia Difuso; 2) Las simulaciones (perfiles de tensión difusa), proceden cuando tiene lugar el pico de demanda; 3) Para la construcción de la curva de costos que requiere el procedimiento descrito en el apartado 3.3.4., se linealizaron (regresión lineal por mínimos cuadrados) los escalones de la TABLA 1. Se construye, entonces, la curva CESMCC (u).

Tabla 1: Penazaciones en Áreas Urbanas - ESMCC [$/kWh]

$0.05 \leq \Delta u^u < 0.06$? 0.013	$0.12 \leq \Delta u^u < 0.13$? 0.300
$0.06 \leq \Delta u^u < 0.07$? 0.026	$0.13 \leq \Delta u^u < 0.14$? 0.700
$0.07 \leq \Delta u^u < 0.08$? 0.039	$0.14 \leq \Delta u^u < 0.15$? 1.100
$0.08 \leq \Delta u^u < 0.08$? 0.052	$0.15 \leq \Delta u^u < 0.16$? 1.400
$0.09 \leq \Delta u^u < 0.10$? 0.070	$0.16 \leq \Delta u^u < 0.18$? 1.800
$0.10 \leq \Delta u^u < 0.11$? 0.086	$\Delta u^u = 0.18$? 2.000
$0.11 \leq \Delta u^u < 0.12$? 0.100	

F.- Costo de la No Calidad Ambiental: La penalización por NCA es valorizada en términos del apartamiento del típico constructivo empleado, respecto del establecido para cada zona. Se expresa como una fracción del costo correspondiente al típico constructivo establecido, que va en aumento con el grado de impacto visual provocado por el típico empleado. Las zonas identificadas son cinco, y van desde áreas rurales a zonas boscosas altamente protegidas de impactos. Como ejemplo, se presentan las penalizaciones para Típicos Constructivos (TC) de Subestaciones en MT, tal como se considera en la simulación. Para los TC de Líneas, el procedimiento es completamente análogo. Entre paréntesis se indica la penalización como fracción del costo del típico definido. Zona I: Típico Definido: Subterráneo; Apartamiento Bajo: Subestación a Nivel (0.2); Apartamiento Medio: Subestación con Plataforma (0.4); Apartamiento Alto: Subestación Monoposte (0.6). Los valores difusos se obtienen siguiendo la misma construcción presentada para la t_{CAPM}.

3.4.3. Formulación del Modelo de Optimización Posibilística

El problema de optimización se divide en 5 Etapas. Las variantes de equipamiento identificadas en el Corto Plazo (5 años), surgen como consecuencia de una optimización de Largo Plazo (10 años).

El espacio de búsqueda resultó: {Etapa I: 5 Variantes; Etapa II: 4 Variantes; Etapa III: 4 Variantes; Etapa IV: 3 Variantes; Etapa V: 1 Variante (final)}. A los efectos de que las variantes sean comparables, según aspectos financieros, el Agregado de Costos Económicos (CAgr) correspondiente a los criterios analizados, debe referirse a un mismo momento del tiempo. Por ello se formula la función Valor Presente Neto Difuso (VPN) del CAgr para el SDEE. La referencia, es la "etapa cero" (año 2003). El SDEE, tiene allí cierto costo CD_0, dado por el Valor a Nuevo de Reemplazo de sus componentes (criterio regulatorio). Entonces, en la variante/estado final del Espacio de Búsqueda, se tendrá una suma extendida: $CD_0 \langle + \rangle$ Min {VPN (CAgr)}, resultado de la dinámica. La Función Objetivo, siendo CD_0 invariable, resulta: FO = VPN (CAgr). El VPN determinístico, es definido como: $\text{Ó}^{n}_{i=1}\{CAgr_i/(1 + t_{CAPM})^i\}$. Deberá extenderse al dominio difuso, lo cual supone el cuidado con las incertidumbres dependientes (t_{CAPM}). El problema queda formulado, entonces, como sigue:

$$\text{MIN } \{ \text{FO} = \{ \text{Ó}^{n}_{j=1}\{CAgr_j/(1 \langle + \rangle t_{CAPM})^j \}_{\text{È}^{T}_{i}} \} \longrightarrow$$

$$CD_0 \langle + \rangle \text{ Min } \{ CD \}_{\text{È}^{T}_{i}}$$

Sujeto a:

$$1)\ \text{È}^{T}_{i,n} \text{ d" } \text{È}^{T}_{ext} = 0.8 \longrightarrow \text{Riesgo Extrínseco} \qquad (46)$$

2) S^T_n d" $S^T_{ext} = 0.3 \times MIN\{FO^{MV}\} \longrightarrow$ Sorpresa Extrínseca

S^T_{ext} se fijada en un 30% del valor más verosímil (MV) de la Función Objetivo. j representa la Etapa (I a V).

3.5. Resultados de la Optimización Posibilística y Cálculos de los Grados de Adaptación del SDEE

Los VPN(CAgr) en cada transición (Tr) entre etapas, para cada criterio en cada variante, se presentan en la Tabla 2. Se han subrayado los estados que integran la Trayectoria más Satisfactoria, que respeta las restricciones 1) y 2) de (46). En la Tabla 3, se presentan los VPN de los costos desagregados difusos, para cada criterio en tal Trayectoria. El riesgo intrínseco obtenido fue de $\Theta^T_{i,0} = 0.9$. Al no cumplirse la restricción 1), se aplica el criterio MCRD sobre la comparación parcial crítica, estado [1, III]. Se elimina la variante que no modifica la trayectoria, con un riesgo intrínseco $\Theta^T_{i,1} = 0.78$, que satisface 1). El valor de la Sorpresa, utilizando el criterio de colapso Removal, resulta inferior a la extrínseca: $S^T_1 = 47.5$ [k$/año]. El Vector de Aceptación para la Trayectoria más Satisfactoria, como vector fila o transpuesto, resulta: $[T^s]^{Transp} = [\Theta^T_{i,1} = 0.78;\ S^T_1 = 47.5\ ]$. En la Tabla 4, se aprecian los segmentos de confianza del CINV total al nivel de $\Theta^T_{i,1} = 0.78$, para cada etapa/año del quinquenio (suma de CINV a" CD al nivel $\Theta^T_{i,1}$ obtenidos en las transiciones entre etapas).

El cálculo del Grado de Desadaptación, hacia el final del período de control regulatorio, se presenta en la Tabla 5. En la primer fila se muestran los costos reales asociados a cada criterio, según las penalizaciones aplicadas. Para las pérdidas, el costo se calcula mediante la expresión (42), en su adopción determinística. En la segunda, se presentan los segmentos de confianza en los costos desagregados, al nivel $\Theta^T_{i,1} = 0.78$, obtenidos desde la Tabla 3. El Grado de Desadaptación del SDEE se presenta en la última fila, calculado mediante (30). El fin del período de control se corresponde con el año 2007 y la evaluación de la adaptación con principios del año 2008. El valor resultante fue: $GrDeap_N = 0.25$. Antes de aplicar la expresión (30), observando los valores pertinentes, el sistema no satisface la expresión (28), por lo que no podría encontrarse estrictamente adaptado.

Tabla 2: Costos Difusos Agregados [k$/año] para cada transición - Referidos a 2003

[Tr]	VPN(CAgr)				[Tr]	VPN(CAgr)			
[1,0; 1,I]	116.3	129.4	25.3	33.1	[2,II; 1,III]	96.30	106.6	19.4	25.3
[1,0; 2,I]	157.8	174.8	34.3	44.7	[2,II; 2,III]	104.7	115.9	21.1	27.5
[1,0; 3,I]	174.5	194.2	37.2	49.7	[2,II; 3,III]	108.3	120.8	21.9	28.6
[1,0; 4,I]	168.7	187.8	36.7	48.1	[2,II; 4,III]	163.4	180.8	32.6	42.8
[1,0; 5,I]	162.8	181.2	35.4	46.4	[3,II; 1,III]	125.7	139.0	25.3	32.9
[1,I; 1,II]	92.80	103.0	17.4	25.2	[3,II; 2,III]	109.9	121.5	22.9	29.6
[1,I; 2,II]	107.3	118.5	22.3	29.1	[3,II; 3,III]	103.8	112.2	20.0	25.9
[1,I; 3,II]	116.1	128.8	24.2	31.6	[3,II; 4,III]	141.4	156.5	24.4	37.1
[1,I; 4,II]	250.7	278.2	52.2	68.2	[4,II; 1,III]	121.4	135.5	24.5	31.9
[2,I; 1,II]	130.1	144.3	27.1	35.4	[4,II; 2,III]	109.2	121.7	22.6	29.4
[2,I; 2,II]	120.7	133.9	25.2	32.8	[4,II; 3,III]	105.8	116.9	20.0	26.3
[2,I; 3,II]	139.3	154.5	29.0	37.9	[4,II; 4,III]	188.5	208.6	37.9	49.5
[2,I; 4,II]	273.0	302.9	56.9	74.3	[1,III; 1,IV]	122.2	135.8	26.0	33.9
[3,I; 1,II]	149.3	164.3	30.8	32.8	[1,III; 2,IV]	183.3	203.7	38.2	50.9
[3,I; 2,II]	120.7	133.9	25.2	32.8	[1,III; 3,IV]	152.7	169.8	32.5	42.5
[3,I; 3,II]	182.0	201.9	34.0	49.5	[2,III; 1,IV]	219.8	244.4	46.8	61.2
[3,I; 4,II]	282.8	313.7	58.9	76.9	[2,III; 2,IV]	140.5	156.2	29.9	39.0
[4,I; 1,II]	134.7	149.4	28.1	36.6	[2,III; 3,VI]	171.0	190.1	36.4	47.6
[4,I; 2,II]	130.0	144.2	27.1	35.4	[3,III; 1,IV]	142.3	159.1	31.2	41.0
[4,I; 3,II]	195.0	216.4	40.6	53.1	[3,III; 2,IV]	158.9	176.5	32.9	44.1
[4,I; 4,II]	282.0	312.9	58.2	76.7	[3,III; 3,IV]	154.1	179.2	36.3	44.0
[5,I; 1,II]	106.8	118.5	22.3	29.0	[4,III; 1,IV]	177.2	196.9	35.9	49.3
[5,I; 2,II]	130.0	144.2	27.1	35.4	[4,III; 2,IV]	172.1	191.6	37.4	48.3
[5,I; 3,II]	156.7	173.9	30.1	42.6	[4,III; 3,IV]	151.8	168.6	31.1	41.3
[5,I; 4,II]	195.0	216.4	40.6	53.0	[1,IV; 1,V]	123.2	136.8	24.9	35.9
[1,II; 1,III]	83.80	92.7	16.8	21.9	[2,IV; 1,V]	165.4	183.7	35.1	45.9
[1,II; 2,III]	96.30	106.6	19.4	25.3	[3,IV; 1,V]	183.7	204.2	38.9	51.0
[1,II; 3,III]	117.3	129.8	23.6	30.8					
[1,II; 1,III]	175.9	196.7	35.4	46.2					
$[T^S]^{Transp} = [\ \Theta^T_{i,1} = 0.78;\ S^T_1 = 47.5\ ]$									

Tabla 3: **VPN** [k$/año] Desagregado en cada Criterio para la Trayectoria Más Satisfactoria

ETAPA I:	{ CINV[61.7; 68.6; 13.4; 17.6]; CPERD[13.9; 15.5; 3.0; 4.0]; CENS[11.6; 12.9; 2.5; 3.3]; CESMCC[5.80; 6.50; 1.30; 1.60]; CNCA[23.3; 25.9; 5.10; 6.60] }
ETAPA II:	{ CINV[109.8; 122.1; 22.8; 30.7]; CPERD[25.1; 27.9; 5.2; 7.0]; CENS[21.9; 24.3; 4.5; 6.1]; CESMCC[11.4; 12.7; 1.30; 3.20]; CNCA[40.9; 45.5; 8.50; 11.4] }
ETAPA III:	{ CINV[157.2; 174.5; 32.4; 43.1]; CPERD[32.6; 36.3; 6.7; 8.9]; CENS[32.8; 36.4; 6.7; 8.9]; CESMCC[16.9; 18.7; 2.4; 4.6]; CNCA[53.4; 59.3; 11.10; 14.70] }
ETAPA IV:	{ CINV[209.7; 232.9; 43.6; 57.7]; CPERD[47.3; 52.5; 9.8; 13.0]; CENS[56.0; 62.2; 11.7; 15.4]; CESMCC[30.3; 33.7; 5.2; 8.3]; CNCA[71.8; 79.7; 14.90; 19.80] }
ETAPA V:	{ **CINV**[257.8; 286.2; 53.3; 71.7]; **CPERD**[62.1; 68.9; 12.8; 17.3]; **CENS**[79.4; 88.1; 16.4; 22.3]; **CESMCC**[42.6; 47.4; 7.7; 11.9]; **CNCA**[96.4; 107.1; 19.9; 27.0] }

TABLA 4: Segmentos de Confianza del **CINV** [k$/año] – **CD** al nivel $È^{T}_{i,1}$ = 0.78 referidos al año 2003

ETAPA I:	[58.00; 73.30]	!	ETAPA II:	[103.8; 130.3]	!
ETAPA III:	[148.6; 185.9]	!	ETAPA IV:	[198.1; 248.2]	!
ETAPA V:	[243.6; 305.3]				

TABLA 5: Grado de Desadaptación del SDEE para el fin del período de control evaluado en el año 2008

Perd = 70.8	ENS = 245.7	ESMCC = 61.2	NCA = 93.4
Perd[59.3; 72.7]	**ENS**[71.3; 93.0]	**ESMCC**[40.9; 50.0]	**NCA**[92.2; 113.0]
$GrDeap_N$ = 0.25			

El Grado de Desadaptación obtenido, revela el hecho de que las inversiones en Calidad de Servicio – Continuidad de Suministro (Criterio a minimizar ENS), no se han realizado conforme fueron comprometidas. En menor medida, lo mismo ocurre con la Calidad del Producto Técnico –Nivel de Tensión (Criterio a Minimizar ESMCC). Puede observarse que, no obstante no hacerlo el costo de ESMCC, las pérdidas se mantienen en su segmento de confianza. La respuesta, para el SDEE analizado, es que en ciertas redes de baja tensión, no se han hecho inversiones, afectando sensiblemente la frecuencia de los reclamos y las penalizaciones por ESMCC, sin que las pérdidas globales se vean afectadas.

4. CONCLUSIONES

1.- El Modelo de Optimización Posibilística, resulta de aplicación general para problemas en los cuales se intente preservar una representación de las incertidumbres que afectan a múltiples criterios. Se requiere, como condición, que los mismos tengan una medida de mérito común (agregable). No obstante, ha sido concebido para tratar especificamente con la Planificación (de Corto/Mediano plazo) de SDEE, sujetos a esquemas regulatorios por incentivos. La forma en que los criterios difusos han sido formulados, y costeados, es original. Pero pueden existir otras propuestas que se adecúen mejor a otros contextos regulatorios.

2.- Mediante la introducción de elementos tales como: la comparación parcial, el riesgo intrínseco, el criterio del Mínimo Colapso de los Arrepentimientos Difusos y la Sorpresa, el modelo propuesto es congruente con un paradigma económico referido como Post-Keynesiano. Desde Keynes, surgen los conceptos de incertidumbre fundamental y racionalidad acotada (conocimiento imperfecto), que caracterizan un Universo de Decisión tal como el considerado en el modelo. Es así como el concepto de adaptación de un SDEE, según se ha definido en el presente trabajo, constituye un enfoque alternativo al que surge del paradigma económico Neo-Clásico, con una diferencia sustantiva: se proporciona una definición operacional para el Grado de Desadaptación.

3.- La Optimización Posibilística arroja, solidarios a la trayectoria más satisfactoria de expansión del sistema, segmentos de confianza para el costo económico de cada criterio, al nivel del riesgo intríseco resultante. El criterio costo de inversión, se considera el conductor, ya que es reconocido previamente y su destino se corresponde con la mejora en los restantes criterios, los cuales miden la aptitud del sistema. Por ello, en las definiciones de adaptación (estricta y en sentido amplio), sólo intervienen estos últimos. Su valorización responde a las penalizaciones aplicadas en concepto de no calidad, en general.

4.- Respecto del Grado de Desadaptación propuesto, se observa que el sistema podría permanecer adaptado, aún con inversiones más bajas que las comprometidas en el plan de expansión, por efecto del azar. Por otra parte, si bien la aplicación de este concepto es estática (al finalizar el período de control), su concepción es de naturaleza dinámica y sus componentes de cálculo reflejan este aspecto. La relevancia de estas dos cuestiones estriba en que el sistema exhibe un carácter histórico-evolutivo, el cual puede originar una sucesión de desequilibrios, compensatorios entre sí, los cuales pueden conferirle, dinámicamente, un estado de adaptación.

5.- Finalmente, se destaca que la definición propuesta de Grado de Desadaptación permite detectar si las penalizaciones aplicadas representan un costo económico. Si el sistema se encontrase adaptado y uno de los criterios exhibiese un costo muy elevado respecto de su segmento de confianza, el regulador debería reconsiderar si la penalización aplicada por la no calidad de tal criterio, representa su costo social de oportunidad. El razonamiento se extiende a varios criterios que se encuentren simultáneamente en esta situación.

REFERENCIAS

1. Bellman R., Dreyfus E., 1962, Applied Dynamic Programming. Princeton University Press.
2. Bellman R., Zadeh L., 1970, Decision-Making in a Fuzzy Environment. Management Science. 17, pp. 141-164.
3. Bodie Z., Kane A., Marcus A., 1999, Investments. Irwin/Mc Graw-Hill Series in Finance, Insurance and Real Estate, 4th Edition.
4. Doubois D., Prade H., 1980, Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications. New York, London, Toronto Press.
5. Kaufmann A., Gupta M., 1985, Introduction to Fuzzy Arithmetic. Theory and Applications. Van Nostrand Reinhold Electrical/Computer Science and Engineering Series.
6. Lavoie M., 1992, Foundations of PostKeynesian Economic Analisys, Edward Elgar Publishing.
7. Miranda V., Matos M., Saraiva J., 1990, Fuzzy Load Flow. Proceedings of the 10th PSCC 90, Graz, Austria.
8. Miranda V., Proença L., 1997, Why Risk Analysis Outperforms Probabilistic Choice as Effective Decision Support Paradigm for Power System Planning. Proceedings IEEE Summer Power Meeting, July.
9. Schweickardt G., 2003, Metodología para la Asignación de Costos en la Función Técnica de Transporte sobre el Mercado de Distribución. Editorial Fundación Universidad Nacional de San Juan, Argentina.
10. Schweickardt G., Miranda V., 2007 a, A Fuzzy Dynamic Programming Apporach For Evaluation Of Expansion Distribution Cost In Uncertainty Environments. Journal LAAR, Vol 37, Nro. 4, pp. 227-234.
11. Schweickardt G., Miranda V., 2007 b, Un Modelo De Planificación y Control Orientado a La Adaptación Económica de Sistemas de Distribución De Energía Eléctrica. Revista EPIO. 28, pp. 30-49.
12. Schweickardt G., Pistonesi H., 2007, Discusión sobre el Concepto de Sistema Económicamente Adaptado Aplicado a las Redes de Distribución Eléctrica. Revista Energética, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 37, pp. 53-65.
13. Yager R., 1977, Multiple Objective Decision Making Using Fuzzy Sets. Intl. J. Man-Machine Studies. 9, pp. 53-64.