Un modelo posibilístico para determinar el costo de la calidad ambiental

En la planificación de mediano/corto plazo de un sistema de distribución eléctrica

A possibilistic model to determine the cost of environmental quality

in mid/short term planning of an electrical distribution system

Recibido para evaluación: 14 de Junio de 2011
Aceptación: 26 de Abril de 2012
Recibido versión final: 30 de Abril de 2012

Gustavo Alejandro Schweickardt[1]
Juan Manuel Giménez Álvarez[2]

RESUMEN

El presente trabajo propone un Modelo de Optimización Posibilística aplicado a la determinación dinámica del Costo de la Calidad Ambiental de un Sistema de Redes en Distribución Eléctrica, ponderado a través de su impacto visual. Se considera la planificación de mediano/corto plazo del sistema, conforme el período de control regulatorio, bajo criterios a cuyas variables se le reconocen incertidumbres de valor y, por tanto, no estocásticas. Se introducen los conjuntos difusos, como elemento de captación de tales incertidumbres, estableciendo una posibilidad de ocurrencia en sus valores. La planificación resulta, por tanto, posibilística, y recurre a la técnica de Programación Dinámica Difusa. Dadas las incertidumbres en la importancia que cada criterio pueda tener en el mérito de una solución, se introduce, adicionalmente, un Modelo de Preferencias que permite definir formalmente la importancia que cada criterio tiene, mediante un vector de prioridades. El cálculo del Costo de Calidad Ambiental se sustenta en relacionar, para cualquier estado de la trayectoria más satisfactoria de evolución obtenida, el Costo Anual de Inversión con un Índice de Impacto en la Calidad Ambiental, propuesto. Se presenta una simulación sobre un sistema real, así como las conclusiones más pertinentes del Modelo.

Palabras claves: Calidad ambiental; Impacto visual en redes eléctricas; Optimización posibilística; Conjuntos difusos; Planificación de sistemas de distribución eléctrica.

ABSTRACT

This work presents a Possibilistic Optimization Model to determine the Dynamic Environmental Quality Cost, applied on a Electricity Distribution System and messured as Network System Visual Impact. The Mid/Short Term Planning is the Regulatory Control Period. A multicriteria optimization approach is proposed, and for each criteria, non-stochastic uncertainties are recognized and represented by mean the introduction of Fuzzy Sets. In this way, a possibilty in the occurrence of criteria variables values, is established. In addition, as consequence of uncertanties of criteria preference ranking, a Model to obtain a criteria Priority Vector is introduced. The Environmental Quality Cost determination is based in the relationship between the Investment Cost and an Impact Index of Network System Environmental Quality, proposed in this work. Finally, a simulation on a real system and the most important conclusions are presented.

Keywords: Environmental Quality; Network System Visual Impact; Possibilistic Optimization; Fuzzy Sets; Electric Distribution System Planning.

1. Doctor en Ingeniería. Máster en Economía y Política Energético-Ambiental y Especialista en Ingeniería del Software. Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Instituto de Economía Energética/Fundación Bariloche, Argentina. e-mail: ustavoschweickardt@conicet.gov.ar

2. Doctor en Ingeniería. Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, Argentina. e-mail: jgimenez@unsj.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Calidad e impacto ambiental en sistemas de redes eléctricas

En los sistemas de redes eléctricas, los factores de impacto ambiental son múltiples, de dificultosa identificación y, por tanto, mitigación. Al hablar de impacto, se asumen *impactos negativos*. La regulación ambiental al respecto es prácticamente inexistente en el estado del arte, posiblemente a raíz de la precariedad con la que los cuerpos regulatorios fueron constituyéndose, en el avance de los procesos de liberalización de mercados. El medio- ambiente comenzó de modo tardío a tener importancia en estos mercados, puesto que resultaba prioritario establecer esquemas de incentivos que se orientasen a la prestación del servicio eléctrico con ciertos niveles de calidad técnica, relativamente menos complejos de identificar pero, aún así, de fijación arbitraria. Este es el caso de la calidad del servicio técnico, ponderada mediante la energía no suministrada por cortes, y de la calidad del producto técnico, ponderada por el nivel de tensión eléctrica de suministro a usuarios, entre otros indicadores. En países como Argentina, pionero en la definición de este tipo de Calidad a nivel del usuario, se fijan penalizaciones por no- calidad, imputándose a los dos indicadores mencionados, un valor "económico", sin ningún tipo de análisis formal que lo justifique. Esta situación se ha extendido a cualquier marco regulatorio, conforme el estado del arte.

Durante la pasada década, se ha intentado introducir el criterio de calidad ambiental en los sistemas de redes, ponderado mediante el impacto visual producido por la aparamenta eléctrica, particularmente las líneas aéreas y los transformadores del sistema. Tal introducción ha tomado relevancia para sistemas emplazados en ciudades cuya principal actividad económica es el turismo, el cual depende del paisaje natural ofertado. Sin embargo, la improvisación en las definiciones y en la valoración económica de penalizaciones por impacto, ha sido aún mayor que en los indicadores de calidad técnica referidos. Desde aquí, se plantea la necesidad de definir, de forma operacional, los impactos asociados a la calidad ambiental de las redes, así como un valor económico metodológicamente consistente. Específicamente, se acotará el análisis a los sistemas de distribución de energía eléctrica, pues son los que se emplazan en las ciudades, abasteciendo en forma directa a los usuarios finales. Por tanto, es pertinente introducir en la discusión relativa a la valorización de la calidad ambiental de un sistema de redes, el concepto de sistema económicamente adaptado, establecido normativamente.

1.2. La valoración económica de la calidad ambiental en la planificación de sistemas de distribución de energía eléctrica económicamente adaptados

La planificación óptima de un sistema de abastecimiento de energía eléctrica, tradicionalmente ha procurado la minimización de sus costos de inversión y de operación y mantenimiento, fijando, arbitrariamente, ciertos niveles de calidad de servicio, consecuencia de la satisfacción de estándares tecnológicos. Desde hace más de dos décadas, la desregulación del servicio de abastecimiento eléctrico dio lugar a una segmentación de la cadena productiva de la electricidad (Schweickardt y Pistonesi, 2007). En cada segmento, denominados "generación", "transmisión", "distribución" y, en algunos países, "comercialización", se intenta introducir algún grado de competencia. En aquellos, como la generación y comercialización, en los que tal competencia es posible, se habla de *mercados disputables* o *casi- competitivos*. En los otros, transmisión y distribución que constituyen un *servicio de redes*, se tiene un *monopolio natural no disputable*, y, por tanto, *sus mercados requieren regulación*. En particular, sobre el segmento de distribución, se plantea el problema de definir un sistema de distribución de energía eléctrica (SDEE) económicamente adaptado. Se trata de un concepto que la Autoridad Regulatoria Eléctrica ha acuñado e introducido en las normativas de diferentes países, entre los cuales están Chile, Argentina, Colombia y Perú en Latinoamérica, y España y Portugal en Europa (Schweickardt y Miranda, 2007; García, Schweickardt y Andreoni, 2008; Schweickardt y Miranda, 2009).

Siguiendo el nuevo enfoque de la Teoría Económica de Regulación, sustentada en los aportes del paradigma neo- clásico, *tal concepto sólo destaca la eficiencia productiva del sistema (expansión y operación a mínimo costo)*. Cualquier apartamiento de esa condición es juzgado como una *desadaptación del sistema y, por tanto, penalizada*. La *eficiencia asignativa*, requerimiento sustancial para conferir a los costos identificados un carácter *económico*, se introduce como hipótesis o condición dada, y los diferentes productos que deben ser ofertados en la prestación del servicio, como la calidad ambiental, calidad de servicio técnico, entre otros, se suponen, de tal modo, *valorizados a su costo*

Volumen 15 - No. 1, Mayo de 2012, Medellín ISSN 0124.177X. pp 59-76

social de oportunidad. La no- calidad resulta, entonces, penalizada con un valor monetario proveniente de aquella hipótesis, y, por tanto, de dudosa concepción. Desde tal enfoque, *toda desadaptación posible será estática, ignorando la naturaleza histórico- evolutiva del sistema* (Schweickardt y Pistonesi, 2007).

Considerando esta última característica como la limitación principal en el concepto, el mismo debe abordarse en un marco metodológico más amplio. En efecto, la sola planificación sustentada en métodos de optimización clásicos (afines con el paradigma económico referido) no es suficiente para juzgar desadaptaciones. Esta aseveración se fundamenta, al menos, en cuatro razones:

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 referido), 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 de tal período*; por último

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, sumado al costo arbitrariamente asociado para aquellas variables no monetizables, tal como calidad ambiental y la calidad de servicio- producto eléctrico. Particularmente, bajo las condiciones c) y d) es aplicado el concepto en cuestión, conforme los cuerpos regulatorios arriba referidos.

En este trabajo, se presenta un modelo de solución formal acorde con un concepto que involucra *un grado de satisfacción dinámico, acotado por cierto riesgo aceptable por el planificador, en la adaptación económica en SDEE*. Se intenta, de tal manera, superar los inconvenientes expuestos. En este marco, *es propuesta una metodología consistente para identificar los costos de variables o criterios de optimización, cuyo valor económico se desconoce, pero que puede ser obtenido como una propiedad intrínseca del sistema en evolución*. Este es el caso, específicamente, de la calidad ambiental del sistema de redes, considerada, sin pérdida de generalidad y a los fines de simulación, mediante el impacto visual producido por la aparamenta eléctrica (líneas y transformadores) que lo integra. A los efectos de facilitar la lectura de los desarrollos presentados en este trabajo, se ha dispuesto una lista de abreviaciones, relativa al significado de las variables y parámetros involucrados, en la sección homónima, al final del trabajo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Síntesis metodológica del modelo posibilístico empleado para la planificación de Mediano/corto plazo del SDEE. Determinación del costo intrínseco de la calidad ambiental del sistema de redes

El modelo posibilístico propuesto, que será adecuadamente introducido en los epígrafes siguientes, al desarrollar los elementos matemáticos requeridos, recurre a un *esquema de tres etapas*. En la Etapa I, se parte de la información sobre las preferencias que los distintos criterios considerados en la optimización exhiben, comparándolos de a pares. La etapa en cuestión desarrolla un enfoque metodológico para lograr *el conjunto de valores de preferencias más consistente* y, finalmente, obtener el Vector de Prioridades (Saaty, 1977) sobre las mismas, que resulte representativo de la importancia de cada criterio. Este vector servirá para ponderar los mismos, según se integran en la etapa siguiente.

La Etapa II aborda la planificación en el mediano/corto plazo del SDEE, en el marco propiciado por las técnicas de Programación Dinámica Difusa (Bellman y Zadeh, 1970) (Schweickardt y Miranda, 2009), y de los desarrollos aplicables en la Etapa I. Para cada criterio, son contempladas sus *incertidumbres de valor* (Lavoie, 1992), en tanto el grado de satisfacción que el mismo alcanza en cierto estado. Se ha optado modelar tales incertidumbres mediante *conjuntos difusos*, cuyas consideraciones básicas serán introducidas también más adelante. Los criterios resultarán, entonces, *distribuciones de posibilidades*, habida cuenta de la equivalencia entre las mismas y los *conjuntos difusos* (Doubois y Prade, 1980) y (Zadeh, 1977). El modelo empleado arrojará un *conjunto de trayectorias posibles de evolución del sistema*, *a las que se les confiere el carácter de satisfactorio, por encima de cierto umbral de riesgo que el planificador está dispuesto a enfrentar*. Si las preferencias obtenidas en la Etapa I son invariantes, existirá una trayectoria más satisfactoria, TMS, como resultado. Al modificar las preferencias entre criterios, se modificará, consecuentemente, la TMS. Por ello se habla de *conjunto* de TMS's.

La Etapa III se enfoca en el cálculo del costo intrínseco asociado a la calidad ambiental, sobre la TMS resultante en la Etapa II. Se concibe, de tal modo, *que el valor económico asociado al impacto ambiental es el resultado de las preferencias establecidas sobre el sistema de redes, y de su evolución en el horizonte temporal analizado*. Éste debería coincidir con el período de control tarifario o regulatorio. Así es establecido en el estudio de caso simulado en el presente trabajo, para el quinquenio regulatorio fijado por la normativa argentina. Porque tal costo resulta *dependiente de las propiedades del sistema y su evolución, se lo refiere como intrínseco*. Al considerar *incertidumbres*, siempre existirá asociado un *riesgo de insatisfacción en la trayectoria seleccionada*, consecuencia de que el sistema de redes pueda evolucionar por una trayectoria diferente. Por ello, *todo costo tendrá asociado un riesgo*, también *intrínseco*. Así se hablará en los resultados, del costo Intrínseco de la calidad ambiental del sistema de redes, a determinado nivel de riesgo.

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, TMS; y

b) En el marco de un concepto más realista de adaptación económica del sistema, permitir la introducción operacional de un factor de impacto asociado a la calidad ambiental del sistema de redes e internalizar su costo posible, dadas las incertidumbres consideradas. Por lo dicho, puede hablarse de un Modelo Posibilístico.

2.2. Desarrollo de los conceptos y herramientas matemáticas requeridas por el modelo posibilístico de optimización dinámica conforme las etapas definidas

2.2.1. Las incertidumbres no estocásticas desde un paradigma alternativo

No puede omitirse una breve discusión epistemológica, abordando *la relación entre el tipo de incertidumbre con la que tratan los modelos clásicos de optimización y su vínculo con el paradigma económico dominante* (referido como neo- clásico). Del mismo modo, *describir el tipo de incertidumbre referida en este trabajo, y su relación con la técnica de optimización solidaria al modelo propuesto*, en el seno de un paradigma económico alternativo.

El paradigma alternativo, aquí referido como post- keynesiano (Lavoie, 1992), destaca la siguiente clasificación propuesta por Keynes:

a) Existe *certeza* cuando cada opción invariablemente lleva a un resultado específico, cuyo valor es conocido inequívocamente;

b) Existe *riesgo*, o *certeza equivalente*, cuando cada elección conduce a un conjunto de posibles resultados específicos, de valores conocidos o asociados con una probabilidad específica y

c) 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. El *riesgo* se torna así en una *medida de arrepentimiento por seleccionar, en tal contexto de incertidumbre, aquello que se juzgó preferible, sin serlo en su ocurrencia*. Se tienen, entonces, *dos tipos de incertidumbres*: 1) de *probabilidad*; y 2) la que se corresponde con la caracterización más amplia de lo dicho en c), que Keynes refiere como *incertidumbre fundamental de valor*. 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 constituye una distribución de posibilidades* (Zadeh, 1977; Doubois y Prade, 1980). Desde estas consideraciones, se hablará de *incertidumbre 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, incertidumbre fundamental de valor*. En tal sentido, las técnicas clásicas de optimización constituyen claros soportes a problemas del tipo de la aplicación propuesta, *en el dominio determinístico/estocástico*. Resultan solidarias al *principio del costo marginal*, costo de eficiencia que la corriente de pensamiento neo- clásica propugna en todos sus modelos. En particular, *los costos de oportunidad de las penalizaciones referidas*, en concepto de alguna de las formas de no- calidad, se intentan asimilar a costos marginales, no obstante las importantes dificultades metodológicas para su estimación. Pero la aplicación de este principio para determinar costos económicos, *colapsa por completo frente a la incertidumbre fundamental*, por lo que también fracasan aquellas técnicas. La razón de mayor peso es que el costo marginal se funda en una condición de equilibrio (óptimo de Pareto, relacionado con la *eficiencia asignativa*), absolutamente imposible de validar en términos reales. Uno de los presupuestos que caracterizan al paradigma neo- clásico, es la *racionalidad sustantiva o completa* que exhiben los tomadores de decisiones, agentes del sistema. Supone un *conocimiento perfecto* por parte de los mismos, ubicando el universo de decisión en la *certeza de sus estados* o bien en la *certeza estocástica o equivalente* (su noción de *riesgo*). Por el contrario, en el mismo presupuesto para el paradigma post- keynesiano, *la racionalidad es acotada o procedural* y, por tanto, los actores tienen un conocimiento *acotado o imperfecto*, lo que redunda en un Universo de Decisión dominado por la *incertidumbre fundamental* inherente a sus estados. Se desvanece, así, toda consideración apriorística de equilibrio como medio para concebir la eficiencia en la asignación de recursos. Existirán *soluciones satisfactorias, en lugar de óptimas*, y, si bien se preserva la aplicación de instrumentos matemáticos clásicos, deberá ser complementada mediante técnicas capaces de tratar con este nuevo contexto, más realista.

Por ello surge la necesidad de proponer una *metodología alternativa de optimización dinámica* (Schweickardt y Pistonesi, 2007), sustentada en herramientas tales como las que se desarrollan en el presente trabajo.

2.2.2. Etapa I: Determinación del vector de prioridades resultante de la matriz de preferencias entre los criterios de optimización establecidos

2.2.2.1. El método autovalor- autovector de Saaty

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, a_{ij}, son definidas a partir de una *escala de dominancia* establecida sobre el intervalo [1..10] de números enteros. Los criterios se comparan de a pares, siendo a_{ij} 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*: si a_{ij} es un número entero en el intervalo [1..10] y $a_{ji} = 1/a_{ij}$. Entonces:

$$MPA = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \vdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix};\ \text{con: } a_{ij} > 0\ \forall\, i, j = \{1 \in n\}\ \text{y}\ a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \qquad (1)$$

El Teorema de Perron (Lax, 1977) garantiza, para tal matriz, la existencia de un *autovalor dominante* y *positivo*, λ_P, al igual que su *autovector*, V_P. Se cumple que:

$$\lambda_P \geq n \qquad (2)$$

y sólo si la matriz MPA exhibe preferencias consistentes, resultará:

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

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

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

El índice de consistencia de Saaty, que mide el cumplimiento de (4), es definido como:

$$ICSaaty = (\lambda_P - n)/(n-1) \qquad (5)$$

El *autovector de Perron*, V_P, asociado a MPA, satisface el principio de composición jerárquica (Saaty, 1977), definido como: V vector de prioridades y c constante, entonces :

$$MPA \times V = c \times V \quad (6)$$

si $c = \lambda_P$ y $V = V_P$, *tal principio es satisfecho*. Es decir: los vectores posibles de Prioridades difieren en una constante de escala, respecto de V_P. Pero l*as prioridades relativas entre criterios, no se modifican*.

2.2.2.2. Utilidad y empleo del vector de prioridades en el modelo posiblilístico

El *autovector de Perron*, V_P, a partir de aquí indicado como Vector de Prioridades entre los n criterios de optimización seleccionados, tiene una *doble utilidad*.

Para la *primera*, se normalizan sus componentes, sumando sus valores asociados a cada criterio i-ésimo, y dividiéndolos por la suma. Se obtiene el Vector de Prioridades Normalizado. Formalmente:

si $V_P = [vc_1, vc_2,\ldots, vc_n]^T$, donde el super- índice T significa *transpuesto*, ya que se ha escrito como *vector fila* por comodidad, y cada componente vc_i, con i en [1…n], es el *peso* o *prioridad del criterio de optimización i-ésimo*, entonces: Sum = $\Sigma_i^n vc_i$. Luego, el Vector de Prioridades Normalizado, resulta (escrito como *vector fila*):

$$V_{PN} = [vc_1/Sum, vc_2/Sum,\ldots, vc_n/Sum]^T = [vc_{1N}, vc_{2N},\ldots, vc_{nN}]^T \quad (7)$$

Se cumplirá, lógicamente, que: $\Sigma_i^n vc_{In} = 1$. Esta propiedad sirve a los efectos de calcular un *promedio ponderado entre los valores que puedan asumir los diferentes criterios*, conforme la Matriz de Preferencias, MPA. Los ponderadores resultan, precisamente, los componentes vc_{iN} , i en [1…n]. A esta forma del Vector de Prioridades asociado a MPA, se la llama Lineal.

La *segunda utilidad* es la de interés en este modelo. Se basa en la denominada la forma de Yager de dichos ponderadores lineales (Yager, 1977). Simplemente, consiste en multiplicar cada componente normalizado, por el número de criterios, n. de manera que el Vector de Prioridades de Yager resultará (escrito como *vector fila*):

$$V_{PY} = [vc_{1N} \times n\ vc_{2N} \times n,\ldots,vc_{nN} \times N]^T = [vc_{1Y}, vc_{2Y},\ldots, vc_{nY}]^T \quad (8)$$

Es claro que la suma de los componentes del Vector de Prioridades de Yager será igual a n. A esta forma del Vector, se la refiere como de Yager o como forma exponencial. Su afectación es *la de dar mayor o menor importancia a los criterios en el proceso de toma de decisión estática, cuyas incertidumbres derivan, como se dijo, en una modelación mediante conjuntos difusos*. De modo que el objeto de la Etapa I, es la obtención del Vector de Prioridades de Yager asociado a las preferencias entre los Criterios de Optimización, considerados en la planificación de mediano/corto plazo, para el SDEE bajo estudio.

2.2.3. Etapa II: El modelo de optimización posibilística

2.2.3.1. Los conjuntos difusos y su aplicación para captar las incertidumbres de valor en cada criterio

A los efectos de considerar cada criterio de optimización con sus incertidumbres inherentes, no puede emplearse una *variable real*. Se debe emplear una *función* que establezca *grados de satisfacción* mediante los cuales el planificador pondere el *mérito*, en cierto intervalo predefinido, del valor asumido por la variable asociada a cada criterio. Con esta finalidad, las variables correspondientes *no son integradas en forma directa*, sino que se introduce el concepto de *variables de apartamiento* (Schweickardt y Miranda, 2009). Para cierto criterio C_i, cuya variable asociada asume el valor vc_i, la *variable de apartamiento*, u_i, respecto de cierto *valor de referencia*, indicado como vc_i^{Ref}, queda definida mediante la expresión:

$$u_i = \left| vc_i - vc_i^{Ref} \right| / vc_i^{Ref} \quad (9)$$

donde vc_i^{Ref}, valor de referencia, es el que el tomador de decisiones/planificador, juzga como de plena satisfacción. Los apartamientos, u_i, se consideran en valor absoluto, puesto que interesa saber cuánto se “aparta”, en cualquier sentido, vc_i respecto de vc_i^{Ref}, para juzgar el mérito de una solución. El tomador de decisiones *no tiene certeza* de la satisfacción de cierto valor que asume la variable de apartamiento asociada a cada criterio. Por ello, se habla del tipo de *incertidumbre de valor*, referido

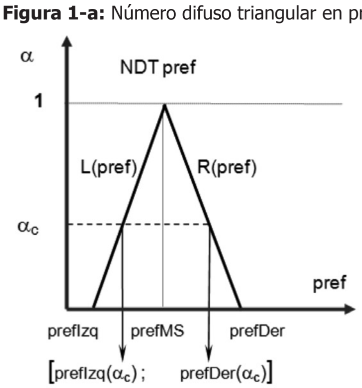
Volumen 15 - No. 1, Mayo de 2012, Medellín ISSN 0124.177X. pp 59-76

en **2.2.1.**. Al emplear esta nueva variable, todos los criterios quedan valorizados en el mismo dominio adimensional. En este estadio, es donde resulta pertinente la introducción de una *función* asociada a la variable u_i, que establezca la satisfacción de cierto valor de vc_i respecto de vc_i^{Ref}. Esta función es ***subjetiva***, si bien tiene mecanismos sugeridos para su construcción, conforme cada contexto que exhiba el problema abordado (Zadeh, 1970). Si tal *grado o nivel de satisfacción* es *normalizado* en [0, 1] (1 para máxima satisfacción, 0 para mínima) y la función es *convexa*, se está frente a un *conjunto difuso*, y la función se llama Función de Pertenencia del mismo. Establece el grado en que un elemento pertenece al conjunto. Por caso, si se tratara de un conjunto clásico o rígido, como se suele referírselo, la *pertenencia* asumiría dos valores: 1 cuando un elemento pertenece, y 0, cuando no pertenece al conjunto. Como se infiere, en un *conjunto difuso*, *un elemento puede tener un grado continuo de pertenencia* en [0, 1], por ejemplo 0.5. A mayor grado, mayor aceptación del valor de la variable asociada a un criterio, dentro del mérito en una toma de decisión. Entonces, para cada Criterio, C_i, se tendrá un *conjunto difuso*, que se indicará mediante $\{C_i\}$, cuya función de pertenencia, *normal* y *convexa*, se indicará como $\mu_{\{C_i\}}(u_i)$. Cada conjunto difuso suele ser representado apelando a la notación $\mu_{\{C_i\}}(u_i)$, y es la notación que se empleará en lo sucesivo. La Figura 1-a muestra un *conjunto difuso* asociado a cierta variable, pref, indicado como {pref}. En este caso, se tiene una función de pertenencia segmentada en dos, a izquierda (L) y a derecha (R).

Esta forma responde a un *número difuso*, tipo especial de *conjunto difuso* (Doubois y Prade, 1980). Las *incertidumbres de valor* se observan al asociar un *nivel de satisfacción* (*pertenencia* o *certidumbre*), α, que asume el valor α =1 para el valor pref más satisfactorio, prefMS, y va disminuyendo hasta la insatisfacción total, α = 0, a medida que se apartan los valores de la variable pref, respecto de prefMP, llegando a prefIzq y prefDer, respectivamente, como valores inaceptables. En este caso, al ser lineales, las funciones L y R, se tiene un tipo muy frecuentemente empleado de *conjunto/número difuso*, llamado Número Difuso Triangular (NDT). Nótese que al fijar un nivel de satisfacción, $\alpha = \alpha_c$, en abscisas, se proyecta un intervalo de valores de la variable pref, indicado como [prefIzq(α_c) ; prefDer(α_c)], denominado segmento de confianza. El mismo, diferenciándose del intervalo de confianza utilizado en probabilidades, pretende reflejar la situación siguiente: si las funciones L y R son las establecidas, entonces *fijado un nivel de satisfacción o certidumbre*, $\alpha = \alpha_c$, *las ocurrencias en los valores de pref deberían pertenecer a tal segmento o*, *también, α-corte*. Si se trabaja con una *variable de apartamiento*, upref, al ser los desvíos respecto del valor pref, tomados en valor absoluto, la representación del *conjunto difuso*, se observa en la Figura 1-a. Es claro que, implícitamente, se trata de un *número difuso*. Es demostrable, como se dijo, la relación entre un *número difuso* y una distribución de posibilidades, según Doubois y Prade (1980). Por ello, resulta pertinente la caracterización del modelo de optimización propuesto en este trabajo, como posibilístico.

Figura 1-a: Número difuso triangular en pref

Figura 1-b: Conjunto difuso μ(upref)



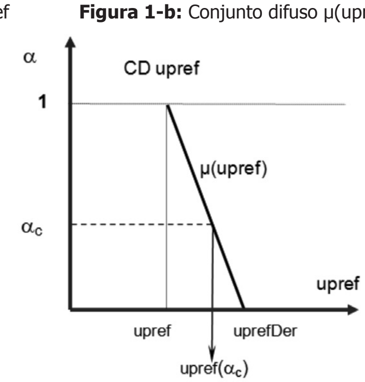


Figura 1-a: Número difuso triangular en pref

Figura 1-b: Conjunto difuso μ(upref)

Como ejemplo, upref podría ser el valor del índice de impacto ambiental más satisfactorio en el sistema de redes, y las incertidumbres en el grado de satisfacción estriban en que un impacto mayor podría ser tolerado, a cambio de una mejora en los otros criterios de optimización. Fijado un valor $\mu = \alpha = \alpha_c$, las ocurrencias aceptables de upref deberían presentarse en el segmento de confianza [-upref(α_c), +upref(α_c)]. Este es precisamente el caso introducido en el modelo propuesto.

Adicionalmente, es importante destacar *el efecto que tienen los ponderadores de Yager*, obtenidos en la Etapa I, sobre los *conjuntos difusos* asociados a cada criterio i-ésimo. Este punto se trata en el epígrafe siguiente.

2.2.3.2. La toma de decisión estática difusa

Para la *toma de decisión estática difusa* (Bellman y Zadeh, 1970) introducen el concepto de Conjunto Difuso de Decisión, definido por la expresión, para n conjuntos:

$$\{D\} = \{C_1\} <opC> \{C_2\} <opC>\ldots<opC> \{C_{m-1}\} <opC> \{C_n\} \tag{10}$$

donde <opC> es un *operador* entre *conjuntos difusos* que recibe el nombre de *confluencia*. La *confluencia* más frecuentemente empleada en este contexto, es la *intersección*. Asociado al *operador* <opC> entre los *conjuntos difusos*, existe un *operador matemático*, opC, aplicable a sus *funciones de pertenencia*, que genera, desde (10), el *valor de pertenencia* del conjunto difuso de decisión. Es decir:

$$\mu\{D\} = \mu\{C_1\} \text{ opC } \mu\{C_2\} \text{ opC}\ldots\text{opC } \mu\{C_{m-1}\} \text{ opC } \mu\{C_n\} \tag{11}$$

El *operador* opC recibe el nombre general de *t-norma*. Por ejemplo, si la *confluencia* fuese la *intersección*, <C> ≡ ∩, opC resulta la *t-norma* Min: el *mínimo valor, para cierta instancia de las variables de decisión, en el conjunto de funciones de pertenencia* del segundo miembro de la expresión (13). Entonces, si [A] es un conjunto de alternativas sobre las que debe decidirse por la mejor, <opC> ≡ ∩ y opC = Min, se define como Decisión Maximizante de Bellman y Zadeh, al valor de la *función de pertenencia* en el conjunto difuso de decisión, dado por:

$$\mu\{D\}_{Max} = MAX_{[A]} \{ \text{Min } \{\mu\{C_1\}, \mu\{C_2\},\ldots, \mu\{C_{m-1}\}, \mu\{C_n\} \} \tag{12}$$

Ahora bien, si cada uno de los n criterios de decisión, modelados mediante sendos *conjuntos difusos*, tiene una *escala de prioridades* dada por el Vector de Yager, el componente de dicho vector asociado a cada criterio *debe afectar exponencialmente a la función de pertenencia respectiva*. La razón es la siguiente: si todos los criterios fuesen igualmente preferidos, el vector de prioridades normalizado de Perron tendría como componentes el mismo valor, 1/n. Al obtener el Vector de Prioridades de Yager, las componentes o ponderadores de Yager serían, según la definición dada, iguales a 1 de modo que al elevar la cada función de pertenencia en (12) a un Ponderador de Yager igual a la unidad, no sufriría modificación alguna en la *confluencia* intersección y, por tanto, en el *operador* Min. En cambio, si existen preferencias distintas, los componentes del Vector de Yager serán positivos, algunos mayores que uno, y otros menores. El efecto exponencial de un ponderador sobre el respectivo *conjunto difuso* resultará en una *contracción* del mismo, si el Ponderador de Yager es pY > 1, y en una *dilatación*, si pY <1. *La contracción impone más importancia en la confluencia, y en la dilatación, menos importancia*. Se observa este efecto en la Figura 2. En la misma, se consideran los conjuntos: $\mu(u)$, $\mu(u)^{pY}$ con pY > 1, y $\mu(u)^{pY}$ con pY < 1. Por caso, un cierto valor, considerado mínimo, de $\mu(u)$, es aún “más mínimo” en $\mu(u)^{pY}$ con pY > 1 y “menos mínimo” si $\mu(u)^{pY}$ con pY < 1. Se observa, entonces, como se *prioriza el criterio* cuya *variable de apartamiento* es u, conforme la afectación exponencial de su *conjunto difuso*. La *decisión estática difusa ponderada por preferencias*, queda, entonces, establecida como:

$$\mu\{D\}^{pY}_{Max} = MAX_{[A]} \{ \text{Min } \{\mu\{C_1\}^{pY\{C1\}}, \mu\{C_2\}^{pY\{C2\}},\ldots, \mu\{C_{n-1}\}^{pY\{Cn-1\}}, \mu\{C_n\}^{pY\{Cn\}} \} \} \tag{13}$$

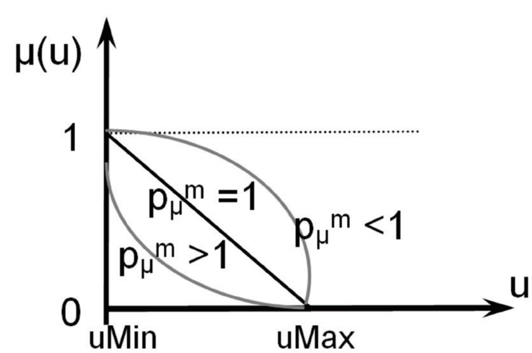


Figura 2: Contracción y dilatación exponencial de un conjunto difuso

Volumen 15 - No. 1, Mayo de 2012, Medellín ISSN 0124.177X. pp 59-76

2.2.3.3. La programación dinámica difusa

La Programación Dinámica Difusa (PDD) está basada en los *principios de optimalidad* propuestos por Bellman y Dreyfus (1962) y Bellman y Zadeh (1970), y propende por la inclusión de incertidumbres no estocásticas en el problema a resolver. Requiere la consideración de *conjuntos difusos*, asociados a cada uno de los n criterios mediante los cuales se define la *aptitud de cada estado posible*, en la evolución de un sistema cuya trayectoria pretende optimizarse. Supone un *dominio uniforme para todas las variables* (asociadas a los n criterios), en el mismo espacio difuso de decisión, y las *variables de apartamiento* sobre cada criterio constituyen una muy pertinente solución al respecto (Schweickardt y Miranda, 2009). Como breve introducción que puede ser profundizada en las referencias citadas, se describe, primeramente, la técnica de programación dinámica clásica o determinística (sin *incertidumbres* y con una única función objetivo a optimizar). El problema de *optimización dinámica* debe ser divisible en *etapas*, las cuales tienen cierto número de *estados*. Existe, adicionalmente, una *función de transición entre estados de etapas contiguas*, la cual pretende ser *minimizada o maximizada en toda la trayectoria de evolución del sistema para las etapas establecidas*, constituyéndose en la función objetivo. Por ejemplo: se tiene el mismo caso analizado en el presente trabajo, un SDEE, cuyas *etapas* son los años que conforman el período de control regulatorio. Se ha identificado un conjunto de *estados factibles* (variantes de equipamiento eléctrico de las redes) para cada *etapa*, a los cuales el sistema podría arribar desde cualquier *estado* de una *etapa* precedente. Además, *existe un único criterio a minimizar*, el costo de inversión anual total (más el de operación y mantenimiento de SDEE) para tal período. La *función de transición* es, entonces, el costo de inversión anual, puesto que se pasa de un *estado* perteneciente al año/etapa K-1, a otro perteneciente al año/etapa K, con una inversión anual requerida según la *transición entre ambos estados* (variante de equipamiento). Evolucionando de este modo, la *dinámica* recibe el nombre de *forward* o *hacia adelante*. La *política de evolución óptima* (Costo de inversión anual total mínimo) es obtenida mediante el principio de optimalidad de Bellman, el cual se establece formalmente como: asúmase que la función objetivo, f, debe ser *minimizada*; la *función de transición* es Ftr; se tienen m *etapas*, indicando con K a la *etapa genérica* en [1…m], con j al *estado genérico* de la etapa K, y con i al *estado genérico* de la etapa K-1. Entonces *la política que conduce a la función* f *óptima (mínima), indicada como* f^**, resulta de la aplicación recursiva de la expresión*:

$$f^*(j, K) = \text{Min}\{\ f^*(i, K-1) + \text{Ftr}[(i, K-1), (j, K)]\ \},\ \forall\ i \text{ en } K-1,\ j \text{ en } K \text{ con } k \text{ en } [1\ldots m] \quad (14)$$

La *recursión* tiene lugar cuando K = m, puesto que la trayectoria se reconstruye “hacia atrás”, al igual que en la recuperación de los elementos de una pila cuyos valores son los de la *función de transición* entre estados. Al arribar al *estado de referencia o partida*, se obtiene el f^* total Mínimo, en este caso. Si este modelo *se extiende al dominio multicriterio no- determinístico, y las incertidumbres del sistema son de carácter no- estocástico*, entonces se presenta el orincipio de optimalidad de Bellman- Zadeh, el cual soporta la programación dinámica difusa. El mismo es formulado en términos de la *decisión estática difusa* dada por (13), a la que se adiciona, en la confluencia *intersección*, el *vínculo dinámico con la etapa previa*, valor *más satisfactorio* alcanzado en la misma (*decisión maximizante*). Es decir:

$$\mu\{D\}^*(j, K) = \text{MAX}_{(i, K-1)}\{\ \text{Min}\{\mu\{C_1\}^{pY\{C1\}}, \ldots, \mu\{C_{n-1}\}^{pY\{Cn-1\}}, \mu\{C_n\}^{pY\{Cn\}}, \mu\{D\}^*(K-1)\}\ \} \quad (15)$$

$\forall$ i en K-1, j en K con k en [1…m]; $\mu\{D\}^*(K-1)\}$ es el vínculo dinámico entre K y K-1. Así, *la política óptima de evolución en la PDD, maximiza la decisión adoptada dinámicamente obteniendo, en* K = m *etapas, el nivel de satisfacción de la trayectoria,* TMS*, del sistema*, al cual se lo indica como $\mu\{D\}^*$.

2.2.3.4. Formalización del modelo de optimización posibilístico de la etapa II

Por todo lo dicho, el modelo posibilístico de optimización propuesto en el presente trabajo, quedará formalmente establecido como sigue:

Sea un conjunto de n *criterios de optimización*, {C}, que definen el *mérito en la planificación* de un SDEE (sin pérdida de generalidad, pues puede ser cualquier otro sistema), en m *etapas*, coincidentes con los años del período de control regulatorio. Sea u_i la *variable de apartamiento solidaria a cada criterio i-ésimo*, sobre los cuales se han establecido las *preferencias* fijadas por el vector de prioridades de Yager, pY_i, y definido los *conjuntos difusos* $\mu_{\{C_i\}}(u_i)$, con i en [1..n]. Entonces se trata de encontrar la *decisión maximizante* $\mu\{D\}^*$ en la etapa K = m, *a partir de la estrategia*:

$$\mu\{D\}^*(j, K) = MAX_{(i, K-1)}\{ Min \{\mu\{C_1\}^{pY\{C1\}}, \dots , \mu\{C_{n-1}\}^{pY\{Cn-1\}}, \mu\{C_n\}^{pY\{Cn\}}, \mu\{D\}^*(K-1)\} \} \quad (16)$$

$\forall$ i en K-1, j en K con K en [1…m],

Sujeta a las siguientes restricciones: 1) MPA invariante en TMS alcanzada y 2) $[1-\mu\{D\}^*] \leq \Theta Ext$. La restricción 1) establece que las preferencias sean invariantes al aplicar la PDD, aquellas establecidas por el vector de prioridades de Yager en la Etapa I del modelo propuesto. En caso contrario, el modelo completo *no es consistente*, en especial al arribar a la Etapa III, la más importante, que resuelve el problema planteado en este trabajo, relativo a la definición de un costo asociado a la calidad ambiental, cuya valoración económica es desconocida. La restricción 2) merece una breve digresión: si se refiere la presentación de un *conjunto difuso* realizada en el epígrafe **2.2.3.1.**, se indicó que existe, para cierto *nivel de satisfacción*, un segmento de confianza en el cual, se espera, las *variables de apartamiento* tengan sus ocurrencias. Pero como el dominio es incierto, puede que no lo tengan, y se presenten valores en la planificación que alterarían TMS. Por tanto, *las incertidumbres, suponen un riesgo: a menor nivel de satisfacción alcanzado, las ocurrencias en* u_i *son más toleradas, considerando que aumenta la amplitud del* segmento de confianza (Ver: Figura 1a).

De manera que tales ocurrencias *pueden resultar inaceptablemente alejadas respecto del valor establecido como referencia, para la variable solidaria al criterio en estudio que ha impuesto el* $\mu\{D\}^*$. Como $\mu\{D\}^*$ está normalizada, por definición, en [0, 1], puede construirse un parámetro, indicado como su complemento a 1, que se denominará riesgo intrínseco de la TMS, expresado como $[1- \mu\{D\}^*]$ (Schweikardt y Miranda, 2009; García *et. al*, 2009). Por tanto, el tomador de decisiones d*ebe fijar un valor de riesgo externamente, dependiente de su propensión o aversión al mismo, por encima del cual la* TMS *obtenida se vuelve inaceptable*. Este valor se denominará riesgo extrínseco, ΘExt, también adoptado en [0, 1]. De modo que la restricción 2) establece que el riesgo intrínseco de la TMS resulte inferior o a lo sumo igual al riesgo extrínseco impuesto por el planificador. Puede observarse, según la expresión (16), que el $\mu\{D\}^*$, dado el vínculo dinámico entre etapas contiguas, es impuesto por algún *estado* de la TMS que no tiene por qué ser el correspondiente a la *etapa* K = m. A ese *estado* se lo denominará *crítico*. Una vez obtenida la TMS, si la restricción 2) no se cumpliera, las alternativas, no excluyentes, serían, previo a re-optimizar: a) Modificar la MPA, b) Eliminar el *estado crítico*, y/o c) Modificar algunas o todas las *funciones de pertenencia* de los *conjuntos difusos* solidarios a cada criterio. Satisfecha la restricción 2), cada estado de la TMS tendrá un *nivel propio de satisfacción*, que no será resultado de $\mu\{D\}^*$, ya que el mismo corresponde a la trayectoria. En este aspecto *estriba la propuesta de solución correspondiente a la* Etapa III: *el cálculo del costo intrínseco de la variable asociada a un criterio cuya valoración económica se desconoce.* En este caso, la Calidad Ambiental del sistema de redes. El desarrollo correspondiente se presenta a continuación.

2.2.4. Etapa III: Determinación del costo intrínseco de la calidad ambiental del SDEE

2.2.4.1. Obtención de un costo intrínseco a partir de una medida de satisfacción de estado en la TMS: la t-norma producto de Einstein

Es posible establecer una *medida de satisfacción estática* para cada uno de los *estados* que compone la TMS. Tal medida será designada como $\mu(j, K)^*_S$, indicando que el *estado* $(j, K)^*$ pertenece a la *política de planificación óptima*. Los operadores entre *funciones de pertenencia* utilizados para evaluar *méritos* en toma de *decisiones difusas estáticas*, como es el caso de evaluar el *mérito* o *satisfacción* de un *estado* individual de la TMS, reciben el nombre de *t-norma*. Una *t-norma* que es una *función* t, definida en el intervalo [0, 1] aplicada también en [0, 1] satisface las siguientes condiciones: si t: [0, 1] → [0, 1], entonces: **a.-** t(0,0) = 0; t(x,1) = x → *Condiciones de Frontera*; **b.-** t(x,y) = t(y,x) → *Conmutatividad*; **c.-** si x ≤ α e y ≤ β $\Longrightarrow$ t(x,y) ≤ t(α,β) → *Monotonicidad* y **d.-** t((t(x,y),z) = t(x,t(y,z)) → *Asociatividad*. Lógicamente, el *operador* Min, empleado en la PDD, es una *t-norma*, pero no sirve a la finalidad buscada, puesto que no permite expresar $\mu(j, K)^*_S$, como una *función contínua y derivable respecto de las* $\mu_{\{C_i\}}(u_i)$, para cada criterio i-ésimo. Es necesaria esta condición a efectos de analizar *los cambios diferenciales que se producen en el nivel de satisfacción* $\mu(j, K)^*_S$, *al producirse un cambio diferencial en alguna de las variables* u_i *y, por consiguiente, en su* $\mu_{\{C_i\}}(u_i)$ *asociada*. Por definición de *conjunto difuso*, toda $\mu_{\{C_i\}}(u_i)$ es *continua* y *derivable* respecto de u_i, por tanto, siendo $\mu(j, K)^*_S$ una *función de funciones*, debe imponérsele la condición anterior. La *t-norma* que ha resultado más apropiada para la finalidad buscada, *un nivel de satisfacción estático*, recibe el nombre de Producto de Einstein, t_{PE} (Schweickardt, y Miranda, 2010). Se define como sigue. Sean x e y dos *funciones de pertenencia* genéricas, entonces:

$$t_{PE}(x,y) = \frac{x \times y}{2-(x+y-x \times y)} \qquad (17)$$

Como existe *conmutatividad* y *asociatividad* en t_{PE}, si se tuviesen más *funciones de pertenencia*, asociadas a los criterios que definen el *mérito estático* de cierto *estado*, la operación resultaría: si z es una función de pertenencia en el conjunto {x, y, z}, entonces:

$$t_{PE}(x,y,z) = (t_{PE}(x,y), z) = \frac{t_{PE}(x,y) \times z}{2-(t_{PE}(x,y)+z-t_{PE}(x,y) \times z)} \qquad (18)$$

y así siguiendo al agregar más *funciones de pertenencia* al conjunto de *operandos* de la t_{PE}.

Para avanzar sobre el modelo propuesto, las *funciones de pertenencia* se referirán simplemente como μ_i, y se asumirá, como en la simulación presentada, que *existen cinco criterios*: n = 5. Adicionalmente, como se pretende calcular *las variaciones incrementales del* costo de inversión anual en el SDEE, respecto de las *variaciones en el* índice de impacto asociado a la calidad ambiental del sistema de redes, asúmase que las *funciones de pertenencia* μ_4 y μ_5, son las correspondientes a estos dos criterios de optimización. Entonces deberá calcularse el *grado de satisfacción o mérito estático* de cada *estado* $(j, K)^*$ de la TMS obtenida en la Etapa II, en el conjunto $\{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu(uCI), \mu(uICA)\}$, como sigue:

$$\mu(j, K)^*_S = t_{PE}(j,K) = t_{PE}(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu(uCI), \mu(uICA))_{(j,K)^*} \qquad (19)$$

donde uCI y uICA, son las *variables de apartamiento* correspondientes al costo anual de inversión y al índice de impacto en la calidad ambiental del sistema de redes, respectivamente. Aplicando las propiedades de una *t-norma*, se tiene, en el *estado* $(j, K)^*$:

$$t_{PE}^1 = t_{PE}(\mu_1, \mu_2)_{(j,K)^*} = \frac{\mu_1 \times \mu_2}{2-(\mu_1+\mu_2-\mu_1 \times \mu_2)} \qquad (20)$$

$$t_{PE}^2 = t_{PE}(\mu_1, \mu_2, \mu_3)_{(j,K)^*} = (t_{PE}^1, \mu_3) = \frac{t_{PE}^1 \times \mu_3}{2-(t_{PE}^1+\mu_3-t_{PE}^1 \times \mu_3)} \qquad (21)$$

En este punto del cálculo, a los efectos de que las dos variables μ(uCI), μ(uICA) queden explícitas, se logra la siguiente expresión para la $\mu(j, K)^*_S = t_{PE}(j,K)$:

$$\mu(j, K)^*_S = t_{PE}(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu(uCI), \mu(uICA))_{(j,K)^*} =$$

$$\frac{\mu(uCI) \times \mu(uICA) \times t_{PE}^2}{\left\{\begin{array}{l} 2 \times \left[2-\left(\mu(uCI)+t_{PE}^2-\mu(uCI) \times t_{PE}^2\right)\right]- \\ \mu(uICA) \times \left[2-\left(\mu(uCI)+t_{PE}^2-\mu(uCI) \times t_{PE}^2\right)\right]- \\ \mu(uCI) \times t_{PE}^2+\mu(uICA) \times \mu(uCI) \times t_{PE}^2 \end{array}\right\}} \qquad (22)$$

y desde aquí se obtiene, para el nivel de satisfacción $\mu(j,\ K)^*_S$:

$$\mu(uCI)=\frac{\mu(j,K)^*_S\times\mu(uICA)\times\left(2-t_{PE}^{\;2}\right)+2\times\mu(j,K)^*_S\times t_{PE}^{\;2}-4\times\mu(j,K)^*_S}{\left[\mu(j,K)^*_S\times t_{PE}^{\;2}+\mu(uICA)\times\left(\mu(j,K)^*_S-t_{PE}^{\;2}\right)-2\times\mu(j,K)^*_S\right]}\quad(23)$$

Se intenta encontrar *una expresión que relacione los cambios diferenciales en* CI *cuando se producen cambios diferenciales en* ICA. Los valores de referencia adoptados en las Variables de Apartamiento son constantes del Modelo, de modo que la expresión (23) puede formularse como $\mu(CI)=f\left(\mu(ICA)\right)$. Despejando CI: $CI=\mu^{-1}_{CI}\left(f\left(\mu(ICA)\right)\right)$, luego:

$$\frac{dCI}{dICA}=\left(\frac{d\mu^{-1}(CI)}{df}\right)\times\left(\frac{\partial f}{\partial\mu(ICA)}\right)\times\left(\frac{d\mu(ICA)}{dICA}\right)\quad(24)$$

derivando como *función de función*, por las condiciones establecidas de derivabilidad. Todas las $\mu(u_i)$, están ponderadas por su correspondiente $pY_{i.}$

2.2.4.2. Construcción de un índice de impacto para la calidad ambiental del SDEE y definición de las funciones de pertenencias solidarias a los criterios de optimización

2.2.4.2.1. Índice impacto en la calidad ambiental por empleo de típicos constructivos de líneas fuera del establecido según zonas

Se asume que existe, originado en encuestas, opinión de actores del sistema, o regulación, un *vector de índices de impacto*, VILin, (ponderadores lineales, asociados a una matriz de preferencias sobre impactos), para cada típico constructivo de las líneas de distribución eléctrica. Ese impacto es considerado según zonas. Si se consideran, tal como en la simulación presentada en este trabajo, *cinco zonas*, se tendría un VILin, para cada tipo de línea empleada {Ae=Aérea, Pr=Preensamblada, Sb= Subterránea} como el siguiente:

$$VILin^{[Z]}_{\{Ae,Pr,Sb\}}=\left[p^{[zA,\{Ae,Pr,Sb\}]}_{ILin};p^{[zB,\{Ae,Pr,Sb\}]}_{ILin};p^{[zC],\{Ae,Pr,Sb\}}_{ILin};p^{[zD,\{Ae,Pr,Sb\}]}_{ILin};p^{[zE,\{Ae,Pr,Sb\}]}_{ILin}\right]\quad(25)$$

{zA…zE}, es el conjunto de zonas. A mayor $p^{[z,t]}_{ILin}$, con t en {Ae, Pr, Sb}, mayor importancia del impacto visual en la zona. Así se propone el siguiente Índice de Impacto Zonal:

$$I^z_{ILin}=Max\left\{0;\left[\frac{\sum_{t=t_{MaImp}}^{t=t_{MeImp}}\left(p^{[z,t]}_{ILin}\times\frac{km^{[z,t]}}{km^z_{Totales}}\right)-p^{[z,Est]}_{ILin}}{p^{[z,Est]}_{ILin}}\right]\right\}\quad(26)$$

donde: t_{MeImp}, t_{MaImp}: típicos constructivos de menor y mayor impacto en la zona z considerada, {Ae, Pr, Sb}, entre los que varía el típico t; $p^{[z,Est]}_{ILin}$ es el ponderador de impacto para el *típico establecido para la zona z*; $p^{[z,t]}_{ILin}$ *es el típico t utilizado en l a zona z*; $km^{[z,t]}$ *son los kilómetros de línea en la zona z, construidos con el típico t*, y $km^z_{Totales}$ *son los kilómetros totales de tendido de líneas en la zona z*. Se observa que *si todos los tendidos de líneas en cada zona, respetasen el típico establecido, el* índice de impacto zonal *resultaría nulo*. Finalmente, el índice global de impacto resulta, calculando (26) en cada *estado* [j, K] del Espacio de Búsqueda para la PDD, Etapa II:

Volumen 15 - No. 1, Mayo de 2012, Medellín ISSN 0124.177X. pp 59-76

$$ILin = \sum_{z} I^{Z}_{Lin} \tag{27}$$

2.2.4.2.2. Índice de impacto en la calidad ambiental por empleo de típicos constructivos de transformadores de distribución fuera del establecido según zonas

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* por *cantidad* (nCT) de Centros. Se tiene, considerando que el conjunto de típicos constructivos t es: {Pt≡Plataforma, Ni≡A Nivel, Sb≡ Subterráneo}, entonces:

$$VICT^{[Z]}_{\{Pt,Ni,Sb\}} = \left[p_{ICT}^{[zA,\{Pt,Ni,Sb\}]} ; p_{ICT}^{[zB,\{Pt,Ni,Sb\}]} ; p_{ICT}^{[zC],\{Pt,Ni,Sb\}} ; p_{ICT}^{[zD,\{Pt,Ni,Sb\}]} ; p_{ICT}^{[zE,\{Pt,Ni,Sb\}]} \right] \tag{28}$$

$$I^{z}_{ICT} = \mathrm{Max}\left\{ 0; \left[\frac{\sum_{t=t_{MaImp}}^{t=t_{MeImp}} \left(p^{[z,t]}_{ICT} \times \frac{nCT^{[z,t]}}{nCT^{z}_{Totales}} \right) - p^{[z,Est]}_{ICT}}{p^{[z,Est]}_{ICT}} \right] \right\} \tag{29}$$

Y el Índice Global de Impacto, resultará:

$$ICT = \sum_{z} I^{Z}_{CT} \tag{30}$$

2.2.4.2.3. Índice impacto en la calidad ambiental del SDEE (ICASR)

Simplemente, se propone que resulte de la suma de los dos el Índices Globales anteriores:

$$ICASR = ILin + ICT \tag{31}$$

2.2.4.2.4. Construcción de las funciones de pertenencia solidarias a cada criterio de optimización

Para todos los criterios, se adopta una *función de pertenencia* en los *conjuntos difusos*, *lineal*. En el SDEE analizado, *los criterios tienen mayor mérito cuando son minimizados sus valores*. Por lo que existirá, para cada uno, un valor vMax, de satisfacción 0, y un vMin, satisfacción 1. vMin se presentaría, por caso, al evaluar el ICASR, en la situación para la que todos los típicos constructivos de líneas y transformadores del SDEE, se emplearan conforme los establecidos por zona (vMin = ICASRMin = 0). Estas funciones, mediante el vector de Yager, se *contraerán/dilatarán*, según la Figura 2. Se tendrá, así, la siguiente *característica* para los *conjuntos difusos*, llamando vc_i a la variable del criterio i-ésimo:

$$\{\mu(u_i) = 1;\ \text{si } vc_i < vMin;\ \mu(u_i) = 0;\ \text{si } vc_i > vMax;\ \mu(u_i) = [(vMax - vc_i)/(vMax - vMin)]^{pYi}\} \tag{34}$$

Nótese que la variable de apartamiento, u_i, *se define en términos relativos a la variación admitida en la variable del criterio i-ésimo*, vc_i. Pero la lógica sigue a la expresión (9).

2.2.4.2.5. Expresión final del costo intrínseco de la calidad ambiental del SDEE

Si son especificados intervalos de variación para el costo anual de inversión y para el índice de calidad ambiental del SDEE, [CIMin, CIMax] e [ICASRMin, ICASRMax], desde (22), (24) y (34) se obtiene la expresión, que especifica a (24) para los *conjuntos difusos* definidos:

$$\frac{dCI}{dICASR}=\left(\frac{\partial f}{\partial \mu(ICASR)}\right)\times\left(\frac{p^{YICASR}}{p^{YCI}}\right)\times\left(\frac{CIMax - CIMin}{ICASRMax - ICASRMin}\right)\times$$
$$\mu(CI)^{\left(\frac{1-p^{YCI}}{p^{YCI}}\right)}\times\mu(ICASR)^{\left(\frac{p^{YICASR}-1}{p^{YICASR}}\right)} \quad (35)$$

con, haciendo uICA ≡ ICASR, y derivando parcialmente (25):

$$\frac{\partial f}{\partial \mu(ICASR)}=\frac{\left\{\begin{array}{l}\left[\mu(j,K)^*_s\times\left(2-t_{PE}{}^2\right)\right]\times\left[\begin{array}{l}\mu(j,K)^*_s\times t_{PE}{}^2+\mu(ICASR)\times\\ \left(\mu(j,K)^*_s-t_{PE}{}^2\right)\\ -2\times\mu(j,K)^*_s\end{array}\right]-\\ \left(\mu(j,K)^*_s-t_{PE}{}^2\right)\times\left[\begin{array}{l}\mu(j,K)^*_s\times\mu(ICASR)\times\left(2-t_{PE}{}^2\right)+\\ 2\times\mu(j,K)^*_s\times t_{PE}{}^2-4\times\mu(j,K)^*_s\end{array}\right]\end{array}\right\}}{\left[\mu(j,K)^*_s\times t_{PE}{}^2+\mu(ICASR)\times\left(\mu(j,K)^*_s-t_{PE}{}^2\right)-2\times\mu(j,K)^*_s\right]^2} \quad (36)$$

$t_{PE}{}^2$ está dado por la expresión (21), y el resto de los parámetros ya fueron definidos para el *estado* $(j, K)^*$ evaluado en la TMS obtenida en la Etapa II. La expresión (35) resulta *negativa*, porque $\frac{\partial f}{\partial \mu(ICASR)}$ lo será. Tiene, como se dijo, la forma de un *costo marginal asociado al* ICASR. Puede interpretarse *como el incremento de costo de la última unidad de calidad ambiental producida*. Si se adopta la *no calidad producida* como *referencia* o *penalización*, entonces *cambia el signo*, definiéndose *positivo*. Por otro lado, este costo *no es fijado externamente, sino que dependerá de la estructura datos-representación del modelo propuesto*. Desde aquí que se lo designará como costo intrínseco de la calidad ambiental del SDEE, por unidad de impacto (supraíndice u), y su forma operacional será:

$$C^u{}_{ICASR}=\left|\frac{dCI}{dICASR}\right| \quad (37)$$

3. RESULTADOS

El estudio de caso donde se simula el modelo considera el SDEE de la ciudad de Bariloche, en la provincia de Río Negro, Argentina. Se trata de una ciudad cuya principal industria es el turismo, habida cuenta de su emplazamiento en una región única de lagos y montañas. Por tanto, el paisaje debe preservarse y, en tal sentido, se han hecho varios e infructuosos intentos por definir índices de calidad ambiental en relación al impacto visual que el sistema de redes produce. Con más dificultad aún, se han intentado definir penalizaciones económicas para impactos considerados excesivos. Se aplica la optimización sobre la planificación del SDEE para el período de control regulatorio 2008 - 2013, bajo 5 criterios:

1) Costo anual de Inversión, CI;

2) Calidad ambiental del sistema de redes, ICASR;

3) Frecuencia de interrupción en los cortes de energía (criterio fijado regulatoriamente para medir la *calidad del servicio técnico*), FI;

4) Índice de caídas de tensión en las líneas (criterio fijado regulatoriamente para medir la calidad del producto técnico), IT y

5) Energía no suministrada por cortes (criterio fijado regulatoriamente para la *calidad del producto técnico*), ENS. Por cuestiones de espacio, y relevancia para el presente trabajo, se omiten

Volumen 15 - No. 1, Mayo de 2012, Medellín ISSN 0124.177X. pp 59-76

la numerosa cantidad de desarrollos y cálculos eléctricos, que pueden ser consultados en Schweickardt y Miranda (2009) y García *et al*. (2009). Sólo se describe brevemente la forma en que ha sido definida la variable asociada a cada criterio de tipo eléctrico: ENS: se fija un valor porcentual de la demanda de energía esperada para cada año de corte del quinquenio. Luego se establece un intervalo [ENSMin, ENSMin] conforme a los datos históricos del SDEE; FI: Se tienen modelos llamados de confiabilidad eléctrica, que permiten definir la probabilidad de salida de servicio de un componente del SDEE, y su frecuencia anual esperada. Las expresiones de FI están definidas en el marco regulatorio eléctrico vigente en Argentina, y desde el valor que arroja el modelo de confiabilidad, se establece también un intervalo [FIMin, FIMax], sobre datos históricos; IT: El índice de caída de tensión en las líneas se establece regulatoriamente, fijando límites entre un 3% y un 7% de la tensión nominal de servicio, 220 voltios, monofásico. Con estos valores se construye el intervalo [ITMin, ITMax]. Los otros dos criterios y su relación, CI e ICASR, fueron definidos, pues constituyen el aspecto de interés específico en el presente trabajo.

En la Tabla 1, se presenta el la MPA cuyas preferencias se leen por fila, y el vector de Yager solidario a los criterios, concluyendo la etapa I del modelo. En la Tabla 2, se presentan los valores de referencia, en intervalos para cada criterio; en la Tabla 3, se presenta el resultado de la PDD propuesta, concluyendo la etapa II del modelo. Finalmente, en la Tabla 4, se presentan los costos intrínsecos del ICASR, calculados en cada estado de la TMS obtenida en la etapa II, concluyendo la etapa III del modelo. A modo de síntesis, la marcha de cálculo del Modelo, en sus tres Etapas, requiere de los siguientes pasos:

Etapa I: Paso 1) Formación de la MPA; Paso 2) Cálculo del ICSaaty y Paso 3) Cálculo del Vector de Yager;

Etapa II: Paso 1) Definición de los intervalos admisibles para los valores de las variables asociadas a cada criterio de optimización; Paso 2) Formación de sus conjuntos difusos, Paso 3) Aplicación de la PDD, Paso 4) Fijación de ΘExt y Paso 5) Obtención de la TMS;

Etapa III: Paso 1) Cálculo de los productos de Einstein, $t_{PE} \equiv \mu(j, K)^*_S$, para cada estado de la TMS y Paso 2) Cálculo del costo intrínseco por unidad de ICASR.

El riesgo extrínseco fijado por el planificador es ΘExt = 0.4. La MPA resulta consistente, pues como se puede comprobar, $\lambda_P = 5$ (ICSaaty = 0). Se tienen 5 etapas de optimización, excluyendo el año de referencia, 2008. Así 2008 ≡ I (referencia), 2009 ≡ II, 2010 ≡ III, 2011 ≡ IV, 2012 ≡ V y 2013 ≡ VI. El espacio de búsqueda en la PDD tiene la siguiente cantidad de estados por etapas (pares [Etapa, Nro. de Estados)]: [I, 1], [II, 5], [III, 4]; [IV, 4], [V, 3], [VI, 1]. En la Tabla 3, la nomenclatura, conforme la simbología introducida en los epígrafes anteriores, es la siguiente [E, e*]: Etapa, estado de la TMS; μ{D}*: Nivel de Satisfacción de la TMS en [E, e*]; $\mu(u(vc_i))$: Nivel de Satisfacción del Criterio i-ésimo y vc_i: valor de la variable, en magnitud, asociada al criterio i-ésimo.

	CI	ICASR	FI	IT	ENS	VY
CI	1	3	3	2	1	0.5
ICASR	1/3	1	1	2/3	1/3	1.5
FI	1/3	1	1	2/3	1/3	1
IT	1/2	3/2	3/2	1	1/2	0.5
ENS	1	3	3	2	1	1.5

Tabla 1: Matriz de preferencias (MPA) y vector de Yager (VY) solidario a los 5 criterios

[CI: [228.00, 458.00]; **ICASR**: [0.00, 1.98]; **FI**: [0.30, 1.20]; **IT**: [0.00, 0.55]; **ENS**: [11826.00, 19347.00]**]**

Tabla 2: Intervalos de valores para los 5 criterios. CI en [k$/año] y ENS en [kWh/año]

[E, e*]	μ{D}*	μ(CI)	vCI	μ(ICASR)	vICASR	μ(FI)	vFI	μ(IT)	vIT	μ(ENS)	ENS
[II, 4]	0.75	0.80	300.67	0.75	0.34	0.77	0.51	0.85	0.15	0.86	12548.27
[III, 1]	0.66	0.66	340.54	0.78	0.30	0,62	0.55	0.83	0.17	0.82	12248.12
[IV, 4]	0.67	0.73	320.21	0.85	0.21	0.77	0.60	0.80	0.20	0.96	12048.35
[V, 2]	0.65	0.73	322.78	0.90	0.14	0.65	0.61	0.67	0.30	0.75	13115.67
[VI, 1]	**0.62**	0.62	350.78	0.93	0.10	0.65	0.62	0.67	0.30	0.75	13070.14

Tabla 3: TMS en la PDD del Modelo Posibilístico. [1- μ{D}*] = 0.38 < Θext = 0.4

Tabla 4. Costo Intrínseco [k$] por unidad de ICASR, C^{u}_{ICASR}, y en [k$/año], C_{ICASR}

[E, e*]	T^{1}_{PE}	T^{2}_{PE}	$\mu(j, K)^{*}_{S}$	$\frac{\partial f}{\partial \mu(ICASR)}$	C^{u}_{ICASR}	C_{ICASR}
[II, 4]	0.63	0.52	0.48	-1.02	105.67	**35.93**
[III, 1]	0.57	0.51	0.26	-1.04	75.36	**30.15**
[IV, 4]	0.50	0.47	0.42	-1.01	136.30	**28.62**
[V, 2]	0.40	0.26	0.17	-0.99	156.21	**21.87**
[VI, 1]	0.39	0.26	0.14	-0.92	137.69	**13.77**

4. LISTA DE ABREVIACIONES

SDDE: Sistema de Distribución de Energía Eléctrica

TMS: Trayectoria Más Satisfactoria en la Evolución del Sistema

MPA: Matriz de Preferencias entre Criterios de Optimización

a_{ij}: Valor de la preferencia entre los Criterios i y j. Entrada genérica de MPA

n: Número de Criterios de Optimización

λ_P, V_P: Par Autovalor - Autovector de Perron

ICSaaty: Índice de Consistencia de Saaty

V_{PY}: Vector de Prioridades Exponenciales de Yager

u_i: Variable de Apartamiento del Criterio C_i, cuya Varible es vc_i, y Valor de Referencia vc_i^{Ref}

$\{C_i\}$: Conjunto Difuso asociado al Criterio C_i, con Variable de Apartamiento u_i

ì $_{\{C_i\}}(u_i)$: Función de Pertenencia correspondiente al Conjunto Difuso C_i

α: Nivel de Satisfacción, Pertenencia o Certidumbre en el Conjunto Difuso C_i

$\mu = \alpha = \alpha_c$: α_c-Corte para el Segmento de Confianza a nivel α_c en el Conjunto Difuso C_i

<opC>, opC: Par Operador de Confluencia, Operador de Funciones entre Conjuntos Difusos

{D}, μ{D}: Par Conjunto Difuso, Función de Pertenencia de Decisión

$\mu\{D\}_{Max}$: Decisión Maximizante Estática sobre cierto Conjunto de Alternativas [A]

$\mu\{D\}^{pY}_{Max}$: Decisión Maximizante Estática con Ponderación Exponencial de Yager, pY

PDD: Programación Dinámica Difusa, aplicable a un problema dividivi en m Etapas

$\mu\{D\}^{*}(j, K)$: Decisión Maximizante Dinámica en cierto Estado j de la Etapa K en la PDD

μ{D}: Decisión Maximizante Dinámica Para la TMS en la PDD

$[1- \mu\{D\}^{*}]$: Riesgo Intrínseco de la TMS en la PDD

ΘExt: Riesgo Extrínseco para la aceptación de la TMS en la PDD ($[1- \mu\{D\}^{*}] \leq \Theta Ext$)

$\mu(j, K)^{*}_{S}$: Medida de Satisfacción Estática sobre el Estado $(j, K)^{*}$, óptimo, en la TMS

Volumen 15 - No. 1, Mayo de 2012, Medellín ISSN 0124.177X. pp 59-76

t_{PE}: t-norma Producto de Einstein, adoptada como $\mu(j, K)^{*}_{S}$ en el Modelo propuesto

I^{Z}_{Lin}: Índice Zonal de Impacto Ambiental/Visual por empleo de Líneas

ILin: Índice Global de Impacto Ambiental/Visual por empleo de Líneas

I^{Z}_{CT}: Índice Zonal de Impacto Ambiental/Visual por empleo de Centros de Transformación

ICT: Índice Global de Impacto Ambiental/Visual por empleo de Centros de Transformación

ICASR: Índice de Impacto Ambiental/Visual asociado al Sistema de Redes del SDEE

vMax, vMin: Par de valores Máximo y Mínimo fijados en la variable de un Criterio genérico

$C^{u}_{ICASR} = \left| \frac{dCI}{dICASR} \right|$: Costo Intrínseco de la Calidad Ambiental del SDEE

CI: Criterio de Optimización Costo Anual de Inversión

ICASR: Criterio de Optimización Calidad Ambiental del Sistema de Redes del SDEE (se refiere mediante su Índice de Impacto)

FI: Criterio de Optimización Frecuencia de Interrupción en los Cortes de Energía

IT: Criterio de Optimización Índice de Caídas de Tensión

ENS: Criterio de Optimización Energía No Suministrada por Cortes]

C^{u}_{ICASR}: Costo Intrínseco Unitario de la Calidad Ambiental del SDEE [k$]

C_{ICASR}: Costo Intrínseco Anual de la Calidad Ambiental del SDEE [k$/año]

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado de manera completa y detallada, un novedoso modelo posibilistico de optimización dinámica, aplicado para la determinación del costo intrínseco de la calidad ambiental de un sistema de redes eléctricas, medido por su impacto visual. Conforme el paradigma planteado, se han incorporado las incertidumbres de valor en cada criterio de optimización, de manera formal, mediante conjuntos difusos. De tal modo, se abandonan las hipótesis en las que se sustenta el paradigma económico neo- clásico, en el cual sólo se procura una eficiencia productiva en la planificación del SDEE (mínimo costo) asumiendo vigente un conjunto de penalizaciones monetarias para criterios en los cuales no existe una valoración económica cierta, o bien ignorándolos. Este es el caso de cualquier criterio ambiental. Se proporcionan, más allá de todo lo dicho en los desarrollos correspondientes, cinco conclusiones específicas:

1) Se han empleado cada una de las expresiones desarrolladas, con la misma nomenclatura, a efectos de que puedan reproducirse los resultados aquí obtenidos;

2) Si bien el modelo se especificó para la planificación de un SDEE y el cálculo de determinado costo intrínseco, es claro que puede ser extendido a cualquier sistema dinámico, para la internalización (propiedad intrínseca del sistema) en cualquier criterio no monetizable en forma directa;

3) Puede observarse, en la simulación, que *en la medida que el criterio ICASR es más aceptable, menor es el Costo de su Impacto*;

4) Modificando las preferencias sobre MPA, es claro también que se modificará la TMS, la satisfacción de sus estados, y el costo Intrínseco calculado en ellos;

5) Con el mismo esquema y expresiones empleadas, pueden calcularse los costos intrínsecos para cualquier variable asociada a un criterio ambiental no monetizable, sobre un mismo sistema cuya dinámica se analiza. De tal modo podrían definirse sus valores económicos, en términos de un sistema de penalizaciones formalmente establecido.

REFERENCIAS

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

Bellman, R., Zadeh, L., 1970. Decision- making in a fuzzy environment. Management Science, 17, pp. 141- 164.

Doubois, D., Prade, H., 1980. Fuzzy sets and systems: Theory and applications. New York, London, Toronto Press.

García, E., Schweickardt, G., and Andreoni, A.. 2008. A new model to evaluate the dynamic adaptation of an electric distribution system. Energy Economics. ELSEVIER. Vol. 30, issue 4 pp. 1648- 1658.

Lax, P., 1997. Linear algebra. Wiley Interscience: New York. Chapter 16, pp. 196.

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

Schweickardt, G., Miranda, V., 2009. A two- stage planning and control model toward economically adapted power distribution systems using analytical hierarchy processes and fuzzy optimization. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. ELSEVIER. Vol. 31, issue 6 pp. 277- 284.

Schweickardt, G., Miranda, V., 2010. Metaheuristics FEPSO applied to combinatorial optimization: Ciencia Tecnología y Sociedad. UNER, Argentina Nº 40, pp. 134- 161.

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.

Yager, R., 1977. Multiple objective decision making using fuzzy sets. Intl. J. Man- Machine Studies. 9, pp. 53- 64.

Zadeh, L., 1977. The concept of a linguistic variable and its application to aproximate reasoning. Memorandum ERL- 411, Berkeley.

Volumen 15 - No. 1, Mayo de 2012, Medellín ISSN 0124.177X. pp 59-76