UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MANIZALES

Energética

Adaptación económica y control regulatorio en sistemas de distribución. Un modelo posibilístico de optimización dinámica.

Economic Adaptation and Regulatory Control in Distribution Systems. A Possibilistic Model of Dynamic Optimization

Gustavo Schweickardt[a*]

Recibido: septiembre 03 de 2014
Recibido con revisión: abril 08 de 2015
Aceptado: mayo 29 de 2015

[a]*Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay,
Ing. Pereira 676 - 3260,
Concepción del Uruguay, Argentina
Tel.: +(54) 3442 423898
gustavoschweickardt@conicet.gov.ar

Energética 45, junio(2015), pp. 5-21

ISSN 0120-9833 (impreso)
ISSN 2357 - 612X (en línea)
www.revistas.unal.edu.co/energetica

RESUMEN

El concepto de Sistema de Distribución Económicamente Adaptado, se sustenta en el Paradigma Económico Neo-Clásico, referido en el estado del arte como dominante. Se lo vincula sólo a la eficiencia productiva que implica la expansión y operación del sistema a mínimo costo. Ignora las incertidumbres o bien les confiere un carácter estocástico que no necesariamente exhiben. En este trabajo se presenta un modelo alternativo para evaluar el grado de desadaptación del sistema, en los períodos de control tarifario fijados regulatoriamente. El modelo, sustentado en la optimización dinámica multicriterio bajo condiciones de incertidumbres no estocásticas, es solidario a un paradigma diferente, desde la visión de Riesgo e Incertidumbre propuesta por el Pos-Keynesianismo. Se aportan, como resultados más relevantes, una marcada diferenciación entre la Optimización Estática, sustentada en los métodos clásicos asociados al Paradigma Dominante, respecto de la Dinámica no Estocástica propuesta en el Modelo Posibilístico, así como un completo y novedoso desarrollo teórico para su aplicación sobre un estudio de caso real.

PALABRAS CLAVE

Adaptación Económica; Control Regulatorio; Incertidumbres; Optimización Multicriterio Posibilística; Riesgo; Sistemas de Distribución.

ABSTRACT

The concept of Economically Adapted Distribution System, is based on the Neo-Classic Economics Paradigm. It is related only to the productive efficiency, which implies the expansion and operation of system with a minimum cost. It ignores the uncertainties, or it renders them a stochastic nature, which they do not necessarily show to have. In this work, a model to evaluate the De-adaptation System degree, in the regulatory control periods, is presented. The model, based in Multicriteria Optimization and non stochastic incertainties, suggest a change of paradigm from the approach of Incertainty and Risk proposed by Pos-Keynesianism. A strong difference between Static Optimization respect to Non Stochastic Dynamic, proposed in the Possibilistic Model, and a complete and new theoretical development, for application in a real Case of Study, are presented as important results and conclusions of this work.

KEYWORDS

Economic Adaptation; Regulatory Control; Incertainties; Possibilistic Multicriteria Optimization; Risk; Distribution Systems.

Energética 45 junio (2015), pp. 5-21

1. INTRODUCCIÓN

La definición de un Sistema de Distribución de Energía Eléctrica (SDEE) Económicamente Adaptado, es un concepto que la Autoridad Regulatoria Eléctrica, ha acuñado e introducido en las normativas de diferentes países. Entre ellos, Chile, Argentina, Colombia y Perú, en Latinoamérica, y España y Portugal, en Europa. Tal concepto sólo destaca la *eficiencia productiva* del sistema (expansión y operación a mínimo costo). Cualquier apartamiento de tal condición, una vez que su planificación está disponible, es juzgado como una *desadaptación del sistema* y, por tanto, penalizada. La *eficiencia asignativa*, requerimiento sustancial para conferirle a tal costo un carácter económico, se introduce como hipótesis o condición dada, y los diferentes productos que deben ser ofertados en la prestación del servicio (calidad eléctrica, calidad ambiental, eficiencia energética, entre otros) se suponen, de tal modo, valorizados a su costo social de oportunidad. La sola planificación, sustentada en métodos de optimización clásicos (afines con el paradigma económico dominante) no es suficiente para juzgar desadaptaciones. Esta aseveración se fundamenta, al menos, en cuatro razones [Schweickardt, 2007]: a) la planificación pretende determinar un costo mínimo, enfrentando un problema de optimización multicriterio, en el cual varios criterios carecen de valoración económica objetiva (la no-calidad eléctrica y/o ambiental, por caso); b) muchas de las variables de optimización involucradas en el problema exhiben incertidumbres de carácter no estocástico (situación ignorada por el paradigma dominante), cuyo tratamiento limita, metodológicamente, el empleo de modelos de optimización clásicos; c) bajo la suposición de que todos los criterios del problema tienen asociado un costo de oportunidad (valor económico) y se vinculan con variables determinísticas, excepcionalmente podrá juzgarse adaptado un sistema real al finalizar el período de control regulatorio, aún habiéndose partido de un diseño económicamente adaptado al comienzo; y, por ultimo, d) no existe un criterio uniforme para juzgar las desadaptaciones (normalmente, se apela a un sobre-costo en el equipamiento existente, considerando que la demanda servida resulta menor que la pronosticada).

En este trabajo se presenta un modelo de solución formal para introducir el concepto de Adaptación Económica de un SDEE, intentando superar los inconvenientes metodológicos y operacionales expuestos.

Para abordar el desarrollo del Modelo Posibilístico propuesto, se recurre a un esquema de *tres etapas*. En la Etapa I, se parte de la información sobre las preferencias que los distintos criterios intervinientes en la optimización exhiben, comparándolos de a pares. Son consideradas sus incertidumbres de valor, de modo que la matriz asociada no es determinística. Se ha optado modelar tales incertidumbres mediante Números Difusos, cuyas consideraciones básicas serán introducidas más adelante. Las preferencias resultarán, entonces, Distribuciones de Posibilidades, habida cuenta de la equivalencia entre las mismas y tales números [Dubois & Prade, 1980; Zadeh, 1971]. Se desarrolla un enfoque metodológico para lograr el conjunto de valores de preferencias más consistente y, finalmente, obtener el Vector de Prioridades sobre las mismas que resulte más representativo sobre los criterios de optimización. En la Etapa II, se aborda la planificación en el mediano/corto plazo del SDEE, en el marco propiciado por las técnicas de la Programación Dinámica Difusa. El modelo empleado arrojará un conjunto de trayectorias posibles de evolución, a las que se les confiere el carácter de satisfactorio, por encima de cierto umbral de riesgo que el planificador está dispuesto a enfrentar. La Etapa III, se enfoca en el Control de Adaptación del Sistema, sobre una trayectoria (escenario de riesgo) escogida y admitida como satisfactoria. Se concibe un Vector de Adaptación Dinámica del Sistema, solidario a una eventual sucesión de desequilibrios que tienen lugar en su evolución.

Este modelo conjunto pretende: a) desarrollar los aspectos teóricos requeridos para definir e introducir operacionalmente en el problema de decisión el Riesgo Intrínseco, asociado a cierta solución satisfactoria; y b) dar un tratamiento formal al concepto de Adaptación (Desadaptación) Económica del Sistema. Puede hablarse de un Modelo Posibilístico, dado que los conjuntos difusos empleados, también en los criterios de optimización, serán *normales* y *convexos*, que pueden considerarse como Distribuciones de Posibilidad.

2. ASPECTOS METODOLÓGICOS DEL PROBLEMA

2.1. Riesgo e incertidumbres no estocásticas en las variables de decisión

La corriente del pensamiento económico en la que se sustentan, metodológicamente, los esquemas regulatorios aplicados a los SDEE, no reconoce distinción entre las nociones de riesgo e incertidumbre [Lavoie, 1992]. Los procesos de toma de decisión, conforme el Paradigma Neo-Clásico, se establecen en un entorno de riesgo tal, que puede representarse por algún conjunto equivalente de situaciones de certeza. En última instancia, esto implica sostener que, en el Universo de Decisión, todos los estados de la naturaleza y las posibles alternativas, son susceptibles de modelar mediante alguna distribución de probabilidades.

El paradigma alternativo Post-Keynesiano [Lavoie, 1992; Schweickardt, 2007], destaca la siguiente caracterización de incertidumbre propuesta por Keynes:
Existe incertidumbre cuando la probabilidad de un resultado es desconocida, cuando el valor de un resultado es desconocido, cuando los resultados que posiblemente pueden ser consecuencia de una opción son desconocidos, o cuando el espectro de posibles opciones es desconocido. Se tienen, entonces, *dos tipos de incertidumbres:* 1) de probabilidad; y 2) la que se corresponde

caracterización dada, y que Keynes refiere como *incertidumbre fundamental*.

El *riesgo* se torna así en *una medida de arrepentimiento por seleccionar, en un contexto de incertidumbre, aquello que se juzgó preferible, sin serlo en su ocurrencia.*

Una alternativa metodológica para su representación, es mediante los Conjuntos Difusos. La misma resulta de plena conformidad con la Teoría de Posibilidades, para la cual se demuestra que un Número Difuso, conjunto difuso normal y convexo, constituye una distribución de posibilidades [Dubois & Prade, 1980]. Desde estas consideraciones, se hablará de un tipo especial de *incertidumbre fundamental*: la *de valor*.

El Modelo propuesto en este trabajo, considera que el entorno dinámico de decisión se compone de variables que pueden tener, en general, cualquier tipo de incertidumbres y, en particular, *incertidumbres fundamentales de valor*. El *costo de la energía no suministrada* como consecuencia de una falla del SDEE, constituye un buen ejemplo.

2.2. Planificación de los SDEE

Las metodologías más difundidas en el estado del arte, emplean una estrategia de planificación de dos etapas. Conforme a este enfoque, se plantean los elementos del modelo y las simulaciones aquí presentadas. La *etapa inicial, corresponde al largo plazo, sobre un horizonte temporal de 10-15 años y se focaliza en la optimización espacial del sistema. La etapa final, corresponde al mediano/corto plazo, sobre un horizonte temporal de 5-7 años, y se focaliza en la optimización temporal del sistema [Schweickardt, 2007]*. La planificación de *mediano/corto plazo*, cuyo Modelo se propone aquí, optimiza sobre el conjunto de variantes de equipamiento que arroja la planificación de largo plazo, enfatizando su vínculo temporal. Es la que se corresponde con los *planes de inversión* presentados en oportunidad de las revisiones tarifarias, fijadas regulatoriamente. La estrategia pretende, de tal modo, lograr un conjunto de trayectorias solución, admitidas como *satisfactorias*. Intervienen múltiples objetivos/restricciones, que se expresarán como *criterios* del sistema, y cuyos méritos serán evaluados para componer las mejores trayectorias de evolución del SDEE.

A continuación se desarrollarán los elementos teóricos para las tres Etapas del Modelo propuesto.

3. ETAPA I: PREFERENCIAS ENTRE CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN Y EL VECTOR DE PRIORIDADES ASOCIADO

3.1. Vector de Prioridades desde el Enfoque de los Procesos Analíticos Jerárquicos

La técnica de Procesos Analíticos Jerárquicos [Saaty, 1977], propone un método para establecer una escala de preferencias entre *n* criterios, a través de un vector denominado de Prioridades. Se inicia formando una matriz de preferencias, indicada como *MPA*, cuyas entradas, *aij*, se definen a partir de una escala de dominancia establecida sobre el intervalo *[1..10]* de números enteros. Los criterios se comparan de a pares, siendo *aij* la preferencia del criterio *i* respecto del criterio *j*. De forma tal que *MPA* resulta una matriz cuadrada de orden *n* (número de criterios), positiva y recíproca. Siendo *aij* un entero positivo en el intervalo *[1..10]*, entonces, formalmente:

$$MP_A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \begin{cases} a_{ij} > 0 \ \forall\, i, j = 1...n \\ a_{ji} = \dfrac{1}{a_{ij}} \end{cases} \quad (1)$$

El Teorema de Perron [Lax, 1997]. Garantiza, para tal matriz, la existencia de un autovalor dominante y positivo, λ_P, así como de su correspondiente autovector, V_P, cuyos componentes son también positivos.
Se cumple que:

$$\lambda P \geq n \quad (2)$$

y sólo si MP_A exhibe preferencias consistentes, resultará:

$$\lambda_P = n \quad (3)$$

La condición de consistencia expresada en [Saaty, 1977], establece que, en (1):

$$a_{ik} = a_{ij} \ x \ a_{jk} \quad ; \quad \forall i, j, k = 1 \ldots n \quad (4)$$

La expresión (4), es introducida para establecer el denominado Índice de Consistencia de Saaty, IC_{Saaty}, el cual permite ponderar el grado de transitividad entre las preferencias sobre los *n* criterios para la optimización del sistema. Tal índice es definido como:

$$IC_{Saaty} = (\lambda_P - n)/(n-1) \quad (5)$$

Por otra parte el autovector de Perron, V_P, asociado a MP_A, satisface el Principio de Composición Jerárquica [Saaty, 1977], definido como (cuando $V = V_P$):

$$MP_A \ x \ V = c \ x \ V \quad (6)$$

si $c = \lambda_P$ y $V = V_P$.

V_P resulta ser el Vector de Prioridades en las preferencias sobre MP_A, entre los criterios del sistema.

3.2. Incertidumbres de Valor en las preferencias entre los criterios

En este punto se presenta un importante aporte del presente trabajo. Se desarrollará el procedimiento de cálculo hasta, arribar al Vector de Prioridades que represente mejor a las preferencias establecidas, bajo condiciones de *incertidumbre de valor*.

A) La Matriz de Preferencias Difusas: un enfoque realista sobre las preferencias entre los criterios de optimización, requiere considerar sus *incertidumbres de valor*. Su modelación es realizada mediante Números Difusos (ND). Un ND puede ser definido mediante el acoplamiento de un Segmento de Confianza y un Nivel de Certidumbre (variable α o α–corte) [Kaufmann & Gupta, 1985], indicando con los subíndices 1 y 2 los extremos inferior y superior, respectivamente, de tal segmento. Es decir, ***pref*** es un ND, expresado como:

$$\forall\ \alpha \in [0,1],\ \boldsymbol{pref} = [\ pref_1(\alpha)\ ,\ pref_2(\alpha)\ ] \qquad (7)$$

En la Figura 1 se presenta una preferencia valuada mediante un Número Difuso Triangular (*NDT*). El sufijo *Izq*, refiere el *valor inferior*, 1, del Segmento de Confianza; *Der*, el *superior*, 2, y *MP* el *central* o de Máxima Posibilidad. Si $\boldsymbol{pref_{ij}}$ indica la preferencia difusa entre los criterios *i* y *j*, extendiendo al dominio difuso la expresión (1), se obtiene la Matriz de Preferencias Difusas:

$$\boldsymbol{MPA}:\ \forall\ \alpha \in [0,1] \rightarrow$$

$$\begin{pmatrix} 1 & \boldsymbol{pref_{12}} & \cdots & \boldsymbol{pref_{1n}} \\ 1/\boldsymbol{pref_{12}} & 1 & \cdots & \boldsymbol{pref_{2n}} \\ \cdots & \cdots & \vdots & \cdots \\ 1/\boldsymbol{pref_{1n}} & 1/\boldsymbol{pref_{2n}} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \qquad (8\text{-A})$$

Siendo:

$$1/\boldsymbol{pref} = [\ 1/pref2(a)\ ,\ 1/pref1(a)\ ] \qquad (8\text{-B})$$

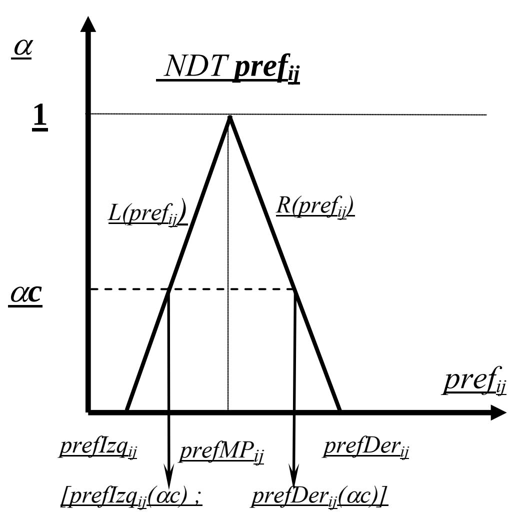

Figura 1: Una Preferencia Valuada mediante un NDT y su Segmento de Confianza para un Nivel de Certidumbre $\alpha = \alpha c$.
Fuente: Elaboración propia.

Las incertidumbres de cualquier preferencia $\boldsymbol{pref_{ij}}$ y de su recíproca, $\boldsymbol{pref_{ji}}$, son *dependientes*. Esto significa que si se presentase una ocurrencia $\boldsymbol{pref_{ij}}$ en el segmento de confianza limitado por α, entonces: $pref_{ji}(\alpha) = 1/pref_{ij}(\alpha)$. Con ello se garantiza que cualesquiera sean las ocurrencias en sus entradas, $MP_A(\alpha)$ es *determinística*, puesto que es una instancia (α) de $\boldsymbol{MP_A}$. $MP_A(\alpha)$ será referida como Matriz de Preferencias Colapsadas según el Nivel de Certidumbre (α). Se considerará, sin pérdida de generalidad, la matriz triangular superior. Establecidas las preferencias entre criterios, mediante (8), el objetivo es acotar las incertidumbres conforme cierto a-corte. Para obtener un Vector de Prioridades determinístico, que resulte el mejor representante de las preferencias difusas así acotadas, deberá reducirse cada segmento de confianza a un valor. Tal reducción, denominada en este contexto Colapso del *ND* [Schweickardt & Miranda, 2007]. En este trabajo, se emplea el criterio denominado Removal (*Rv*), según el cual el valor representativo del *ND*, por encima del α-corte establecido, $\alpha = \alpha c$, considerando (9), resulta de la siguientes expresiones:

$$Rv\left[\ pref(\acute{a}c)\right] = pref_{MP} + \frac{1}{2} \times \left[\ IDer\ \text{-}\ IIzq\right] \qquad (9\text{-A})$$

$$IDer = \int_{pref_{MP}(\pm c)}^{pref_2} R(pref)\,dpref \qquad (9\text{-B})$$

$$IIzq = \int_{pref_1(\pm c)}^{pref_{MP}} L(pref)\,dpref \qquad (9\text{-C})$$

R y *L* (ver Figura 1) son las funciones de pertenencia del ND a derecha e izquierda, respectivamente; pref es la variable real en el segmento establecido por αc. Este colapso del ND, se referirá como $Rv(\alpha c)$.

B) Las Ecuaciones de Consistencia en las Preferencias Matriz de Preferencias Difusas: si el valor representativo de las preferencias difusas para cierto (αc), está dado únicamente por (9-A) (o alguna otra forma de colapso), no se estaría considerando la consistencia entre las mismas, según (4). Dentro del segmento de confianza fijado por (αc), se requiere la búsqueda de aquellos valores tales, que la matriz $MP_A(\alpha c)$ resulte lo más consistente posible. De modo que los valores representantes de las preferencias dentro del segmento ($\alpha = \alpha c$), tendrán que cumplir dos objetivos: 1) que se aparten lo menos posible de su Rv(αc) y 2) que satisfagan lo más posible las ecuaciones de consistencia, para el conjunto de expresiones que surjan, conforme las entradas establecidas en $MP_A(\alpha c)$.Como se ha dicho, se considera la $MP_A(\alpha c)$ triangular superior. De manera que, ordenando por filas, el Sistema de Ecuaciones de Consistencia, respetando la formulación (4), para n criterios (orden de la matriz n x n), se expresa:

Sea $C = \{\ i\ [2..n\text{-}1];\ j\ [i{+}1..\ n]\ y\ k\ [1..i\text{-}1]\}$

Entonces:

$$\{\ pref_{ij}(\alpha c) = pref_{kj}(\alpha c)/pref_{ki}(\alpha c)\ \} \qquad (10)$$

Si (10) se satisficiera en todo el conjunto *C*, encontrando valores de preferencias en cada segmento de confianza fijado por (αc), $MP_A(\alpha c)$ resultaría *perfectamente consistente.*

<u>C) La Solución de las Consistencias de las Preferencias Colapsadas en el Nivel de Certidumbre (αc) mediante Programación Lineal Bi-Objetivo:</u> los dos objetivos según 1) y 2) en el punto B) anterior, pueden ser planteados en un Programa Lineal.Para ello, los errores (e) entre cada preferencia $pref_{ij}(\alpha c)$ y su $Rv[pref_{ij}(\alpha c)]$, y entre cada preferencia $pref_{ij}(\alpha c)$ y su formulación consistente según (10), pueden introducirse como factores. Por caso, si se buscara la máxima consistencia en cierta ecuación de sistema (10) en *C*, se tendría:

$$pref_{ij}(\alpha_c)\ xec_{ij}^{\ k} = pref_{kj}(\alpha_c)/pref_{ki}(\alpha_c) \qquad (11)$$

$siec_{ij}^{\ k} = 1$, entonces la consistencia resultaría perfecta. Se cumple $0 < ec_{ij}^{\ k} \leq 1$. Para el caso del apartamiento mínimo de $pref_{ij}(\alpha c)$ respecto del $Rv[pref_{ij}(\alpha c)$:

$$pref_{ij}(\alpha c)\ xerv_{ij} = Rv[pref_{ij}(\alpha c)] \qquad (12)$$

Con $0 < erv_{ij} \leq 1,\ \forall i \in [1..n-1]\ y\ \forall j \in [i+1..\ n]$. En consecuencia, el modelo puede linealizarse en sus restricciones, empleando variables logarítmicas. Sus objetivos serían la minimización, respectivamente, de la sumatoria de los valores absolutos de los logaritmos de los errores $ec_{ij}^{\ k}$, $ALec_{ij}^{\ k}$ *y* erv_{ij}, $ALerv_{ij}$. En principio, la introducción de la operación valor absoluto (considerando que pueden existir errores logarítmicos menores que cero), parecería generar objetivos no lineales. Esta cuestión se resuelve con el agregado de restricciones de desigualdad, que relacionen las variables asociadas a los valores absolutos de los errores logarítmicos, con los errores logarítmicos. Ambos objetivos, pueden ponderarse creándose una única función a minimizar: el valor absoluto del error total ponderado, *ALerrT*. Este método es el comúnmente aplicado para la Programación Lineal Multi-Objetivo, donde existen sólo dos objetivos.

De modo que el problema de optimización lineal que resuelve el conjunto de preferencias más representativo en la matriz $MP_A(\alpha c)$, se formula como sigue:

Min

$$\left\{ ALerrT = »_c \times \left(\sum_{i=2}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \sum_{k=1}^{i-1} ALec_{ij}^{k} + »_{rv} \times \left(\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} ALrv_{ij} \right)\right)\right\} \qquad (13\text{-}A)$$

Sujeto a:

[Restricciones de Consistencia – Desde (10)]

Sea $C = \{ \forall i \in [2..n-1];\ \forall j \in [i+1..\ n]\ y\ \forall k \in [1..\ i-1] \}$,

Entonces, en *C:*

$$Lpref_{ij}(\alpha c) + Lec_{ij}^{\ k} = Lpref_{kj}(\alpha c) - Lpref_{ki}(\alpha c) \qquad (13\text{-}B)$$

[Restricciones de Valor Absoluto de los Errores Logarítmicos de Consistencia]

$$ALec_{ij}^{\ k} - Lec_{ij}^{\ k} \geq 0 \qquad (13\text{-}C)$$

$$ALec_{ij}^{\ k} + Lec_{ij}^{\ k} \geq 0 \qquad (13\text{-}D)$$

$$ALec_{ij}^{\ k} \geq 0 \qquad (13\text{-}E)$$

[Restricciones de Apartamiento respecto de $Rv[pref_{ij}(\alpha c)]$ - Desde (12)]

Sea $C1 = \{ i\ [1..n-1];\ j\ [i+1..\ n] \}$*, entonces, en C1:*

$$Lpref_{ij}(\alpha c) + Lerv_{ij} = LRv[pref_{ij}(\alpha c)] \qquad (13\text{-}F)$$

[Restricciones de Valor Absoluto de los Errores Logarítmicos de $Rv[pref_{ij}(\alpha c)]$]

$$ALerv_{ij} - Lerv_{ij} \geq 0 \qquad (13\text{-}G)$$

$$ALerv_{ij} + Lerv_{ij} \geq 0 \qquad (13\text{-}H)$$

$$ALerv_{ij} \geq 0 \qquad (13\text{-}I)$$

[Restricciones de Segmento de Confianza [1,2] al Nivel de Certidumbre (αc)]

$$Lpref_{ij}(\alpha c) \geq Lpref_{ij}(\alpha c)1 \qquad (13\text{-}J)$$

$$Lpref_{ij}(\alpha c) \leq Lpref_{ij}(\alpha c)2 \qquad (13\text{-}K)$$

Siendo: λc, λrv los ponderadores fijados para los objetivos ($\lambda c + \lambda rv = 1$); $Lec_{ij}^{\ k}$ el logaritmo (en base *e*, por caso) del error multiplicativo $ec_{ij}^{\ k}$ y $ALec_{ij}^{\ k}$ su valor absoluto; $Lerv_{ij}$ el logaritmo del error multiplicativo erv_{ij} y $ALerv_{ij}$ su valor absoluto; $Lpref_{ij}(\underline{\alpha}c)$ el logaritmo del valor de la preferencia $pref_{ij}(\underline{\alpha}c)$; [$Lpref_{ij}(\underline{\alpha}c)1$; $Lpref_{ij}(\underline{\alpha}c)2$] el Segmento de Confianza logarítmico al nivel de certidumbre ($\underline{\alpha}c$) ($\underline{\alpha}c$ es dato del modelo); $LRv[pref_{ij}(\underline{\alpha}c)]$ es el logaritmo del Removal aplicado sobre $pref_{ij}(\underline{\alpha}c)$; *ALerrT* es el error logarítmico ponderado total en las $pref_{ij}(\underline{\alpha}c)$, por inconsistencias y apartamientos respecto sus colapsos $Rv[pref_{ij}(\underline{\alpha}c)]$. Resuelto este Programa Lineal, las preferencias son obtenidas por exponenciación de los valores logarítmicos según la base considerada. Si la base es el número *e*:

$$pref_{ij}(\underline{\alpha}c) = e^{\,Lprefij(\alpha c)},\ en\ C1 \qquad (14)$$

Resultando valores que no necesariamente son enteros en [1..10]. Tal especificación de escala, propuesta por Saaty, se torna carente de sentido al formular una *solución de preferencias difusas colapsadas, de mínima inconsistencia.*

D) La Solución del Vector de Prioridades: a los efectos de que el Vector de Prioridades VP resulte el mejor representante de las preferencias colapsadas en el segmento de confianza fijado por (αc), se deberán satisfacer, lo más posible, las condiciones de consistencia en las prioridades, expresadas mediante:

$$prefij(\alpha c) = vpi(\alpha c) / vpj(\alpha c), \text{ en } C1 \qquad (15)$$

Siendo $vpi(\alpha c)$ y $vp_j(\alpha c)$ las componentes *i*-ésima y *j*-ésima del vector en cuestión. La dependencia de este vector respecto de (αc), se sostiene al efecto de indicar que (αc) constituye un parámetro del modelo general para la Etapa I. Nuevamente, las incógnitas del modelo se relacionan mediante un cociente, expresión no lineal. Sin embargo, el problema resulta, al igual que el anterior y con los mismos artificios, linealizable. Antes de avanzar sobre su formulación, deben observarse dos situaciones: a) fuertes inconsistencias en las preferencias y b) segmentos de confianza al nivel (αc), para alguna o varias preferencias, muy estrechos (amplitud pequeña). Se requiere de *tres programas lineales acoplados*, para arribar al Vector de Prioridades de mejor ajuste.

El 1er Programa define si el Vector de Prioridades tiene solución dentro de los segmentos de confianza fijados al nivel (αc). Evaluará las *inconsistencias intervalares*. Se formula como sigue:

$$min \left\{ Sum\left(Lh\right) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \left(Lh_{ij}\right) \right\} \qquad (16\text{-A})$$

Sujeto a:
[Restricciones de Consistencia en las Prioridades]

$$Lvp_i(\alpha c) - Lvp_j(\alpha c) + Lecp_{ij} = Lpref_{ij}(\alpha c), \text{ en } C1 \qquad (16\text{-B})$$

[Restricción de referencia]

$$Lvp_1(\alpha c) = 0 \qquad (16\text{-C})$$

[Restricciones de Valor Absoluto de los Errores Logarítmicos de Consistencia]

$$ALecp_{ij} - Lecp_{ij} \geq 0, \text{ en } C1 \qquad (16\text{-D})$$

$$ALecp_{ij} + Lecp_{ij} \geq 0, \text{ en } C1 \qquad (16\text{-E})$$

$$ALecp_{ij} \geq 0, \text{ en } C1 \qquad (16\text{-F})$$

[Restricciones de Segmento de Confianza [1, 2] al Nivel de Certidumbre (αc)]

$$Lvp_i(\alpha c) - Lvp_j(\alpha c) + Lh_{ij} \geq Lpref_{ij}(\alpha c)_1, \text{ en } C1 \qquad (16\text{-G})$$

$$Lvp_i(\alpha c) - Lvp_j(\alpha c) - Lh_{ij} \leq Lpref_{ij}(\alpha c)_2, \text{ en } C1 \qquad (16\text{-H})$$

[Restricciones de Positividad para los Márgenes de los Segmentos de Confianza al Nivel (αc)]

$$Lh_{ij} \geq 0, \text{ en } C1 \qquad (16\text{-I})$$

Siendo:
$Lvp_i(\alpha c)$ y $Lvp_j(\alpha c)$ los logaritmos de las variables $vpi(\alpha c)$ y $vp_j(\alpha c)$ del Vector de Prioridades *VP*; $Lecp_{ij}$ el logaritmo del error multiplicativo ecp_{ij} y $ALecp_{ij}$ su valor absoluto; Lh_{ij} el logaritmo del margen multiplicativo *hij* en el que debería modificarse, eventualmente, el Segmento de Confianza logarítmico $[Lpref_{ij}(\alpha c)_1; Lprefij(\alpha c)_2]$; $Sum(Lh)$ es la suma de los márgenes logarítmicos.

El resultado $Sum(Lh) = 0$, implica que existe solución del Vector de Prioridades respetando los límites para cada segmento de confianza al nivel (αc), en el que las preferencias han sido acotadas. Si $Sum(Lh) > 0$, se tendrá, en cada *Lhij*, el márgen requerido para modificar el segmento respectivo, al efecto de que la solución tenga lugar. Una observación importante en este modelo, la constituye la restricción de referencia.

Nótese que se ha establecido en la expresión (16-C), que $vp_1(\alpha c) = 1$ ($Lvp_1(\alpha c) = 0$). Esta referencia es necesaria, puesto que las incógnitas del programa se presentan en la forma de cocientes. Por ello, se necesita fijar un valor (el más simple, aquí, es sobre el primer componente de *VP* e igual a la unidad), a efectos de evitar que el programa arroje infinitas soluciones.

El Vector de Prioridades es luego normalizado, y sus componentes finales no dependen del valor impuesto en esta restricción (tampoco depende, en rigor de la componente del *VP* a la cual se le impone la misma).

El 2do Programa busca minimizar las *inconsistencias de prioridades*, planteadas en el 1er Programa, ecuaciones (16-B), sobre el Vector *VP*. Adopta, como restricción adicional, la imposición de que la suma de los márgenes Lh_{ij} resulte igual a $Sum(Lh)$, obtenida desde el 1er Programa. De modo que, agregando tal restricción, sólo cambia el objetivo. La formulación resulta:

$$min \left\{ ALerrcpT = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} ALecp_{ij} \right\} \qquad (17\text{-A})$$

Sujeto a:
[Restricciones (16-B) a (16-I)]
[Restricción de Límite en los Márgenes de los Segmentos de Confianza al Nivel (αc)]

$$Sum\left(Lh\right) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} Lh_{ij} \qquad (17\text{-B})$$

Finalmente, el 3er Programa busca minimizar el máximo error de inconsistencia en las preferencias, individualmente consideradas, sobre el Vector de Prioridades obtenido. Para ello se introduce una variable logarítmica adicional, *ALecMax*. El objetivo es la minimización de *ALecMax*. Tomando como referencia el 2do Programa, se tienen las mismas restricciones y se imponen, adicionalmente: a) restricciones que limiten cada error logarítmico, $ALecp_{ij}$, como máximo al valor *ALecMax* y b) la sumatoria de los $ALecp_{ij}$ debe ser igual al valor objetivo obtenido en el 2do Programa, *ALerrcpT*. Su formulación resulta:

$$Min\ \left\{ ALecMax \right\} \tag{18-A}$$

Sujeto a:
[Restricciones (16-B) a (16-I) y (17-B)]
[Restricción de Suma de Errores Logarítmicos por Inconsistencia en *VP*]

$$\left\{ ALerrcpT = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} ALecp_{ij} \right\} \tag{18-B}$$

[Restricciones de Límite Máximo en los Errores Logarítmicos Individuales por Inconsistencia en *VP*]

$$ALecp_{ij} \leq ALecMax,\ en\ C1 \tag{18-C}$$

Luego, cada componente de *VP* resultará de la exponenciación (asumiendo como base el número *e*):

$$vp_i(\alpha c) = e^{Lvp_i(\acute{a}c)},\ en\ C1 \tag{19}$$

Obtenido *VP*, para su normalización, $VP^{[N]}$, cada componente resulta del cociente entre la componente homónima de *VP* y la suma de las componentes de *VP*. El Vector Exponencial, $VP^{[E]}$ [Yager, 1977], tiene componentes que resultan de multiplicar cada componente de $VP^{[N]}$, por el número de criterios, *n*:

$$vp_i^{[E]}(\acute{a}c) = n \times vp_i^{[N]}(\acute{a}c)\ ,en\ C1 \tag{19}$$

Siendo $vp_i^{[E]}(\alpha c)$ la componente i-ésima$VP^{[E]}$ y $vp_i^{[N]}(\alpha c)$ la componente i-ésima de$VP^{[N]}$, *en C1*, definida como se dijo:

$$vp_i^{[N]}(\pm c) = vp_i(\pm c) \Big/ \sum_{i=1}^{n} vp_i(\pm c) \tag{20}$$

Puede, además, construirse un Índice de Inconsistencia que se empleará para la Etapa II. Procura una medida de representatividad del *VP* obtenido, respecto de la Matriz de Preferencias $MP_A(\alpha c)$. Es propuesto como sigue:

$$I_{inc} = \left(1 - e^{-\beta \times \left[ALerrcpT + Sum(Lh) \right]} \right) \tag{21}$$

Siendo:
β una constante convenientemente elegida para adecuar la escala (*β= 0.02*); los sumandos del exponente, como se explicó, miden los errores logarítmicos de inconsistencia total. Si $MP_A(\alpha c)$ fuese perfectamente consistente, entonces $I_{inc}= 0$, caso contrario, I_{inc} aumentará en la medida que las *inconsistencias de prioridades* y/o *intervalares*, sean mayores.

4. ETAPA II: EL MODELO DE PLANIFICACIÓN DE MEDIANO/ CORTO PLAZO DEL SDEE MEDIANTE PROGRAMACIÓN DINÁMICA DIFUSA.

4.1. Planificación de mediano/corto plazo del SDEE mediante programación dinámica difusa.

A) Elementos Conceptuales de la Programación Dinámica Difusa (PDD): La PDD está basada en los principios de optimalidad propuestos por [Bellman & Dreyfus, 1962; Bellman & Zadeh, 1970]. Requiere la consideración de Conjuntos Difusos, asociados a los *n* criterios mediante los cuales se define la aptitud de cierto estado en la evolución del sistema. Los mismos permiten *mapear* cada variable asociada a cada uno de los *n* criterios, en el mismo *espacio difuso de decisión*. En el Modelo propuesto, con este fin, las variables no son integradas en forma directa [Schweickardt & Miranda, 2007]. Se introduce lo que aquí se referirá como *variables de apartamiento*, u_i,. Para cada criterio *Ai*, cuya variable asociada asume, en cierto estado, el valor *ai*, respecto de un valor de referencia pertinente, *airef*, queda definida como:

$$ui = |ai - airef| / airef \tag{22}$$

Y el correspondiente conjunto difuso ***Ai***, solidario al criterio de optimización homónimo, con una función de pertenencia, *μ**Ai***(ui), tendrá la expresión simbólica:

$$\boldsymbol{A_i} = \sum_{w=1}^{W} ¼_{\boldsymbol{Ai}}(u_w)\ ;\ \forall u_w \in U \tag{23}$$

En tal expresión, empleando la notación propuesta en [Kaufmann & Gupta, 1985], la sumatoria refiere al *conjunto discreto Unión* de los *w* valores, *en [1..W]*, que adopta la función de pertenencia sobre el criterio *i*-ésimo. *U* es el dominio de la variable de apartamiento, u_i, Si se tratase de un *conjunto contínuo*, la sumatoria de (23) se reemplaza por un símbolo integral. Es decir: ***Ai*** se define por todos los pares (u_w, ì$_{\boldsymbol{Ai}}$ (u_w)), $\forall u_w \in U$.

Definidos los Conjuntos Difusos, al efecto de modificar la importancia que, a través de $MP_A(\alpha c)$, le corresponde a cada criterio de optimización, para (*αc*), una *prioridad*, calculada mediante (19), desde $VP^{[E]}$.

B) Formalización de la PDD para el Modelo de Planificación del SDEE: En la Figura 2, se presenta la transición entre dos etapas *k-1* y *k* en una Optimización Difusa "forward" o hacia adelante. ***D*** es el Conjunto Difuso de Decisión.

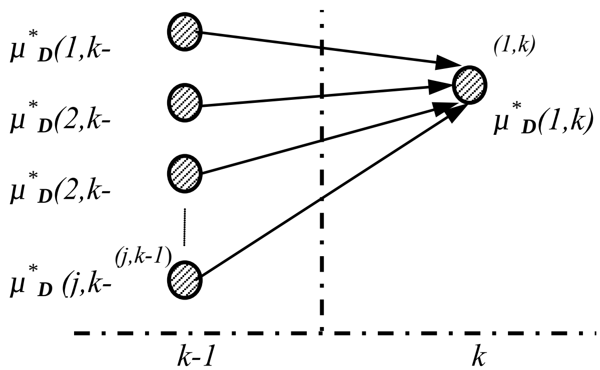

Figura 2. Transición entre las etapas *(k-1)* y *(k)* en una Optimización Difusa "Forward" o "Hacia Adelante"
Fuente: Elaboración propia.

El criterio empleado para arribar óptimamente (entiéndase, del modo *más satisfactorio* posible) al único estado de la etapa *k*, es el de *Max { Min { } }* de los valores que adoptan las funciones de pertenencia involucradas. El operador *Min { }* se aplica sobre el conjunto de vínculos posibles desde cada estado en la etapa *k-1* y, de ellos, se elige el *Max {}*. Este valor, $\mu^*_D(1, k)$, indica el nivel de satisfacción al maximizar la decisión adoptada en cuanto a la transición a seguir. Corresponde al *Max* en el Conjunto Difuso de Decisión, ***D***. Tal proceso se indica como Principio de Optimalidad de Bellman – Zadeh. Si a cada función de pertenencia, $\mu_{\mathbf{A}i}(u_i)$, se la eleva al exponente dado por la correspondiente componente exponencial de $VP^{[E]}$ según (19), asociada a cada criterio *i*-ésimo, $vp_i^{[E]}(\alpha c)$, el efecto sobre el conjunto difuso ***Ai*** resultará en una *contracción* ($vp_i^{[E]}(\alpha c) > 1$) o una *dilatación* ($vp_i^{[E]}(\alpha c$ < 1). La *contracción* realzará la importancia del criterio correspondiente en la toma de decisión, mientras que la *dilatación*, la atenuará. El operador *Min { }*, resulta en la *intersección* de los conjuntos difusos, y el $VP^{[E]}$ generará *menores* o *mayores* valores de sus funciones de pertenencia, según aquellos se *contraigan* o *dilaten*. Si en la Figura 2 las transiciones son extendidas entre cada estado [$\forall e_j^{k-1} \epsilon E^{k-1}$] y cada estado [$\forall e_i^k \epsilon E^k$] , donde E^{k-1}, E^k son los Vectores de Estado de las etapas *k-1* y *k*, respectivamente, y llamando:

$\eta_{Al} = \left[\mu_{\mathbf{Al}}(j,k-1);(i,k)\right]^{vp_l^{[E]}(\pm c)}$, con *l en [1..n]*,el Modelo Formal de Optimización Difusa puede expresarse como:

$$\mu_{\mathbf{D}}^*(i,k) = \underset{[E^k]}{Max}\left\{ \underset{[E^{k-1}]}{Min}\left\{ \eta_{\mathbf{A1}} \mu \eta_{\mathbf{A2}} (j;k;1) \right\}_{\mathbf{D}}^* \right\} \quad (24)$$

Con: $k = 1...N$

Sujeto a las restricciones:
αc constante en T^*(25)
$MP_A(\alpha c)$ invariante en T^*(26)
$\Theta_{Ext} \geq [1- \mu_{\mathbf{D}}(T^*)] = \Theta_{\mathbf{D}}$ (27)

El valor de la función de pertenencia, $\mu_{\mathbf{D}}$, es maximizado en el Conjunto Difuso de Decisión, ***D***, para cada estado de (24), sobre un horizonte de *N* etapas.

$vp^{[E]}(\alpha c)$, con $i = 1...n$, es el ponderador exponencial asociado al criterio *i*-ésimo;T^*es la trayectoria resultante; $\mu_{\mathbf{D}}(T^*)$ es el nivel de satisfacción obtenido, mientras que el parámetro *externamente fijado*, Θ_{Ext}, recibirá el nombre de Riesgo Extrínseco. Por tal motivo, el valor ($1-\mu_{\mathbf{D}}(T^*)$) resultará ser el Riesgo Intrínseco de la Trayectoria resultante. Para introducir adecuadamente estos conceptos, se describen las restricciones del modelo: a) la restricción (25), establece que, una vez colapsadas las preferencias, el Nivel de Certidumbre fijado, (αc), *no se modifica para la trayectoria óptima*,T^*, obtenida. Las preferencias son así determinísticas, al igual que la trayectoria T^*. Sin embargo, como pueden definirse infinitos αc-cortes para las preferencias difusas, existirán infinitas trayectorias de evolución. De modo que$T^* = T^*(\alpha c)$;b) (26) impone que las preferencias no se alteren entre sí, pues eso cambiaría el Vector de Prioridades y, con ello, la trayectoria T^*; c) la restricción (27) se relaciona con las incertidumbres en los criterios: el operador de evolución dinámica en la PDD, *Max{ Min {} }*, definirá un cierto valor $\mu_{\mathbf{D}}(T^*)$, que resulta ser el Nivel de Certidumbre de la trayectoria óptima de evolución, $T^*.\mu_{\mathbf{D}}(T^*)$ tendrá también un valor el intervalo*[0, 1]* y aceptar cierto valor *supone un riesgo*. Si se presentaran instancias de los valores en los criterios de optimización, comprendidos en un Segmento de Confianza cuyo Nivel de Certidumbre fuese menor, la trayectoria obtenida dejaría de ser óptima, pues sistema podría evolucionar en el tiempo conforme valores diferentes. Este riesgo, al ser una propiedad del sistema (incertidumbres en los criterios y preferencias, y operador de evolución en la PDD) se referirá como Riesgo Intrínseco. Resulta del complemento a 1 de $\mu_{\mathbf{D}}(T^*)$, $[1 - \mu_{\mathbf{D}}(T^*)\ ] = \Theta_{\mathbf{D}}$. Para introducir la *propensión (aversión) al riesgo* del tomador de decisiones, se define externamente un umbral, valuado en *[0, 1]*.Este valor se referirá como Riesgo Extrínseco, por oposición, Θ_{Ext}. (27) impone que T^*, deberá tener un Riesgo Intrínseco menor o igual a la *propensión al riesgo* del planificador (Riesgo Extrínseco).A la trayectoria de evolución T^* que satisface todas las restricciones, se la referirá como Trayectoria Más Satisfactoria y se la indicará como *TMS(αc)*.De lo dicho, es posible introducir una *definición operacional* de aptitud de la *TMS(αc)*. Esta definición resultará *vectorial*, ya que tendrá *dos componentes*: a) el Índice de Inconsistencia en las preferencias entre criterios de optimización, I_{inc}, dado por (21) y b) el Riesgo Intrínseco de la *TMS(αc)*.

De tal forma es introducido en el Modelo Posibilístico, el Vector de Aptitud de la *TMS(αc)*:

$$V_{Ap}(\mathrm{TMS}(\alpha c)) = \begin{bmatrix} I_{inc} \\ \mu_{\boldsymbol{D}}(T^{*}) \end{bmatrix} \tag{28}$$

5. ETAPA III: CONTROL DE LA DESADAPTACIÓN DINÁMICA DEL SISTEMA

A) La Razón de Desadaptación del Sistema: al sistema cuyo mérito o aptitud en la planificación, está dado por (28), se lo referirá como *sistema proyectado*. El objetivo de la Etapa III, estriba en medir la desadaptación que el *sistema real* exhibe, para cierto período, discretizado en años de control regulatorio, respecto del *sistema proyectado*. Este es el punto sin solución en el estado del arte, pues no se tienen métodos formales para este tipo de control [Schweickardt, 2007]. El control se realiza siempre al comienzo del período (estático) (por caso, quinquenal en Argentina), ignorándose que ocurrió con las incertidumbres en las variables consideradas para la planificación. El Modelo Posibilístico aquí propuesto, introduce una definición operacional para la *desadaptación dinámica del sistema*. Tendrá dos componentes, por ello será también *vectorial*. La *primera* intentará ponderar estrictamente cuánto se apartó el sistema real, en el año *m*, respecto del proyectado. La *segunda*, intentará evaluar qué capacidad tiene el sistema real, de seguir evolucionando, a partir del año *m*, por una trayectoria que no vulnere la restricción de Riesgo Extrínseco impuesta y satisfecha, según la *TMS(αc)*, por el sistema proyectado. En este apartado se trata la *primera*, referida como Razón de Desadaptación. Tal componente pondera la preservación de la consistencia del sistema real, respecto de su proyección, para el año de corte *m*. Para ello, primeramente, es introducido un Índice de Consistencia:

$$I_{con}(m) = \left(1 - e^{-\beta \ x \ [ALerrcpT\ (m)]}\right) \tag{29}$$

Siendo: *m* el estado presente de control/año de corte; β la misma constante fijada en (21) y *ALerrcpT (m)* es el error total logarítmico que se obtiene al calcular la representatividad del Vector de Prioridades relevado desde el estado *m*, $VP^{[E,\ m]}$, respecto de $VP^{[E]}$. En el cálculo de (29) es necesario conocer el $VP^{[E,\ m]}$. Para ello se introduce el aquí referido como Principio de Invariancia en la Aptitud Ponderada: de existir un cambio en las preferencias entre los criterios:
Si $\{A\}$ es el conjunto de criterios, entonces. $\forall\ Ai; i=[1...n] \in \{A\}$::

$$\left[\mu(u_i)_{[m]\ \mathbf{Ai}}\right]^{vp_i^{[E,m]}(\alpha c)} = \left[\mu(u_i)_{[k^*]\ \mathbf{Ai}}\right]^{vp_i^{[E]}(\alpha c)} \tag{30}$$

Su aptitud (satisfacción) respecto de cada uno de ellos, ponderada a través de sus nuevos $vp_i^{[E,m]}(\alpha c)$ *, no debería modificarse*, siendo k^* el *estado presente*, por donde pasa la *TMS(αc)* en la etapa o año de corte *m*. El valor del segundo miembro es conocido, porque tanto las funciones de pertenencia para el estado k^*, como las componentes del $VP^{[E]}$, fueron calculadas en la Etapa II.
Desde (30), $VP^{[E,\ m]}$, tendrá las componentes:

$$vp_i^{[E,m]}(\alpha c) = \left(vp_i^{[E]}(\alpha c)\right) \times \frac{\log\{\mu(u_i)_{[k^*]\ \mathbf{Ai}}\}}{\log\{\mu(u_i)_{[m]\ \mathbf{Ai}}\}} \tag{31}$$

Considerando los siguientes casos particulares:

a) si $\mu(u_i)_{[m]\ \mathbf{Ai}} = 1$, entonces se adopta:

$$vp_i^{[E,m]}(\alpha c) = \left(vp_i^{[E]}(\alpha c)\right) \times \mu(u_i)_{[k^*]\ \mathbf{Ai}} \tag{32}$$

b) si $\mu(u_i)_{[k^*]\mathbf{Ai}} = 1\ \mu(u_i)_{[m]\mathbf{Ai}}, \leq 1,$ se adopta:

$$vp_i^{[E,m]}(\alpha c) = vp_i^{[E]}(\alpha c) \tag{33}$$

Sin embargo, desde (33), nada garantiza que se cumpla la condición sobre los ponderadores exponenciales:

$$\sum_{i=1}^{n} vp_i^{[E,m]}(\alpha c) = n \tag{34}$$

Como se observa en la ecuación (19), dado que *tal suma debe ser igual a 1*, por ser los componentes de $VP^{[N]}$normalizados. Para ajustar óptimamente $VP^{[E,\ m]}$ conforme (34), se integran al Modelo los dos Programas Lineales acoplados siguientes: si ε_i es el error de ajuste en el ponderador *i*-ésimo, $A\varepsilon_i$ es su valor absoluto y $A\varepsilon_T$ es la suma de los mismos $\forall i \in [1..n]$, se tiene:

Programa A: Sea $C = \{\forall i \in [1..n]\}$, *entonces*:

$$\min \left\{A\varepsilon_T = \sum_{i=1}^{n} A\varepsilon_i\right\} \tag{35-A}$$

Sujeto a:
[Restricción de Ponderadores Exponenciales]

$$\sum_{i=1}^{n}\left(vp_i^{[E,m]}(\alpha c) + \varepsilon_i\right) = n \tag{35-B}$$

[Restricciones de Valor Absoluto de los Errores de Ajuste]

$A\varepsilon_i + \varepsilon_i \geq 0$, en C (35-C)

$A\varepsilon_i - \varepsilon_i \geq 0$, en C (35-D)

$A\varepsilon_i \geq 0$, en C (35-E)

Energética 45 junio (2015), pp. 5-21

[Restricciones de Efecto sobre los Conjuntos Difusos]: Se debe respetar en cada ponderador, el efecto de *contractor* o *dilatador* sobre el Conjunto Difuso solidario al criterio correspondiente. Esto es,en C:

$$\text{Si } \mathbf{vp}_i^{[E]}(\alpha c) \le 1, \text{ entonces } \mathbf{vp}_i^{[E,m]}(\alpha c) + \varepsilon_i \le 1 \text{ (efecto contractor o neutro)} \quad (35\text{-F})$$

$$\text{Sino } \mathbf{vp}_i^{[E,m]}(\alpha c) + \varepsilon_i \ge MinVal \text{ (efecto dilatador o neutro)} \quad (35\text{-G})$$

$$Si \sum_{i=1}^{n} vp_i^{[E,m]}(\alpha c) < n,\ MinVal = 1 \quad (35\text{-H})$$

$$Si \sum_{i=1}^{n} vp_i^{[E,m]}(\alpha c) > n,\ MinVal = Min\left\{vp_i^{[E,m]}(\alpha c)\right\} \quad (35\text{- I})$$

El caso neutro, se corresponde con la situación $\mathbf{vp}_i^{[E]}(\alpha c) = 1$, o bien con la imposibilidad de la solución factible hallada, en el intento de preservar el carácter de $\mathbf{vp}_i^{[E,m]}(\alpha c)$ (*contractor* ó *dilatador*), interviniendo *MinVal*.

Programa B: sea a $A\varepsilon_{max}$ una cota de error, entonces:

$$Min \left\{A\varepsilon_{Max}\right\} \quad (36\text{-A})$$

Sujeto a:
[Restricciones (35-B) a 35-I)]
[Restricciones de Límite Máximo en los Errores Individuales por Ajuste en $VP^{[E, m]}$]

$$A\varepsilon_i \le A\varepsilon_{max} \text{ ; en } C \quad (36\text{-B})$$

El Programa A, ajusta el vector $VP^{[E, m]}$, para que sus componentes satisfagan la condición de ponderadores exponenciales en el sistema de preferencias, reconstruido a partir del *estado presente* (año de corte m). El Programa B, acota el error individual de cada componente ajustada, $\mathbf{vp}_i^{[E,m]}(\alpha c) + \varepsilon_i$.
Éste se mantendrá inferior al error máximo, $A\varepsilon_{max}$.
Luego, pueden determinarse los errores logarítmicos de inconsistencia en las prioridades para el *estado presente*, m, resolviendo las ecuaciones que siguen: sea $C = \{\forall i \in [1..n-1]; \forall j \in [i+1.. n]\}$, $Lpref_{ij}(\alpha c)$ el logaritmo de la preferencia colapsada según (αc), entre los criterios i y j, $Lvp_i^{[E, m]}(\alpha c)$ el logaritmo de la componente i-ésima del Vector de Prioridades ajustado por los programas anteriores, y $Lecp_{ij}$ logaritmo del error de inconsistencia entre las prioridades, entonces ,en C:

$$Lvp_i^{[E, m]}(\alpha c) - Lvp_j^{[E, m]}(\alpha c) + Lecp_{ij} = Lpref_{ij}(\alpha c) \quad (37)$$

Dónde:

$$Lecp_{ij} = Lpref_{ij}(\alpha c) + Lvp_j^{[E, m]}(\alpha c) - Lvp_i^{[E, m]}(\alpha c) \quad (38)$$

Si el error multiplicativo ecp_{ij} resultase 1, su logaritmo $Lecp_{ij} = 0$; significaría que no habría cambio en las prioridades entre los criterios (i, j), pues su cociente (resta de logaritmos) conduce a la misma preferencia calculada para la Etapa I. Luego, el valor absoluto del logaritmo del error total por inconsistencias entre el vector de prioridades del *estado presente*, m y el *proyectado* en el mismo año de corte, k^*, resulta:

$$ALerrcpT(m) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \left|Lecp_{ij}\right| \quad (39)$$

Se está, entonces, en condiciones de calcular el Índice de Consistencia dado por (29). Finalmente, la Razón de Desadaptación es definida mediante la expresión:

$$R_D(m) = \frac{Max\left\{0; \left[I_{con}(m) - I_{inc}\right]\right\}}{I_{inc}} \quad (40)$$

$$\text{Con: } R_D(m) = 0 \text{ si } I_{inc} = I_{con}(m) \quad (41)$$

Se observa que si $I_{con}(m) \le I_{inc}$ el sistema se encuentra adaptado, dinámicamente, hasta la etapa de evaluación/año de corte, estado m. Por ello $R_D(m = 0)$. $I_{inc} = I_{con}(m)$ supone un sistema *perfectamente adaptado* en las consistencias de preferencias entre criterios. *En cualquier otro caso, la desadaptación aumentará en la medida que* $I_{con}(m) > I_{inc}$, siendo $R_D(m) > 0$.

Una breve digresión permitirá abonar sobre lo que se intenta captar mediante este concepto: la desadaptación dinámica del sistema, se produce como consecuencia de los cambios en las preferencias entre los criterios de optimización. Un ejemplo: supóngase que en un SDEE se tienen dos criterios, el Costo Global de Inversión en Redes (CG) y la Energía No Suministrada por Cortes (ENS). Si el segundo es más importante que el primero, se esperan inversiones que minimicen la frecuencia y duración de las interrupciones de energía. Se proyecta el sistema, y se reconocen esos costos de inversión a través de la tarifa. En cambio se decide no invertir. Cambian las preferencias (ENS tiene prioridad menor que CG), pues ahora, al tener menos inversiones, hay más cortes, y con mayor duración esperada. El SDEE sufrió una desadaptación respecto de su proyección, y el regulador debería arbitrar los medios de penalización pertinentes.

B) La Variación de Aceptación de la *TMS(αc)*: La *segunda componente*, como se dijo en el apartado anterior, intentará proporcionar una medida de la capacidad que tiene el sistema de evolucionar desde el estado presente de evaluación, m, en adelante, sin vulnerar la restricción de Riesgo Extrínseco. Ello requiere de calcular el Riesgo Intrínseco, $\Theta_D(m)$, en el estado m, como sigue: $\forall\ i \in [1..n]$

$$\mu_D(m) = Min\left\{ \left[\mu(u_i)_{[m]}\right]_{Ai}^{vp_i^{[E,m]}(\alpha c)} \right\} \quad (42)$$

$$\Theta_{\boldsymbol{D}}(m) = 1 - \mu_{\boldsymbol{D}}(m) \quad (43)$$

Y se propone el indicador:

$$\Delta\mu_{\boldsymbol{D}}(m) = Max\left\{0\ ;\ \frac{\{\Theta_{\boldsymbol{D}}(m) - \Theta_{Ext}\}}{\Theta_{Ext}}\right\} \quad (44)$$

El cual se referirá como Variación de Aceptación en la trayectoria del sistema, desde el *estado de evaluación o presente*, *m*.

C) El Vector de Adaptación Dinámica del Sistema: Se introduce, entonces, el Vector de Adaptación Dinámica. A partir de (40), Razón de Desadaptación y de (44), Variación de Aceptación de la *TMS(αc)*, se tiene:

$$V^{Adap}{}_{Din}(m) = \begin{bmatrix} R_D(m) \\ \Delta\mu_{\boldsymbol{D}}(m) \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$V^{Adap}{}_{Din}(m) = \mathbf{0},\ \text{(vector nulo)} \quad (46)$$

Resulta la condición de Adaptación Dinámica Perfecta.

6. CRITERIOS A CONSIDERAR EN EL SDEE COMO ESTUDIO DE CASO

Los desarrollos precedentes se abordaron con abstracción del tipo de sistema objeto de estudio.

A efectos de completar el modelo aplicable a un SDEE, son considerados *ocho criterios*, con el objeto de generalizar los desarrollos expuestos. Se supone que el SDEE, se emplaza en una ciudad donde se controla la Calidad Ambiental, en particular, por Impacto Visual de las Redes. Este es el caso de una ciudad turística. Se ha adoptado como referencia, el Marco Regulatorio Eléctrico vigente en Argentina. Un aspecto que debe ser destacado, estriba en el hecho de que la regulación referida, penaliza monetizando el impacto negativo de casi la totalidad de los criterios de calidad. Entonces: porqué no aplicar, directamente, tales penalizaciones, sumándolas a los costos de inversión y de operación y mantenimiento planteando, como se realiza en la práctica, una optimización Mono-Objetivo que minimiza el costo total? La respuesta es que se trata, precisamente, de reconocer que los valores impuestos regulatoriamente como penalizaciones, exhiben una dudosa concepción, y no necesariamente representan el costo social de oportunidad atribuible a los aspectos de no calidad, en general. Por tanto, la incertidumbre de valor es introducida en el modelo, mediante los Conjuntos Difusos asociados a cada criterio no monetizable objetivamente. Luego, la dinámica es extendida al dominio difuso, tal como se presentó. Se establecerán los criterios A_i, y su Matriz de Preferencias Difusas, $\boldsymbol{MP_A}$. Entonces se adopta un *αc*–corte, y se procede a colapsarlas, obteniendo, las componentes del Vector de Prioridades Exponenciales, $vp_i^{[E]}(\alpha c)$. Para ello se recurre a los conceptos, ecuaciones y programas de optimización presentados en **3.**. Luego, para cada criterio, se define una variable y un valor de referencia pertinente. Así se construye la variable de apartamiento correspondiente, u_i, dada por (22). Son, luego definidas las funciones de pertenencia de cada Conjunto Difuso asociado. Estas serán funciones exponenciales, cuya forma genérica se adoptó como:

$$\mu_{\boldsymbol{A_i}}(u_i) = e^{-u_i \times vp_i^{[E]}(\alpha c)} \quad (47)$$

En la cual se observa que se ha ponderado la importancia de cada Conjunto Difuso. Se aborda así la Etapa II de planificación, mediante los métodos desarrollados en **4.**. Los criterios y sus variables de apartamiento, son los que siguen. Se refieren a cada estado *j* de cada etapa *k* , [*j*, *k*] (*k*≡ año de corte del horizonte de planificación) en el Espacio de Búsqueda para la PDD. Todos los desarrollos a continuación presentados, son propuestos por el autor del presente trabajo.

De modo que pueden ser propuestos otros criterios.

A)Costo Global (CG)[k$/año]

$$u_{CG[j,k]} = \frac{AC_{v[j,k]} - Min\left\{AC_{v[j,k]}\right\}_{k-1}}{Min\left\{AC_{v[j,k]}\right\}_{k-1}} \quad (48)$$

Donde:
$AC_v^{[j,k]}$ es el costo anual de inversión más el costo anual de operación y mantenimiento del SDEE, correspondiente a la variante de equipamiento *v*, en el estado *j* de la etapa *k*; $Min\left\{Ac_{v[j,k]}\right\}_{k-1}$ es el mínimo costo de transición, entre las etapas *k-1* y *k* aplicando Programación Dinámica Clásica, y resulta ser el valor de referencia, CG_{Ref}, para cada estado [*j*, *k*].

B) Energía No Suministrada (ENS)[kWh]

$$u_{ENS[j,k]} = Max\left\{0;\frac{\left(ENS_{[j,k]} - ENS_{[k]}^{Ref}\right)}{ENS_{[k]}^{Ref}}\right\} \quad (49)$$

Donde:
$ENS_{[k]}^{Ref}$ es un límite externamente fijado para cada etapa *k*, función de la demanda pronosticada.

C) Índice de Interrupción del Servicio (FI)

$$u_{FI[j,k]} = Max\left\{0;\frac{\left(FI_{[j,k]} - FI_{[k]}^{Ref}\right)}{FI_{[k]}^{Ref}}\right\} \quad (50)$$

Donde:
$FI_{[k]}^{Ref}$ es un límite de número de interrupciones de servicio por semestre. Es externamente impuesto, para cada etapa *k*, por la autoridad regulatoria. Difiere

si se trata de zonas urbanas o rurales. La Frecuencia de Interrupción:

$$FI_{[j,k]} = \sum_{i \in NInt} \left(\frac{Q^{fs}{}_{CT_{i[j,k]}}}{Q_{CT_{Inst_{[j,k]}}}} \right) \qquad (51)$$

Tiene una estructura de cálculo sustentada en exigencias regulatorias. Q refiere a la Carga o Energía interrumpida:

$Q^{fs}{}_{CT_{i[j,k]}}$.

Corresponde a cada Centro de Centro de Transformación, CT MT/BT (Media Tensión/Baja Tensión), que, se estima, saldrá fuera de servicio *fs* veces por semestre en el estado [*j*, *k*]; *NInt*, es el número total de CT MT/BT, que estarán fuera de servicio *fs* veces en el mismo semestre para [*j*, *k*], y $Q_{CT_{Inst_{[j,k]}}}$ corresponde a la asociada en el total de CT MT/BT instalados, para la variante de equipamiento correspondiente a [*j, k*]. La estimación se realiza sobre la base de los denominados Modelos de Confiabilidad del SDEE, de naturaleza Estocástico-Difusa *fs* es una *tasa estadìstica*, dato.

D) Índice de Tensión Fuera de Tolerancia (TF)

$$u_{TF[j,k]} = Max \left\{ 0; \frac{\left(ITF_{[j,k]} - ITF^{Ref}_{[k]} \right)}{ITF^{Ref}_{[k]}} \right\} \qquad (52)$$

$ITF^{Ref}_{[k]}$ es un índice/valor límite, para cada etapa *k*, cuya construcción supone las siguientes consideraciones y pasos: **a)** existen penalidades impuestas por la autoridad regulatoria, para la Energía Suministrada en Malas Condiciones de Calidad, *ESMCC*. Dependen de dos factores: 1) Densidad de Distribución (Urbana, Ur, o Rural, Ru) y 2) Máxima Caída de Tensión en los alimentadores de la red de Media Tensión. Tal caída, por unidad, se define en términos relativos a la tensión nominal: $\Delta u^u = (u - u_{Nom})/ u_{Nom}$, siendo u la tensión registrada. En el Modelo propuesto, el perfil de tensiones, u, en los nodos, surge de simular un flujo de potencia. Las penalizaciones aumentan por escalones, definidos por rangos, según aumentan los apartamientos de u respecto de u_{Nom}; **b)** a partir de tales penalizaciones, se construye un Índice de Referencia por área (Ur/Ru), yestado *[j, k]*. Pondera la *ESMCC*, en cada nodo *ni*, sobre un factor de valorización promedio, expresado mediante:

$$f_{[Ru/Ur]} = \frac{\$p_{[1erEsc][Ru/Ur]}}{\$p_{[1erEsc]Ru} + \$p_{[1erEsc]Ur}} \qquad (53)$$

Siendo:
$\$p_{[1erEsc][Ru/Ur]}$ es la penalización aplicada para el primer escalón, según el segmento Ur/Ru. Luego, si $nNTF_{[j.k][Ru/Ur]}$ es el número de nodos en área Ru o Ur, respectivamente, sobre los que se han detectado violaciones de tensión, $ESMCC^{ni}{}_{[j,k][Ru/Ur]}$ es la *ESMCC* en cada uno de tales nodos y $E^{Total}_{[j,k][Ru/Ur]}$ es la energía total suministrada en el área respectiva, para el estado [*j*, *k*], entonces:

$$ITF^{Ref}_{[j,k][Ru/Ur]} = f_{[Ru/Ur]} \times \frac{\sum_{ni=1}^{nNTF_{[j,k][Ru/Ur]}} ESMCC^{ni}_{[j,k][Ru/Ur]}}{E^{Total}_{[j,k][Ru/Ur]}} \qquad (54)$$

c) con el mínimo de los índices obtenidos, según todos los estados *j* de la etapa *k* y para cada área, Ur/Ru, se compone el Índice de Referencia requerido en la ecuación (52). Entonces: $\forall j \in k$:

$$ITF^{Ref}_{[k]} = Min\left\{ ITF^{Ref}_{[j,k]Ur} \right\} + Min\left\{ ITF^{Ref}_{[j,k]Ru} \right\} \qquad (55)$$

d) entonces, el Índice $ITF_{[j,k]}$ se compone siguiendo *dos pasos*:1ro) Se consideran los nodos *ni*-ésimos, en cada área, Ur/Ru, su variación de tensión, $[\Delta u^u]_{ni}$,y la penalización correspondiente, $\$p_{[\Delta u^u]_{ni}[Ur/Ru]}$. Se calculan:

$$ITF_{[j,k][Ur]} = \frac{\sum_{ni=1}^{nNTF_{[k,j][Ur]}} ESMCC^{Ref,ni}_{[j,k][Ur]} \times \$p_{[\Delta u^u]_{ni}[Ur]}}{E^{Total}_{[j,k][Ur]} \times \left[\$p_{[1erEsc]Ru} + \$p_{[1erEsc]Ur} \right]} \qquad (56)$$

$$ITF_{[j,k][Ru]} = \frac{\sum_{ni=1}^{nNTF_{[k,j][Ru]}} ESMCC^{Ref,ni}_{[j,k][Ru]} \times \$p_{[\Delta u^u]_{ni}[Ru]}}{E^{Total}_{[j,k][Ru]} \times \left[\$p_{[1erEsc]Ru} + \$p_{[1erEsc]Ur} \right]} \qquad (57)$$

y 2do) se suman ambos Índices dados por (56) y 57):

$$ITF_{[j,k]} = ITF_{[j,k][Ur]} + ITF_{[j,k][Ru]} \qquad (58)$$

Finalmente, mediante (54) y (58) se calcula (52). Puede observarse que son aceptadas, sin aplicación de penalidad, violaciones de tensión en el primer escalón.
Cada nodo tiene asociadas Curvas Típicas de Carga, como funciones horarias. Así se estima la $ESMCC^{ni}$.

E) Pérdidas Globales de Potencia (PG)[kW]

$$u_{PG[j,k]} = \frac{PG_{v[j,k]} - Min\left\{ PG_{v[j,k]} \right\}_{k-1}}{Min\left\{ PG_{v[j,k]} \right\}_{k-1}} \qquad (59)$$

Donde:
$PG_{v[j,k]}$ son las Pérdidas Activas Globales del SDEE, correspondientes a la variante de equipamiento v, en el estado[j, k]; $Min\{PG_v^{[j,k]}\}k\text{-}1$ son las mínimas PG de transición, entre las etapas k-1 y k aplicando Programación Dinámica Clásica, y resulta ser el valor de referencia, PG_{Ref}, para cada estado [j, k].

F) Calidad Ambiental: Impacto Visual por Construcción de Líneas fuera del Típico Constructivo establecido según Zonas (IALin).
Aquí se asume que la regulación fija un Vector de Índices de Impacto. El mismo se compone de ponderadores lineales, asociados a una Matriz de Preferencias sobre impactos, para cada típico constructivo de las líneas aéreas. La hipótesis es que esa matriz es dato. Tal impacto es considerado según zonas, y se produce cuando se emplazan en las mismas, típicos constructivos de mayor impacto que el establecido en cada una. Un ejemplo de típico constructivo, consistiría en una línea aérea con postes de madera, pues todos los accesorios necesarios para su instalación, se definen por normas constructivas. Se consideran, a efectos de la simulación presentada, *cinco zonas*, y se tendrá un Vector de Índices de Impacto como el siguiente:

$$\left[p\right]_{IALin}^{[Z]} = \left[p_L^{[z,A]} \; ; p_L^{[z,B]} \; ; p_L^{[z,C]} \; ; p_L^{[z,D]} \; ; p_L^{[z,E]} \right] \quad (60)$$

Si se define:

$$I_L^z = \left(\frac{\displaystyle\sum_{t=t_{MaImp}}^{t=t_{MeImp}} \left(p^{[z,t]}{}_L \times \frac{km^{[z,t]}}{km^z{}_{Totales}} \right) - p^{[z,Est]}{}_L}{p^{[z,Est]}{}_L} \right) \quad (61)$$

Es propuesto el siguiente Índice de Impacto Zonal:

$$I^z{}_{IALin} = Max\left\{0; I_L^z\right\} \quad (62)$$

Donde:
t_{MeImp}, t_{MaImp}: refieren los típicos constructivos de menor y mayor impacto en la zona z considerada, y son los límites entre los que varía el típico t; $P_L^{[z,Est]}$ es el ponderador de impacto para el típico establecido para la zona z; $p_L^{[z,t]}$ ídem para otro típico t, diferente; $km^{[z,\,t]}$ son los kilómetros de línea en la zona z, construidos con el típico t, y $km^{[z]}{}_{Totales}$ son la totalidad de los km de línea tendidos en la zona z. Se observa que si todos los tendidos de líneas en z, respetasen el típico establecido, no habría sumatoria y el Índice de Impacto Zonal resultaría nulo. Finalmente, el Índice Global de Impacto, resulta, calculando (61) en cada estado *[j, k]*: $\forall z \in Z$ (Z, es el número de zonas, cinco, en este caso):

$$I_{IALin[j,k]} = \sum_z I^z{}_{IALin[j,k]} = u_{IALin\,[j,k]} \quad (63)$$

Y tal índice se constituye, a su vez, en la variable de apartamiento para este criterio (*IALin*).

G) Calidad Ambiental: Impacto Visual por Construcción de Centros de Transformación (CT MT/BT) fuera del Típico Constructivo establecido según Zonas (IACT).

El desarrollo de este Índice Global de Impacto, es completamente análogo al anterior, reemplazando típicos constructivos de Líneas por típicos constructivos de Centros de Transformación, y kilómetros de tendido de líneas por cantidad de CT MT/BT, *nCT*. Se tiene:

$$\left[p\right]_{IACT}^{[Z]} = \left[p_{CT}^{[z,A]} \; ; p_{CT}^{[z,B]} \; ; p_{CT}^{[z,C]} \; ; p_{CT}^{[z,D]} \; ; p_{CT}^{[z,E]} \right] \quad (64)$$

Entonces si:

$$I_{CT}^z = \left(\frac{\displaystyle\sum_{t=t_{MaImp}}^{t=t_{MeImp}} \left(p^{[z,t]}{}_{CT} \times \frac{nCT^{[z,t]}}{nCT^z{}_{Totales}} \right) - p^{[z,Est]}{}_{CT}}{p^{[z,Est]}{}_{CT}} \right) \quad (65)$$

Es propuesto el siguiente Índice de Impacto Zonal:

$$I^z{}_{IACT} = Max\left\{0; I_{CT}^z\right\} \quad (66)$$

Resultando el Índice de Impacto Global:

$$I_{IACT[j,k]} = \sum_z I^z{}_{IACT[j,k]} = u_{IACT\,[j,k]} \quad (67)$$

E) Flexibilidad del Sistema (FLX)[k$/año]
El Criterio de Flexibilidad, es definido como la habilidad que tiene una variante de equipamiento de hacer frente a distintos escenarios.
La flexibilidad de una variante se sustenta en el cálculo de variación del costo total, debido a las desviaciones de demanda, respecto del mínimo costo en una condición adoptada como base (pronóstico de demanda medio), para cada estado del Espacio de Búsqueda. Se corresponde, entonces, con una variable de apartamiento, cuya referencia es el mínimo costo de estado y etapa [j, k] en un escenario de demanda media, S_D: $Flex[j,k,s_D] \rightarrow {}^uFlex\,[j,k]$, de modo que, utilizando las definiciones dadas al desarrollar la variable de apartamiento CG, se tiene:

$$u_{Flex[j,k]} = \frac{AC_{v[j,k]} - Min\left\{AC_{v[j,k]}\right\}_{S_D}}{Min\left\{AC_{v[j,k]}\right\}_{S_D}} \quad (68)$$

7. SIMULACIÓN DEL MODELO POSIBILÍSTICO SOBRE UN SDEE REAL

7.1. Generalidades sobre el SDEE

La simulación se corresponde con el período de control tarifario 2003-2007, sobre un SDEE real, emplazado en la Patagonia Argentina, en la ciudad de Bariloche, provincia de Río Negro, Argentina. Cubre, para los datos de ese quinquenio, un área de 350 [km^2]. Sirve, aproximadamente, a 40000 usuarios cuya demanda es en su mayor parte comercial y residencial (80%). 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 Centros de Transformación de 13.2/0.38 [kV] (Baja Tensión - BT).Esta ubicado en la punta del Sistema Interconectado Nacional y depende de una única línea de abastecimiento en 132 [kV]. Ante contingencias, se dispone de generación en reserva fría que cubre sólo el 40% de la demanda de punta. La misma es de unos 40 MW y resulta de carácter fuertemente estacional, como consecuencia del turismo invernal. Las condiciones climáticas locales son relativamente extremas (nieve, hielo y fuertes vientos). Estos aspectos son importantes al momento de considerar la calidad, tanto del servicio/ producto técnico (criterios *ENS,FI* y *TF*), como ambiental (criterios *IALin* y *IACT*).

7.2. Datos y Resultados

En la Tabla 1, se presenta el Espacio de Búsqueda para las transiciones posibles entre estados.

El problema de optimización se divide en *5 Etapas*. Las variantes de equipamiento por las que podría evolucionar el sistema, identificadas en el Corto/Mediano Plazo, surgen de una optimización de Largo Plazo. Se tiene: {Etapa I: Referencia,Etapa II: 5 variantes; Etapa III: 4 variantes; Etapa IV: 4 variantes; Etapa V: 3 variantes; Etapa VI: 1 variante (final)}.

Por *variante*, en este contexto, debe entenderse cierta topología de red y la aparamenta eléctrica asociada, cuyo diseño, en cierta etapa (año de corte del período de control tarifario), satisfaga con algún grado de aptitud los criterios propuestos. Los resultados obtenidos son presentados siguiendo la rutina de cálculo más clara a los fines de mostrar ciertos efectos que el Modelo Posibilístico es capaz de simular.

Esta presentación no puede, por limitaciones de espacio, desarrollar los modelos de las rutinas o problemas de optimización subordinados al Modelo en cuestión.

Tales modelos, provenientes de herramientas cuyo nombre genérico es el de Análisis de Funcionamiento del Sistema y Análisis de Contingencias (Flujos de Potencia, Cálculos de Confiabilidad Estocástica, entre otros) son de naturaleza técnica específica de los SDEE, complejos, y no aportan claridad a la simulación. La variable de estado, se indica en cada columna de la segunda fila, mediante el acrónimo del criterio correspondiente. Las transiciones posibles, se indican como {Etapa Inicial (Ei), Estado Inicial (ei); Etapa Final

[Ei,ei; Ef,ef]	CG	ENS	FI	TF	PG	IALin	IACT	FLX
[I,1; II,1]	188	1705	0.7	0.04	185	0.71	0.55	169.2
[I,1; II,2]	193	7930	1.1	0.04	210	0.98	1.07	173.9
[I,1; II,3]	186	6919	1.0	0.04	150	0.32	0.98	168.1
[I,1; II,4]	177	14994	0.81	0.040	178	0.067	0.149	159.9
[I,1; II, 5]	189	9144	0.50	0.039	190.65	0.299	0.542	170.4
[II,1; III,1]	137	9042	0.89	0.047	150.00	0.841	0.358	124.1
[II,1; III,2]	141	11656	0.98	0.039	178.65	0.426	0.155	127.3
[II,1; III,3]	149	17224	1.02	0.039	145.66	0.064	0.287	134.2
[II,1; III,4]	230	10196	0.89	0.038	201.54	0.633	0.073	207.6
[II, 2; III,1]	141	13443	1.46	0.042	186.54	0.517	0.102	127.2
[II, 2; III,2]	217	13117	0.64	0.040	170.65	0.634	0.210	195.5
[II, 2; III,3]	150	9708	1.65	0.046	164.30	1.516	1.365	135.2
[II, 2; III,4]	328	9083	0.66	0.040	180.43	0.467	0.429	295.89
[II, 3; III,1]	172	17377	1.43	0.041	193.45	1.356	0.918	155.1
[II, 3; III,2]	124	10094	0.94	0.044	158.69	0.454	0.059	111.9
[II, 3; III,3]	204	9761	1.49	0.040	193.21	1.182	0.628	183.6
[II, 3; III,4]	225	16849	1.31	0.037	154.68	0.951	0.859	202.6
[II, 4; III,1]	133	10722	1.01	0.030	110.35	0.378	0.234	120.0
[II, 4; III,2]	121	18284	0.57	0.052	175.34	0.563	0.259	108.9
[II, 4; III,3]	186	18279	1.38	0.045	160.04	0.933	0.420	168.1
[II, 4; III,4]	302	11088	1.60	0.048	165.98	0.662	0.285	271.9
[II, 5; III,1]	98.9	18324	0.90	0.047	190.02	0.876	0.342	89.0
[II, 5; III,2]	158	17852	0.79	0.042	201.54	0.421	0.642	142.4
[II, 5; III,3]	190	14236	1.31	0.045	178.54	0.861	0.397	171.6
[II, 5; III,4]	213	8451	1.62	0.039	164.66	0.788	1.447	192.4
[III,1; IV,1]	75.9	7059	1.24	0.045	180.02	1.213	1.201	68.3
[III,1; IV,2]	104	16356	1.56	0.047	125.43	0.640	1.324	93.6
[III,1; IV,3]	137	16652	1.32	0.046	150.08	0.550	1.047	123.9
[III,1; IV,4]	170	7119	1.04	0.052	135.98	0.350	0.256	153.0
[III,2; IV,1]	110	14618	1.60	0.051	115.64	1.406	0.268	99.6
[III,2; IV,2]	103	17963	1.57	0.047	105.66	1.199	1.135	93.1
[III,2; IV,3]	130	8184	0.97	0.051	121.45	0.358	0.621	117.8
[III,2; IV,4]	162	11248	0.80	0.048	140.08	0.370	0.732	146.2
[III,3; IV,1]	136	17822	1.07	0.048	109.12	0.522	0.599	122.6
[III,3; IV,2]	107	8612	0.87	0.049	135.08	0.849	0.486	96.8
[III,3; IV,3]	128	16485	0.93	0.052	127.41	0.548	0.822	115.3
[III,3; IV,4]	129	15456	1.48	0.053	140.09	0.272	0.101	116.3
[III,4; IV,1]	128	15233	1.33	0.049	112.10	0.966	1.268	115.6
[III,4; IV,2]	129	10873	1.45	0.044	101.23	0.360	0.109	116.3
[III,4; IV,3]	103.1	16075	0.67	0.046	120.09	0.514	0.100	92.8
[III,4; IV,4]	171.2	17967	1.11	0.047	123.80	0.767	1.044	154.1
[IV,1; V,1]	125.6	18489	1.39	0.057	165.05	0.116	1.297	113.1
[IV,1; V,2]	213.7	17949	2.14	0.059	170.09	1.680	0.749	192.3
[IV,1; V,3]	140.5	9343	0.87	0.055	163.23	0.456	0.280	126.5
[IV,2; V,1]	236.5	16607	0.89	0.062	155.44	0.680	0.095	212.9
[IV,2; V,2]	154.6	8797	1.62	0.052	151.02	1.219	0.390	139.1
[IV,2; V,3]	169.4	20180	1.93	0.056	155.43	1.409	0.457	152.4
[IV,3; V,1]	125.6	17531	1.31	0.055	180.98	0.956	0.892	113.0
[IV,3; [V,2]	165.3	18050	1.94	0.054	185.03	0.525	1.719	148.8
[IV,3; V,3]	155.8	16699	1.43	0.054	170.41	0.593	0.895	140.2
[IV,4; V,1]	182.8	19675	1.25	0.058	165.79	0.598	0.756	164.5
[IV,4; V,2]	193.9	17445	0.94	0.060	159.65	0.184	0.632	174.5
[IV,4; V,3]	161.5	8552	1.50	0.058	180.10	1.283	0.873	145.4
[V,1; VI,1]	126.7	11404	1.56	0.064	289.14	0.542	1.513	114.1
[V,2; VI,1]	191.5	8429	1.70	0.058	245.35	1.599	0.407	172.4
[V,3; VI,1]	188.3	21474	2.21	0.061	268.57	1.614	0.586	169.4

Tabla 1. Espacio de Búsqueda: Transición entre las Etapas de la PDD
Fuente: Elaboración Propia

(Ef), Estado Final (ef) }. La Etapa se indica en números romanos y el Estado en números arábigos, por ejemplo: [I,1; II,2]. Se tiene un valor de la variable asociada a cada criterio, *ai*, con el que se arriba al Estado Final de la Etapa Final.

En la Tabla 2 se presentan las preferencias difusas, bajo la forma de números triangulares, *NDT*, *(Izq, MP, Der)*, para la matriz triangular superior. También se presentan las preferencias colapsadas mediante el *Rv(αc)*, más consistentes, *prOpt(αc)*, para el segmento de confianza fijado en *αc = 0.25*, *[Izr(αc), Der(αc)]*, resueltas mediante el Programa Lineal (13), con *λc = λrv = 0.5*.

Segmentos de Confianza para αc = 0.25 y Solución del Problema Lineal Bi-Objetivo							
prij	**Izq**	**MP**	**Der**	**Izq(αc)**	**Der(αc)**	**Rv(αc)**	**prOpt(αc)**
pr12	1	2	3	1.25	2.75	2.00	1.25
pr13	1	3	4	1.50	3.75	2.77	1.50
pr14	2	4	6	2.50	5.50	4.00	2.50
pr15	2	5	7	2.75	6.50	4.77	4.77
Pr16	3	5	7	3.50	6.50	5.00	6.50
pr17	3	4	5	3.25	4.75	4.00	4.75
pr18	4	5	6	4.25	5.75	5.00	5.75
pr23	5	6	7	5.25	6.75	6.00	5.25
pr24	4	7	8	4.75	7.75	6.53	4.75
pr25	2	5	7	2.75	6.50	4.77	3.81
pr26	3	5	8	3.50	7.25	5.23	5.23
pr27	3	6	9	3.75	8.25	6.00	6.86
pr28	2	6	8	3.00	7.50	5.53	7.50
pr34	1	4	7	1.75	6.25	4.00	1.75
pr35	3	6	9	3.75	8.25	6.00	3.75
pr36	3	5	6	3.50	5.75	4.77	4.33
pr37	4	6	7	4.50	6.75	5.77	5.77
pr38	2	3	4	2.25	3.75	3.00	3.75
pr45	5	6	7	5.25	6.75	6.00	5.25
pr46	3	4	5	3.25	4.75	4.00	3.25
pr47	4	6	8	4.50	7.50	6.00	4.80
pr48	5	6	7	5.25	6.75	6.00	6.00
pr56	4	5	6	4.25	5.75	5.00	4.25
pr57	1	2	3	1.25	2.75	2.00	1.80
pr58	2	3	4	2.25	3.75	3.00	2.25
pr67	3	4	5	3.25	4.75	4.00	3.25
pr68	2	3	4	2.25	3.75	3.00	2.25
pr78	1	2	3	1.25	2.75	2.00	1.25

Tabla 2. Espacio de Búsqueda: Transición entre las Etapas de la PDD
Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 3, se presentan los valores de referencia, en cada etapa EI...EVI. Los criterios {ENS, FI, TF, IALin e IACT}, siguen pautas regulatorias. En los criterios {CG, PG y FLX}, se indica con PDC que sus valores de referencia dependen de la evolución generada por una Programación Dinámica Clásica. Las filas, corresponden a los acrónimos de los criterios, TF requiere de sus Mínimos valores Ur/Ru (Min TF Ur/Ru). VI pre refiere el estado proyectado, a comparar con el presente, m, en la Etapa de Control de Adaptación del Modelo.

En el criterio FLX, se ha supuesto que el costo correspondiente al escenario de demanda media, es de un 90% del correspondiente al de demanda máxima. Este valor, 0.9, denota una propensión al riesgo baja por parte del planificador (sistema rígido) y, en la práctica, debería ser consensuado con la autoridad regulatoria.
Las Tablas 4, 5 y 6 proporcionan los resultados del Modelo Posibilístico, para la simulación efectuada.
Las expresiones exponenciales, propuestas como funciones de pertenencia para cada variable de apartamiento, solidaria a los diferentes criterios, dadas por (47), se afectan de un factor de escala, δ, que multiplica al exponente. De modo que (47) se transforma en:

$$\mu_{A_i}(u_i) = e^{-u_i \times \delta \times vp_i^{[E]}(\alpha c)} \tag{69}$$

Para las simulaciones resultó apropiado δ = 0.5.

En la Tabla 4 se presenta la Trayectoria Más Satisfactoria (TMS(αc = 0.25)) de evolución para el SDEE. El VP[E] calculado en la Etapa I del Modelo, al igual que en las Tablas 5 y 6, se indica denominando sus componentes, mediante los acrónimos de cada Conjunto Difuso solidario a cada criterio. Los valores de la función de pertenencia, ponderada exponencialmente, de cada criterio, en cada (Etapa, estado) de la TMS, son indicados, también mediante sus acrónimos. El valor de *μD(T*)* es indicado como DT*.

	EII	**EIII**	**EIV**	**EV**	**EVI**	**VI Pre**
ENS Ref	11826	12483	12921	13578	14673	14673
FI Ref	0.80	0.80	1.10	1.50	1.50	1.50
Min TF Ur	0.0205	0.0215	0.0228	0.0244	0.0261	0.0261
Min TF Ru	0.0175	0.0146	0.0173	0.0197	0.0253	0.0253
TF Ref	0.0381	0.0362	0.0401	0.0441	0.0515	0.0515
CG Ref	PDC	PDC	PDC	PDC	PDC	694.57
IALin Ref	0	0	0	0	0	0
IACT Ref	0	0	0	0	0	0
PG Ref	PDC	PDC	PDC	PDC	PDC	878.55
FLX Ref	PDC	PDC	PDC	PDC	PDC	625.11

Tabla 3. Valores de Referencia para las Variables de Apartamiento solidarias a cada criterio
Fuente: Elaboración Propia

CGE	**ENS**	**FI**	**TF**	**PG**	**IALin**	**IACT**	**FLX**
2.16	1.73	1.44	1.29	0.45	0.41	0.29	0.23

E, e	**D(T*)**	**CG**	**ENS**	**FI**	**TF**	**PG**	**IALin**	**IACT**	**FLX**
I, 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
II, 3	0.82	1.00	1.00	0.82	0.87	1.00	0.94	0.87	1.00
III, 2	0.82	0.96	1.00	0.88	0.86	1.00	0.91	0.99	0.99
IV, 3	0.82	1.00	1.00	1.00	0.83	1.00	0.93	0.91	1.00
V, 1	0.78	0.89	0.78	1.00	0.85	0.98	0.82	0.88	0.98
VI, 1	**0.78**	1.00	1.00	0.97	0.85	0.98	0.89	0.80	1.00

Tabla 4. Cálculo de la *TMS(αc): αc = 0.25, δ = 0.5 y Θ= 0.*
Fuente: Elaboración Propia

GE	**ENS**	**FI**	**TF**	**PG**	**IALin**	**IACT**	**FLX**
2.08	2.08	1.19	1,19	0.52	0.39	0.27	0.26

E, e	**DT***	**CG**	**ENS**	**FI**	**TF**	**PG**	**IALin**	**IACT**	**FLX**
I, 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
II, 4	0.76	1.00	0.76	1.00	0.97	1.00	0.98	0.98	1.00
III, 1	0.76	0.92	1.00	0.86	1.00	1.00	0.93	0.97	0.98
IV, 2	0.76	1.00	0.76	0.78	0.90	1.00	0.88	0.83	1.00
V, 1	0.76	0.82	0.80	1.00	0.78	1.00	0.87	0.98	0.97
VI, 1	**0.76**	0.97	1.00	0.98	0.86	0.98	0.90	0.81	1.00

Tabla 5. Cálculo de la *TMS(αc): αc = 0.00, δ = 0.5 y Θ= 0.35.*
Fuente: Elaboración Propia

La TMS, para la Tabla 4, está por debajo de un Riesgo Extrínseco fijado en *ΘExt = 0.35*. Resultó *μ**D**(T*)= 0.778*, siendo el Riesgo Intrínseco ***ΘD*** = [*1- μ**D**(T*)*]

= 0.222 <0.35. Se observa que la TMS(c = *0.25*) es: (Etapa, E, estado, e): [(I,1); (II,3); (III,2); (IV,3); (V,1); (VI,1)].

E,e	CG	ENS	FI	TF	PG	IALin	IACT	FLX
II,3	186.8	6919	1.02	0.05	150.0	0.33	0.98	168.1
III,2	311.2	10094	0.94	0.04	308.7	0.45	0.06	280.1
IV,3	442.2	8184	0.97	0.05	430.2	0.36	0.62	397.9
V,1	567.8	17531	1.31	0.06	611.2	0.96	0.89	511.0
VI,1	694.6	11404	1.56	0.06	900.3	0.54	1.51	625.1
VI(m)	853.5	16523	1.91	0.07	1025.3	0.150	0.450	768.1
VP	**CG**	**ENS**	**FI**	**TF**	**PG**	**IALin**	**IACT**	**FLX**
VPIn	1.93	1.63	0.21	0.88	0.15	1.49	0.97	0.21
VPC	2.00	1.71	0.29	0.95	0.22	1.56	1.00	0.28
μ(m)	**0.79**	0.91	0.96	0.85	0.98	0.89	0.79	0.97

Tabla 6. Cálculo de la TMS (αc): $\alpha c = 0.25$, $\delta = 0.5$ y $\Theta = 0.35$ y Control del Estado Presente m en la Etapa VI del Espacio de Búsqueda.
Fuente: Elaboración Propia

El Vector (fila) de Prioridades Exponenciales, resuelto mediante la aplicación de los tres Programas Lineales acoplados (15), (16) y (17), y la aplicación de (18), (19) y (20), resulta: $VP[E](\alpha c = 0.25) = [2.158, 1.726, 1.439, 1.295, 0.453, 0.411, 0.288, 0.230]$, cuyos componentes se ordenan según los acrónimos definidos en la primera fila. En la Tabla 5, se presentan los mismos resultados considerando un segmento de confianza en las preferencias difusas, al nivel $\alpha c = 0.00$. La TMS($\alpha c = 0.00$) cambia a [(I,1); (II,4); (III,1); (IV,2); (V,1); (VI,1)], con $\mu \boldsymbol{D}(T^*) = 0.7564$ y un Riesgo Intrínseco más alto, $\Theta \boldsymbol{D} = [1 - \mu \boldsymbol{D}(T^*)] = 0.243$. Este constituye un primer efecto observable de la propagación de las incertidumbres inherentes a las preferencias entre criterios. En este caso, resulta: $VP[E](\alpha c = 0.00) = [2.084, 2.084, 1.191, 1.191, 0.521, 0.397, 0.272, 0.261]$, alterándose la importancia relativa entre criterios. En la Tabla 6, filas 1 a 6, se presentan los valores para la variable de cada criterio, según la $TMS(\alpha c = 0.25)$.Para el Índice de Inconsistencia, los valores de error logarítmico que arrojaron los Programas Lineales correspondientes a$VP[E](\alpha c = 0.25)$, grupo de expresiones (18) y (16), fueron: $Sum(Lh)$ = 8.405 y $ALerrcpT$ = 8.896. De modo que el Índice de Inconsistencia obtenido resultó ser, con β= 0.02, I_{inc} = 0.293. Se logra así el Vector de Aptitud para la TMS(αc = 0.25), dado por (25).Con ello se finaliza la Simulación para el Modelo Posibilístico, en las Etapas I y II. Corresponde tratar ahora con la Etapa III.Se consideró el SDEE en su condición real (estado presente, m) al final del período de control, *Etapa VI*. En la Tabla 6, fila 7, referida como $VI(m)$, se presentan los valores relevados para cada variable, según los criterios de optimización. Como fue dicho, se considera el mismo nivel de certidumbre, αc = 0.25, conjuntamente con las mismas funciones de pertenencia de las variables de apartamiento solidarias a cada criterio. Resulta un $VP^{[E,m]}$cuyas componentes, no satisfacen el principio de consistencia dado por (34); por lo que, en la Tabla 6, el $VP^{[E,\ m]}$ es referido, en la fila 9, como *VPIn* (preferencias en m, inconsistentes). Sumando los componentes, se observa que la sumatoria, $\sum_{i=1}^{n} vp_i^{[E,m]}(\alpha c)$, exigida por el principio de consistencia, resulta 7.450 < 8. Para ajustar tal inconsistencia, se corren los Programas Lineales (35) y (36). Arrojan el error logarítmico de inconsistencia $ALerrcpT(m)$ = 37.658. En la fila 10 de la Tabla 6, indicado como *VPC*, (preferencias en m, *consistentes*) se presenta el $VP^{[E,\ m]}$ ajustado, cuya sumatoria de componentes es $n = 8$. Luego $I_{con}(m)$ = 0.529 y $R_D(m)$ = 0.809. Finalmente, en la fila 11 de la Tabla 6, se indican los valores de aptitud ponderada, según VPC, para cada criterio. Se obtiene el Riesgo Intrínseco del estado presente $m, \Theta D(m) = 1 - 0.793 = 0.207 < \Theta Ext = 0.35$, por lo cual $\Delta \mu_{\boldsymbol{D}}(m)$ = 0. De este modo, el Vector de Adaptación Dinámica sugiere que, si bien existe la posibilidad de que el sistema continúe evolucionando a partir del estado presente, mediante una trayectoria de riesgo menor que el Riesgo Extrínseco impuesto en la planificación, se presentan inconsistencias en las preferencias. Comparando el $VP^{[E]}$, Tabla 4, con el $VP^{[E,\ m]} \equiv VPC$, Tabla 6, se observa, fundamentalmente, una clara inversión de preferencias. Son sobrevalorados los aspectos de calidad ambiental en detrimento de la calidad eléctrica.

8. CONCLUSIONES

1ra) El concepto tradicional de Sistema de Distribución Económicamente Adaptado adscribe al Paradigma económico Neo-Clásico, refiriendo sólo la eficiencia productiva (expansión y operación del SDEE a mínimo costo). Por tanto, el riesgo o bien no existe, o se traduce en una certeza estocástica, cuyas consecuencias redundan en una segura desadaptación del sistema. El modelo propuesto implica, en tal contexto, un cambio de paradigma.

2da) El paradigma alternativo está caracterizado por la incertidumbre fundamental de Keynes y su Análisis de Riesgo. Se prefiere un conjunto de buenas soluciones (trayectorias de evolución para el sistema) y no una solución 'óptima', sustentada en un equilibrio estático que no puede sostenerse en la evolución del sistema.

3ra) En términos del grado de adaptación del sistema para cierto estado presente, se propone reconstruir el mejor vector representativo de las preferencias, cuyos valores fueron obtenidos en la etapa previa a la planificación. Desde el mismo, surgen dos indicadores: el primero capaz de evaluar inconsistencias por cambios en las preferencias entre criterios, y el segundo capaz de medir si la trayectoria del sistema podría evolucionar, tal vez por otros estados, sosteniendo el nivel de riesgo inferior al fijado externamente.

REFERENCIAS

Bellman R., Dreyfus E., 1962:"Applied Dynamic Programming". Princeton University Press, 1962.

Bellman R., Zadeh L., 1970: "Decision-Making in a Fuzzy Environment".Management Science, 17, pgs.141-164.

Dubois D., Prade H., 1980:"Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications". New York, London, Toronto Press.

Kaufmann A., Gupta M., 1985:"Introduction to Fuzzy Arithmetic. Theory and Applications".Van Nostrand Reinhold Electrical/ Computer Science and Engineering Series.

Lavoie M., 1992: "Foundations of PostKeynesian Economic Analisys". Edward Elgar Publishing.

Lax P., 1997:"Linear Algebra". Wiley Interscience: New York.

Saaty T., 1977:"A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures". Journal of Mathematical Psycology, 15, 234-281.

Schweickardt G., 2007: "Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Económicamente Adaptados. Discusión y Propuestas Metodológicas", Bariloche, Río Negro, Argentina. Editorial Fundación Bariloche.

Schweickardt G., Miranda V., 2007:"Un modelo de Planificación y Control orientado a la Adaptación Económica de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica". Revista de la Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa, 28, 30-49.

Yager R., 1977:"Multiple Objective Decision Making using Fuzzy Sets". Intl. J. Man-Machine Studies. 9, 53-64.

Zadeh L., 1971: "The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Aproximate Reasoning".Memorandum ERL-411, Berkeley.