

Un enfoque de la planificación para la explotación de sistemas eléctricos considerando criterios ambientales.

descripción de un paradigma multicriterio de optimización

A planning of exploitation to electric systems approach considering environmental criteria.

description of a multicriteria optimization paradigm

Recibido para evaluación: 1 de Febrero de 2011
Aceptación: 25 de Junio de 2012
Recibido versión final: 13 de Julio de 2011

Gustavo Alejandro Schweickardt¹
Juan Manuel Giménez Álvarez²

RESUMEN

Este trabajo presenta un contexto y un Modelo de Aplicación, para enfocar el problema de la Planificación de la Explotación de Sistemas Eléctricos, en el mediano plazo, considerando impactos ambientales y analizando el proceso de decisión mediante un Paradigma Multicriterio. En el pasado, el medio ambiente, como criterio de decisión, se incluía de forma limitada o, simplemente, no se consideraba. La creciente preocupación por los efectos contaminantes de los procesos productivos ha demandado un replanteo de la forma en que llevan a cabo los mismos y los objetivos que persiguen. Se requiere un enfoque que procure una mayor calidad integral del proceso de planificación, en lugar de la búsqueda de una solución óptima, sustentada en el mínimo costo de inversión. El Modelo considera el Costo Total de Producción de Energía de un Sistema de Generación Eléctrica y, en su Planificación, se incluyen, como aspectos ambientales, las Emisiones de las Unidades de Combustible Fósil del tipo CO₂, SO₂ y NO_x. Adicionalmente emplea un soporte de Toma de Decisión en Contextos Difusos, para la representación de las incertidumbres en las variables de decisión del problema y en el grado de satisfacción de las soluciones. Se presentan, finalmente, los resultados obtenidos desde los Modelos Tradicional y Multicriterio.

Palabras claves: Planificación multicriterio, Objetivos ambientales, Mejor solución, Decisión satisfactoria

ABSTRACT

This work presents a context and a Model to approach the Planning of Exploitation of Electric Systems problem, in the medium term, considering environmental criteria. A decision making process from a Multicriteria Paradigm, is introduced. In the past, environmental criteria just were considered or they were ignored. Due to the growing consciousness about environmental impacts of productive processes, a new orientation to the problem is required: a bigger integral quality of the planning process, instead of searching an optimal solution, based in a minimum investment cost. The Application Model, considers the Total Cost of Energy Production and the Environmental Impact produced by emissions of CO₂, SO₂ and NO_x from Thermal Units, and is based in a Fuzzy Sets decision-making to represent the uncertainties in the system decision variables and satisfaction degree of solutions. The results obtained from the Traditional and Multicriteria Model, are finally presented.

Key words: Multicriteria planning, Environmental objectives, Better solution, Satisfactory decision

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. gustavoschweickardt@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. jgimenez@unsj.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

En cualquier actividad del ser humano, las *decisiones* constituyen un aspecto implícito. Básicamente, el *proceso de decisión* procura *seleccionar la mejor alternativa de acción entre las opciones disponibles, esperando obtener de ella el mejor resultado*. Por lo general, estas decisiones son influenciadas por varios factores, introducidos formalmente en dicho proceso como *criterios de toma de decisión*. Dentro de los modelos tradicionales de toma de decisión, basados en técnicas y métodos clásicos, provenientes del campo de la Investigación de Operaciones, tal carácter *multicriterio* no ha sido considerado explícitamente, sino mediante *restricciones* o *análisis de sensibilidad*. Este trabajo presenta una *propuesta metodológica para resolver el problema de la planificación de la explotación de sistemas eléctricos*, en el mediano plazo, considerando *impactos ambientales*, en un contexto que intenta analizar el *proceso de decisión* a través de un *paradigma multicriterio*. Plantea la necesidad de una *nueva orientación del problema*, desde un enfoque que procure una *mayor calidad integral sobre proceso*, en lugar de la *búsqueda de una solución óptima*. Tal enfoque debe ser consistente con una *interpretación más amplia y adecuada del problema ambiental*, y del concepto de *mejor solución*. De esta manera, se obtendría una *planificación indicativa*, compatible con las nuevas estructuras de funcionamiento del sector eléctrico y su dinámica, y más adecuada a los efectos de plantear políticas de preservación del medioambiente.

2. CONSIDERACIONES PREVIAS

2.1. Paradigma multicriterio

Con el objeto de introducir el *proceso de decisión multicriterio*, se realiza una breve descripción y exposición de conceptos/definiciones involucrados. En primer lugar, por *centro de decisión* debe entenderse la entidad que toma decisiones, la cual está constituida por uno o más individuos o agentes de decisión. En segundo lugar, *criterio*, *atributo*, *meta* y *objetivo* son términos que se utilizan indistinta e intercambiamente, con mucha frecuencia, razón por la cual es pertinente diferenciarlos: *atributo* es el "valor" observado (medido) de una decisión, independientemente del *centro de decisión*, y factible de expresar como una función matemática. Los *atributos* suelen ser competidores o conflictivos entre sí. *Objetivo* se refiere a la dirección de mejora de un *atributo*. Esta dirección será de *maximización* o *minimización* de las funciones que le sean solidarias en un modelo. *Nivel de aspiración* constituye el nivel aceptable para un *atributo*; *meta* es la combinación de un *atributo* con un *nivel de aspiración*; y *criterio* constituye un concepto general que reúne los anteriores. Específicamente, los *criterios* son los *atributos*, *objetivos* y *metas* relevantes en un problema de decisión. Finalmente, el *problema de decisión multicriterio* puede expresarse de la siguiente manera: sea: $\{C\}$ un conjunto de n *criterios de decisión* c_j , con $j = 1, 2, \dots, n$; M_k un conjunto de *atributos* por cada *criterio* j -ésimo; R un conjunto de *restricciones*; X un *espacio factible de solución* que contiene las *alternativas de solución* x y $V(x)$ un *vector de funciones de valoración de los atributos de decisión*, entonces: *encontrar x^* tal que satisfaga las restricciones R y confiera el mayor grado posible de satisfacción sobre $V(x)$* .

2.2. Subjetividad

Como lo afirman Buchanan *et al.* (1994), enfocar un problema desde una perspectiva *multicriterio* involucra información sobre las *preferencias* del *centro de decisión*. Por tanto, la *subjetividad* se revela como una *consecuencia natural de la formulación de un paradigma multicriterio de decisión*. La *subjetividad* ha resultado relegada e, incluso, eliminada en los procesos tradicionales de toma de decisión. Si se analiza la *formulación multicriterio*, es posible diferenciar *dos componentes fundamentales* desde la óptica del *centro de decisión*: la *Realidad Objetiva* que es determinada por aquello externo a la *subjetividad* del tomador de decisiones, y la *Realidad Subjetiva*, producto de la percepción del tomador de decisiones sobre la *Realidad Objetiva*. La *componente subjetiva* se expresa a través de las aspiraciones del *centro de decisión*, esto es: *la selección del conjunto de criterios de decisión y de cómo los mismos son formulados*. La *componente objetiva* se constituye, fundamentalmente, del conjunto de alternativas y de los métodos considerados en el proceso. Se observa, entonces, la *coexistencia e interacción* entre estas dos realidades. Si se ignora la *Realidad Subjetiva*, no tiene sentido la existencia del *centro de decisión*, ya que, finalmente, el tomador de decisiones resultará en un *modelo automático*.

2.3. Concepto de mejor solución y solución óptima

En un contexto multicriterio, es improbable que pueda determinarse una única solución tal que optimice, simultáneamente, todos los criterios ya que, como se dijo, sus atributos resultan ser conflictivos entre sí. Tal característica se puede expresar mediante el concepto de *optimalidad paretiana*: *Un conjunto de soluciones es eficiente o Pareto-óptima, cuando está integrado por soluciones factibles, tales que no existe ninguna que proporcione una mejora en un atributo, sin producir un empeoramiento en, al menos, uno de los restantes atributos del conjunto* (Romero, 1993).

Por otro lado, según lo argumenta Schweickardt (2007), el centro de decisión no puede medir o expresar en una función explícita todos los factores determinantes del proceso de decisión (incertidumbres). Esto se debe a diferentes motivos: *información incompleta, conocimiento imperfecto, ausencia o imprecisión de modelos*, entre otros. En general, se trata de un estado de racionalidad acotada y, por tanto, se debe recurrir a otra clase de información, por caso: *experiencia, intuición, heurísticas*, entre otras formas.

En conclusión, resulta improbable la existencia de algo llamado *solución óptima* en el sentido clásico. A partir de tal contexto, acorde con lo planteado por (Henig *et al.*, 1994), *en un proceso integral de decisión sustentado en un paradigma multicriterio, el concepto de mejor solución alcanzable debe sustituir al de solución óptima*.

Tradicionalmente, el proceso de decisión resultó un modelo de “caja negra” para el centro de decisión, con una interacción modelo-centro de decisión, mínima o nula. Tal situación ha sido fortalecida por dos motivos básicos:

- 1) La creencia generalizada de que la participación subjetiva del decisor, resta carácter objetivo al proceso de decisión y, como consecuencia, los resultados tienden hacia soluciones parcializadas, y
- 2) La renuencia del centro de decisión para realizar un esfuerzo cognoscitivo durante todo el proceso.

Respecto del primer motivo, puede decirse que el hecho de incluir información subjetiva en el proceso, no implica abandonar una metodología científica de análisis. Por el contrario, se requiere una mayor orientación científica que realmente avale el proceso de decisión. Por otro lado, la inclusión de información subjetiva, no parcializa los resultados, sino que, de hecho, refleja la realidad de las necesidades del centro de decisión. Respecto del segundo motivo, debe contemplarse que la participación del centro de decisión en los modelos tradicionales, se produce al momento de la recolección de información y formulación del sistema a resolver. Luego, se alimenta el modelo propuesto con tales datos y se esperan resultados. La renuencia del centro de decisión a una participación posterior, es entendible si el análisis intermedio tiene lugar en el espacio de alternativas, el cual, por lo general, resulta demasiado complejo. Pero si el análisis se efectúa en un nuevo espacio de decisión, el de los criterios, la complejidad se reduce sensiblemente, permitiendo razonamientos intermedios que favorezcan al proceso.

Por tanto se propone que el concepto de *mejor solución*, no sólo involucre la calidad de la solución formulada por el proceso de decisión, sino el mecanismo adoptado para determinar esta calidad y el grado de participación que centro de decisión tiene en el proceso.

2.4. La decisión más satisfactoria, mejor solución

Como consecuencia de incluir en el proceso de decisión aspectos subjetivos relacionados con preferencias entre criterios, tiene lugar, solidario a tales preferencias, el concepto de *satisfacción*. La *satisfacción* está relacionada con la percepción del centro de decisión respecto del grado en el cual se han cumplido sus requerimientos. Permite una visión del problema distinta a la tradicional, ya que considera la posibilidad de relacionar aspectos objetivos y subjetivos del proceso, definiendo un mecanismo alternativo para evaluar el mérito de una solución. La *satisfacción* se resalta en dos aspectos:

- 1) resulta *parcial en cada uno de los atributos* de las alternativas disponibles: involucra la percepción que el centro de decisión tiene sobre el logro alcanzado para un atributo particular;
- 2) resulta *global sobre cada alternativa*: es producto del análisis conjunto de los logros particulares de cada atributo y las relaciones que existen entre ellos.

Este análisis habitualmente procura obtener un *índice general*, para lo cual se requiere efectuar un *proceso de agregación de satisfacciones parciales*. Dado que en un *proceso de agregación de información*, es posible la pérdida de información valiosa, el *modelo satisfactor* debe procurar un *mecanismo de agregación que minimice la pérdida de información*. Por tanto, en un *contexto multicriterio*, dicho modelo debe buscar, en lugar de una *solución óptima*, la *mejor solución entendida como la decisión más satisfactoria adoptada por el centro de decisión*, conforme su *racionalidad acotada y conocimiento imperfecto*, características de su *Realidad Subjetiva*.

2.5. Satisfacción en los modelos aplicables a los procesos de toma de decisión

Sin embargo, la *satisfacción* es un concepto de compleja integración en un *modelo de decisión*. Esto se debe, entre otras razones, a las siguientes: *subjetividad*, *impresión al momento de expresarla*, *inconsistencia de los juicios* y *desconocimiento de las consecuencias de las decisiones*. Por lo tanto, *el mayor esfuerzo del modelo satisfactor se debe dirigir a la determinación de un mecanismo idóneo para representar, de la forma más aproximada posible, las expectativas del centro de decisión*. Yager (2004) se afirma que un *modelo satisfactor*, en un proceso de decisión, supone las siguientes características:

Los *atributos de decisión* no tienen igual importancia. Por lo tanto, aquellos que se consideren más importantes desempeñarán un rol más significativo en la decisión final.

Tal *importancia* resulta fundamental en la *comparación de alternativas*. Permite la posibilidad de *compensación en la satisfacción entre diferentes criterios*. La *compensación* se asocia con *la capacidad del tomador de decisiones para aceptar que una ganancia suficientemente grande en el grado de satisfacción de un criterio de menor importancia, puede resarcir una pequeña pérdida de satisfacción ocurrida en otro criterio de mayor importancia*.

El tomador de decisiones expresa sus *preferencias* a través de *prioridades asociadas a los criterios*. Dados dos criterios "a" y "b", donde "a" tiene mayor prioridad que "b", entonces *no estará dispuesto a aceptar intercambios de satisfacción entre "a" y "b" hasta que se logre un mínimo de satisfacción en el criterio "a", de mayor prioridad*.

En conclusión, *conforme la complejidad del problema de decisión multicriterio*, se procuran *estrategias satisfactorias desde el centro de decisión*. Se considera, entonces, la *satisfacción como un mecanismo alternativo a la optimalidad, para determinar el mérito de una solución*.

2.6. Medio ambiente y contexto de la planificación de los sistemas eléctricos

Una de las principales tareas dentro de la industria eléctrica es la *planificación de la explotación del sistema*. La misma se ha intentado transformar, conforme los cambios en la visión de la realidad y en los objetivos que persigue el cuidado del medioambiente. Un ejemplo de este cambio, es la toma de conciencia del impacto ambiental de los procesos productivos y de prestación de servicios, en referencia a la generación de energía eléctrica y su transmisión y distribución, respectivamente. Dadas las nuevas necesidades planteadas, la tarea de planificación debe abordar *el problema técnico-económico tradicional, a la vez que integra el criterio ambiental en el proceso de planificación*. El inconveniente estriba en que el medioambiente posee *singulares características* (Moreno et al., 2001; Schweickardt, 2007), de las cuales se describen las más importantes: *Complejidad*: asociada a la participación de *múltiples actores, varios atributos y diversos escenarios posibles*; *Incertidumbre*: relacionada con la ausencia de modelos; *información incompleta, incierta y a veces poco confiable*, y por vacíos dentro del conocimiento tales que no permiten tratar de forma tradicional el problema; *Irreversibilidad*: motivada por la incapacidad, al menos en el corto plazo, de mitigar los efectos de sus actividades presentes; *Equidad Generacional*: referente a la necesidad de compatibilizar el anhelo de bienestar actual, sin condicionar el bienestar de las futuras generaciones.

La contaminación ambiental involucra impactos que no se conocerán en su totalidad, sino en el futuro. Sólo un porcentaje de este daño es *perceptible, más no cuantificable*. Por lo tanto, *su consideración adecuada en el proceso de planificación involucra un tratamiento con diferentes alcances temporales*, cuyos objetivos son específicos, capaces de acoplarse uno a otro para generar una *solución integral en el tiempo*. Las propuestas de planificación de *largo plazo* resultan en estudios complejos, generales y globales, para los cuales, debido a la *importante incertidumbre*, se determinan objetivos, también generales, a alcanzar, pero no estrategias reales para conseguirlos. Por otro

lado, las propuestas de *corto plazo* pueden resultar reluctantes para los agentes del sistema, si no consideran los resultados de la planificación de *largo plazo*, en términos de *beneficios perceptibles*. La planificación de *mediano plazo* tiene como propósito *vincular* los objetivos de *largo plazo* con la ejecución real de *corto plazo*, y se *constituye en el alcance temporal pertinente para la optimización multicriterio, en el contexto aquí descrito*. De acuerdo a las ideas expuestas, se plantea que *el propósito de la planificación de la explotación de mediano plazo en sistemas eléctricos, tal que permita considerar la subjetividad y ausencia de valoración económica en los criterios ambientales, se formule del siguiente modo:*

“En el periodo de optimización, determinar la dinámica del sistema, cumpliendo un conjunto de restricciones técnicas y operacionales, de tal modo que se maximice la satisfacción del centro de decisión, sobre las soluciones encontradas en un proceso de decisión multicriterio”. Es decir, la *función objetivo* se torna en una Función de Satisfacción, FS. Se procura, entonces, Maximizar FS. FS resultará, matemáticamente, una *función compuesta* de las *variables de decisión*, x, así:

$$FS(x) = FA(S(T(x))) \quad (1)$$

donde T es una *medida objetiva de los atributos*, S es una *función de transformación de valoración en satisfacción (aproximación subjetiva/objetiva)* y FA es una *función de agregación de satisfacciones parciales*. Dada esta *estructura de decisión*, el mayor problema estriba en *formular las funciones S para aproximar los grados de satisfacción de los atributos, y formular FA como una agregación de satisfacciones parciales, de tal modo que los resultados se ajusten, en la mayor medida posible, al nivel de aspiración que exprese el centro de decisión*.

3. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA EXPLOTACIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS SUSTENTADA EN UN PARADIGMA MULTICRITERIO CONSIDERANDO VARIABLES AMBIENTALES

3.1. Los escenarios de planificación

Los procesos de planificación están basados en las perspectivas relativas al futuro, de corto, mediano, o largo plazo. Es claro que en la medida que el horizonte de planificación resulte mayor, las incertidumbres sobre las variables de decisión en el proceso, *umentan*. Por tal motivo, observando hipótesis de diferentes comportamientos que las mismas puedan exhibir, y que definan marcados contrastes entre las propiedades del sistema, sus variables y, consecuentemente, las soluciones posibles de obtener, son planteados *escenarios de planificación*. Sin embargo, una de las limitaciones del enfoque o Paradigma Clásico, *consiste reducir las incertidumbres*, bien sea a *certezas* (en cada escenario) o a *alguna certeza estocástica*, lo cual supone que existe, solidaria a las variables del sistema, *una distribución conocida de probabilidad, capaz de reducir sus incertidumbre a una certeza equivalente* (Schweickardt, 2007). El presupuesto que subyace detrás de tal reducción, supone una *racionalidad completa o conocimiento perfecto del problema*, típico del Paradigma (económico) Neoclásico. El mismo, frente a la realidad, colapsa, dado que sus resultados no se compadecen en lo más mínimo con lo observado en las ocurrencias de aquellos eventos que fueron previstos en la planificación, aún planteando un gran número de escenarios. Por ello, el primer presupuesto que supone el paradigma propuesto en este trabajo, indicado como Paradigma Postkeynesiano (Lavoie, 1992), es el de la *racionalidad acotada*. Esto significa que *no todo puede conocerse, y el tomador de decisiones tiene un conocimiento imperfecto del comportamiento del sistema, en el horizonte de planificación considerado*. Con ello, se reconocen incertidumbres que *no pueden ser reducidas a un conjunto equivalente de certezas* (certeza estocástica) y que Keynes refiere como tipo de *incertidumbre fundamental*. La forma de modelarla, que ha resultado más pertinente, por incluir la subjetividad como elemento sustancial en su formulación, estriba en el empleo de Conjuntos Difusos (Schweickardt, 2007). De tal modo, en cada escenario considerado, las *variables de decisión* y los *múltiples criterios* a satisfacer en la planificación, serán representados mediante los mismos, con el objeto de captar tal tipo de *incertidumbre*, independientemente del número de escenarios de planificación considerados. Como se verá en 3.2.1., un *número real* constituye un caso particular de un Conjunto Difuso *normal* y

convexo, llamado Número Difuso, tal como los empleados en el Modelo propuesto (particularmente, en las restricciones difusas). De modo que, si existiesen valores previsible como *ciertos*, pueden ser también modelados como un Número Difuso.

3.2. Toma de decisión y conjuntos difusos

3.2.1. Conjuntos difusos y modelación de incertidumbres

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:

$$u_i = |vc_i - vc_i^{Ref}| / vc_i^{Ref} \quad (2)$$

donde vc_i^{Ref} , valor de referencia, es el que el tomador de decisiones, 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 fundamental de valor*. Al emplear esta nueva variable, todos los criterios, ya atributos, 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} . Por lo dicho en los desarrollos conceptuales del epígrafe 3., 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 en cuestión, recibe el nombre 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 referírsele, 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/atributo (términos que en este contexto se pueden emplear indistintamente, y así se hará a partir de este punto), 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 $\mu_{\{C_i\}}(u_i)$. En la figura 1-a, se muestra un Conjunto Difuso asociado a cierta variable, v , indicado como $\{v\}$. 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 (Dubois y Prade, 1980). Las *incertidumbres de valor*, se observan al asociar un *nivel de satisfacción (pertenencia o certidumbre)*, α , que asume el valor $\alpha = 1$ para el valor v de Máxima Satisfacción, vMS , y va disminuyendo hasta la insatisfacción total, $\alpha = 0$, a medida que se apartan los valores de la variable v , respecto de vMS , llegando a vLq y $vDer$, 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 v , indicado como $[vLq(\alpha_c); vDer(\alpha_c)]$, denominado Segmento de Confianza. Tal intervalo, 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 v, deberían pertenecer a tal segmento o, también, α -corte*. Si se trabaja con una *variable de apartamiento*, uv , al ser los desvíos respecto del valor v , *tomados en valor absoluto*, la representación del Conjunto

Difuso, se observa en la figura 1-b. Es claro que, implícitamente, se trata de un Número Difuso. u_{MS} , es el valor de Máxima Satisfacción para la *variable de apartamento* correspondiente, uv .

Figura 1-a: Número Difuso Triangular en v

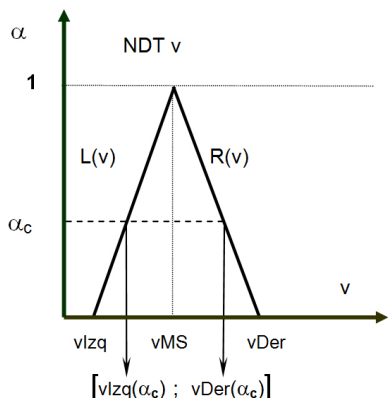


Figura 1-b: Conjunto Difuso $\mu(uv)$

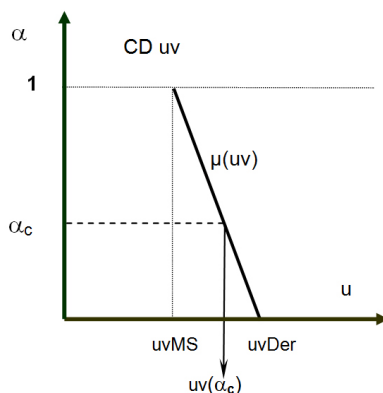


Figura 1:
Figura 1-a: Número Difuso Triangular en v
Figura 1-b: Conjunto Difuso $\mu(uv)$

3.2.2. 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:

$$\{D\} = \{C_1\} \langle opC \rangle \{C_2\} \langle opC \rangle \dots \langle opC \rangle \{C_{m-1}\} \langle opC \rangle \{C_n\} \quad (3)$$

donde $\langle opC \rangle$ es un *operador* entre Conjuntos Difusos que recibe el nombre de *confluencia*. La *confluencia* más frecuentemente empleada, es la *intersección*. Asociado al *operador* $\langle opC \rangle$, existe un *operador matemático*, opC , aplicable a las *funciones de pertenencia* correspondientes, que genera, desde (3), el *valor de pertenencia* del Conjunto Difuso de Decisión. Es decir:

$$\mu\{D\} = \mu\{C_1\} opC \mu\{C_2\} opC \dots opC \mu\{C_{m-1}\} opC \mu\{C_n\} \quad (4)$$

El *operador* opC , recibe el nombre general de *t-norma*. Por ejemplo, si la *confluencia* fuese la *intersección*, $\langle C \rangle \equiv \cap$, 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 (4). Entonces, si $\{A\}$ es un conjunto de alternativas sobre las que debe decidirse por la mejor, $\langle opC \rangle \equiv \cap$ y $opC = \text{Min}$, se define como Decisión Maximizante, al valor de la *función de pertenencia* en el Conjunto Difuso de Decisión, dado por:

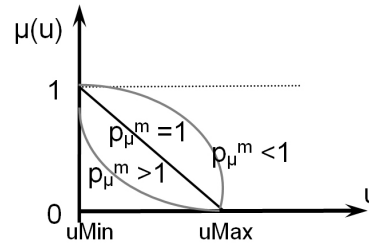
$$\mu\{D\}_{\text{Max}} = \text{MAX}_{\{A\}} \{ \text{Min} \{ \mu\{C_1\}, \mu\{C_2\}, \dots, \mu\{C_{m-1}\}, \mu\{C_n\} \} \} \quad (5)$$

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 (Yager, 2004), que surge de comparar *de a pares* los criterios involucrados en una Matriz de Preferencias (Saaty, 1997), por ejemplo, el componente de dicho vector asociado a cada criterio, *debe afectar exponencialmente a la función de pertenencia respectiva*. La razón es la siguiente (Schweickardt, 2007): si todos los criterios fuesen igualmente preferidos, El Vector de Prioridades Normalizado de Perron (Lax, 1997), tendría como componentes el mismo valor, $1/n$. Al obtener el Vector de Prioridades de Yager, las componentes o Ponderadores de Yager, serían, según su definición, iguales a 1. De modo que al elevar la cada función de pertenencia en (2) 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 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 apartamento* es u , conforme la afectación exponencial de su *conjunto*

difuso. La decisión estática difusa ponderada por preferencias, queda, entonces, establecida como:

$$\mu\{D\}_{Max}^{pY} = \text{MAX}_{[A]} \{ \text{Min} \{ \mu\{C_1\}^{pY\{C1\}}, \mu\{C_2\}^{pY\{C2\}}, \dots, \mu\{C_{n-1}\}^{pY\{Cn-1\}}, \mu\{C_n\}^{pY\{Cn\}} \} \} \quad (6)$$

Figura 2: Contracción y Dilatación Exponencial de un Conjunto Difuso



Si estas consideraciones son relacionadas con las expresiones vertidas en la 3.6., que arriban a la expresión (1), $FS(x)=FA(S(T(x)))$, se tendría la siguiente equivalencia general:

x es la variable asociada a cada criterio; T(x) viene dada por la característica funcional que expresa la valoración, en principio, objetiva del criterio (por ejemplo, una restricción rígida de Potencia Hidro comprometida en el sistema), la que se “relaja” permitiendo introducir la subjetividad necesaria para modelar las incertidumbres en la aceptación (qué ocurre si los regímenes hidrológicos son inferiores, en aportes, a los esperados y el sistema debe responder con generación térmica?, por ejemplo) transformándose en S(T(x)), que se corresponde con la función de pertenencia del Conjunto Difuso, solidario a la variable (criterio) x. Luego si todos los criterios son “mapeados” en un mismo dominio, estableciendo valores por unidad o *variables de apartamiento*, respecto de una *referencia pertinente*, el proceso de agregación implícito en $FS(x)=FA(S(T(x)))$ se corresponde con la Decisión Estática Maximizante, $\mu\{D\}_{Max}$ o $\mu\{D\}_{Max}^{pY}$, en el caso que la importancia entre los Conjuntos Difusos correspondientes, sea considerada. Así la Toma de Decisión Estática Difusa, se corresponde con la estructura planteada en 3.6., expresión (1), para cualquier *criterio*, en general, y *ambiental*, en particular.

3.3. Formulación del modelo multicriterio para la planificación de la explotación de los sistemas eléctricos. Comparación con la formulación tradicional

Tradicionalmente, el Modelo para la operación o explotación en el mediano plazo de un Sistema Potencia Hidro-Térmico, como el considerado en la simulación del Modelo aquí presentado, constituye una herramienta de planificación diseñada, principalmente, para calcular: a) Costos Futuros de Explotación, b) Requerimientos de Energía en orden a cubrir la Demanda Futura con cierto Margen Óptimo de Reserva, c) Consumo de Combustible (en el caso de Unidades de Producción Térmicas, basadas en fuentes primarias fósiles) o de agua (para Unidades de Producción Hidro) y d) El nivel de producción asociado a las diferentes tecnologías empleadas en cada unidad del Sistema, entre otros resultados. Los criterios ambientales, no son considerados. De manera que se tendría la siguiente formulación (consúltese la lista de abreviaciones, dispuesta al final del presente trabajo, para el significado de cada *variable*, *constante* o *conjunto*, empleados en las ecuaciones):

3.3.1. Modelo tradicional o clásico para la planificación de la explotación de los sistemas eléctricos

1) Función Objetivo: Se trata de un problema MonoObjetivo (Rahman y De Castro, 1995). *Minimizar* el Costo Total del Sistema en cierto escenario:

$$CT = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{NB} \sum_{s=1}^{NS} \{ C_{sm}^n (P_{sm}^n) + Cd_m^n \times Pd_m^n \} \times t_m \quad (7)$$

donde:

$$C_{sm}^n = CF_s \{ a1_s \times P_{sm}^n + a2_s \times (P_{sm}^n)^2 \} \quad (8)$$

Sujeto a:

2) Restricciones del Sistema:

$$\text{2-a) de Demanda: } D_m^n = \sum_{s=1}^{NS} U_{sm}^n \times P_{sm}^n + \sum_{h=1}^{NH} PH_{hm}^n + DNS_m^n \quad (9)$$

$$\text{2-b) de Reserva: } (D_m^n - DNS_m^n) \times (1 + Re_m^n) \leq \sum_{s=1}^{NS} U_{sm}^n \times P_{sm}^n + \sum_{h=1}^{NH} PH_{hm}^n \quad (10)$$

3) Restricciones asociadas a las Unidades Hidro:

$$\text{3-a) de Balance de Agua: } V_h^{n+1} = V_h^n + AP_h^n - \sum_{m=1}^{NB} PH_{hm}^n \times t_m - SP_h^n \quad (11)$$

$$\text{3-b) de Límites Físicos de Operación: } V_{min}_h \leq V_h^n \leq V_{max}_h \quad (12)$$

En esta formulación, el volumen de agua V , las Inyecciones o aportes AP y el Agua Liberada desde cada reservorio hidro, SP , están medidos mediante su equivalente energético, expresado en MWh. La misma interpretación se preserva para el Modelo Multicriterio.

4) Restricción asociada a las Unidades Térmicas:

$$P_{min}_s \times U_{sm}^n \leq P_{sm}^n \leq P_{max}_s \times U_{sm}^n \quad (13)$$

Si bien, como se dijo, en la formulación tradicional o clásica del problema no considera aspectos ambientales, aquí serán propuestos a los fines de presentar resultados comparables en las simulaciones. Los mismos, se relacionan con los tipos de emisiones considerados en el conjunto K , que contempla tres agentes de impacto ambiental asociados a las unidades de producción térmicas: CO_2 , SO_2 y NO_x . Su introducción en este Modelo, es bajo la forma de una restricción:

5to) Restricción asociada a las Emisiones de las Unidades Térmicas:

$$ET_k = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{NB} \sum_{s=1}^{NS} \{ Ek_{sm}^n (P_{sm}^n) \} * t_m \leq ET_{max}_k \quad (14)$$

donde:

$$Ek_{sm}^n = CE_{ks} \times \{ a1_s \times P_{sm}^n + a2_s * (P_{sm}^n)^2 \} \quad (15)$$

Como se observa, la función de producción mediante la que se estima el costo homónimo de las unidades térmicas, se aproxima por un polinomio cuadrático. Y las emisiones correspondientes de cada tipo k , se correlacionan con el costo.

3.3.2. Modelo propuesto multicriterio para la planificación de la explotación de los sistemas eléctricos

En este trabajo, como se dijo, es reconocida la necesidad de considerar los aspectos de impacto ambiental, no sólo como una restricción, tal y como fue planteada en la *formulación tradicional*, sino como un aspecto en el mismo nivel que el criterio económico. Se tienen, así, cuatro criterios a considerar en la optimización: el Costo Total de Producción del Sistema y cada uno de los tres tipos de emisiones en el conjunto K . Este enfoque multicriterio, se sustentará en los conceptos vertidos en el epígrafe 3.2.2.

Adicionalmente, respecto de las consideraciones vinculadas a la *racionalidad acotada* y a la *incertidumbre fundamental*, como presupuesto del paradigma multicriterio aquí presentado, existen dos cuestiones específicas en la *planificación tradicional* de la explotación de los sistemas eléctricos

que deben ser atendidas:

1. Tiene lugar en un entorno de gran incertidumbre debido a situaciones tales como la evolución temporal de los regímenes hidrológicos y el nivel de demanda (potencia), y la dificultad de expresar las preferencias entre cada criterio de optimización (incertidumbre fundamental de valor);
2. 2) Se desarrolla en un contexto inflexible, debido a la rigidez de las restricciones cuyos valores umbrales o límites no pueden ser violados. De modo que las incertidumbres, particularmente de valor, no son estocásticas (reducibles a alguna certeza equivalente desde una distribución de probabilidades conocida) por no tener un conocimiento completo (racionalidad) sobre el comportamiento dinámico del sistema.

Por ello debe ser aceptado cierto grado de “relajación” en las restricciones, así como en los valores pronosticados de ciertas variables, mediante la introducción de los conceptos vertidos en el epígrafe 3.2..

Para ello, se ha introducido la Decisión Estática Difusa, inserta en la técnica denominada Programación Difusa por Compromiso Entre Criterios (Zimmermann, 1996). Tal técnica, permite la definición de soluciones satisfactorias próximas a la óptima o ideal, la cual es adoptada como *punto de referencia*. Esto es: cada punto de referencia proviene de una optimización monocriterio, para cada uno de los criterios seleccionados. Luego, el resultado obtenido, se emplea para definir las variables de apartamiento que requiere la toma de Decisión Estática Difusa. De modo que se tiene la siguiente formulación:

1) Funciones Objetivos Difusas:

Las cuatro funciones objetivo se corresponden a los cuatro criterios a minimizar (Maximizar su grado concurrente de satisfacción en la Decisión Estática Difusa): a) Costo, CT, y b) Los niveles de emisiones tipo k, Etk, dados por los agentes del conjunto $K = \{CO_2, SO_2, NO_x\}$. Para cada criterio o atributo, en este caso, se ha seleccionado una Función de Pertenencia Exponencial, del tipo:

$$\mu_f = \begin{cases} 1 & f \leq f^* \\ e^{-W_f \cdot \left(\frac{f-f^*}{f^*}\right)} & f \geq f^* \end{cases} \quad (16)$$

donde f representa el objetivo, f* el el valor de referencia y W_f el ponderador exponencial.

2) Restricciones Difusas del Sistema:

Para este caso, han sido escogidos, por simplicidad, Números Difusos Triangulares. Para su construcción se siguen los siguientes pasos:

Sean las variables $y1_m^n$, $y2_h^n$ e $y3$, definidas como sigue:

$$y1_m^n = \sum_{s=1}^{NS} PT_{sm}^n + \sum_{h=1}^{NH} PH_{hm}^n \quad (17)$$

$$y2_h^n = \sum_{m=1}^{NB} PH_{hm}^n \times t_m \quad (18)$$

$$y3 = \sum_{s=1}^{NS} PTmax_s + \sum_{h=1}^{NH} PHmax_h \quad (19)$$

Entonces se tienen las siguientes Funciones de Pertenencia:

2-a) Demanda Difusa: $\forall m$ y $\forall n$:

$$\mu_{DEM}(y_1^n) = \begin{cases} 1 - \frac{y_1^n + DNS_m^n - D_m^n}{D_{UPm}^n}; & \text{si: } D_m^n \leq y_1^n \leq D_m^n + D_{UPm}^n \\ 1 - \frac{-y_1^n - DNS_m^n + D_m^n}{D_{DWM}^n}; & \text{si } D_m^n - D_{DWM}^n \leq y_1^n \leq D_m^n \\ 0; & \text{En Otro Caso} \end{cases} \quad (20)$$

donde: $D_{UPm}^n = D_{DWM}^n = dDem \times D_m^n$ (21)

2-b) Margen de Reserva Difuso: $\forall m$ y $\forall n$:

$$\mu_{Re}(y_1^n) = \begin{cases} 1; & \text{si: } y_3 - y_1^n \geq Re \times y_1^n \\ 1 - \frac{Re \times y_1^n - y_3 + y_1^n}{dRe \times y_1^n}; & \text{si: } (Re - dRe) \times y_1^n \leq y_3 - y_1^n \leq Re \times y_1^n \\ 0; & \text{si: } y_3 - y_1^n \leq (Re - dRe) \times y_1^n \end{cases} \quad (22)$$

2-c) Aportes/Inyecciones Hidro Difusos: $\forall h$ y $\forall n$:

$$\mu_{AP}(y_2^n) = \begin{cases} 1 - \frac{V_h^{n+1} - V_h^n + y_2^n + SP_h^n - AP_h^n}{AP_{UPh}^n}; & \text{si: } AP_h^n \leq y_2^n \leq AP_h^n + AP_{UPh}^n \\ 1 - \frac{-V_h^{n+1} + V_h^n - y_2^n - SP_h^n + AP_h^n}{AP_{DWh}^n}; & \text{si: } AP_h^n - AP_{DWh}^n \leq y_2^n \leq AP_h^n \\ 0; & \text{En Otro Caso} \end{cases} \quad (23)$$

donde: $AP_{UPh}^n = AP_{DWh}^n = dAP \times AP_h^n$ (24)

De esta manera, considerando que los referidos ponderadores de Yager son los valores W_f , y que sólo afectan a los objetivos difusos y no a las restricciones difusas, en la propuesta aquí presentada, el Modelo de Optimización Multicriterio, queda formulado como:

$$\mu\{D\} = \text{Max} \left[\text{Min} \left\{ \mu_f, \mu_{DEM}^n, \mu_{Rem}^n, \mu_{APh}^n \right\} \right] \quad (25)$$

Si es impuesto un cierto valor, externamente fijado, como *mínimo umbral de satisfacción*, por debajo del cual *las soluciones no son aceptables*, α_{Ext} , entonces se tiene la restricción:

$$\mu\{D\} \geq \alpha_{Ext} \quad (26)$$

De vulnerarse (26), se deben replantear bien las preferencias entre objetivos, bien la estructura de los Conjuntos Difusos asociados a las restricciones, o ambos.

4. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

La aplicación de los Modelos Tradicional y Multicriterio se soporta en los datos y resultados presentados en las tablas 1 a 8, en las cuales las tablas 1 a 5 corresponden a Datos y las tablas 6 a 8, a Simulaciones.

La tabla 1 presenta los Ponderadores de Yager $\equiv W_f$, resultantes para cada uno de los Criterios de Optimización. En la determinación de tales ponderadores, se ha seguido el Método Autovalor-Autovector de Satty (Satty, 1997), pero también pueden ser, sin pérdida de rigurosidad, establecidos arbitrariamente por el tomador de decisiones, siempre que se cumpla la condición: $\sum W_f = n = \text{número de criterios}$ (4, en esta simulación). Han sido considerados, sin pérdida de generalidad, todos los criterios con la misma importancia, es decir $W_f = 1, \forall f$.

La tabla 2 presenta las Características de las Unidades de Producción Hidro.

La tabla 3 presenta las Características de las Unidades de Producción Térmicas. Se tienen, en total, 14 Unidades de Producción en el Sistema considerado.

La tabla 4 presenta la Demanda Nominal del Sistema y los Niveles de de Carga Considerados, 4, en 12 períodos de 1 mes (1 año).

La tabla 5 presenta las Inyecciones o Aportes Hidro en cada uno de los dos Escenarios considerados: Aporte Bajo (Hidraulicidad Baja) y Aporte Medio (Hidraulicidad Media).

Tabla 1: Ponderador (de Yager $\equiv W_f$) de cada Criterio Considerado en la Optimización

Criterio/Atributo	Costo	Medioambiental		
Variable del Ponderador	W_{CT}	W_{CO_2}	W_{SO_2}	W_{NO_x}
	1	1	1	1

Tabla 2: Características de las Unidades de Producción Hidro

Unidad Hidráulica	PH_{max}	V_{max}	V_{min}	$V_{inicial}$	V_{final}
h	MW	MWh	MWh	MWh	MWh
1	1.000	1.000.000	100.000	500.000	500.000
2	250	100.000	0	50.000	50.000
3	200	100.000	0	80.000	80.000

Tabla 3: Características de las Unidades de Producción Térmicas

ID	Tipo	Capacidad PTmax [MW]	Curva de Calentamiento -Tasa de Calor [GJ/MW]		Costo de Combustible [\$/GJ] CF_s	Coeficientes de Emisión		
			Factor a1, s	Factor a2, s		CE CO_2	CE S_{O_2}	CE NO_x
1	Carbón	300	10,53430	0,000064	1,42	91,13	1,375	0,166
2	Carbón	300	10,53430	0,000064	1,42	91,13	1,214	0,352
3	Carbón	200	10,53430	0,000064	1,71	70	0,543	0,062
4	Vapor Fuel	150	10,18870	0,000797	2,56	70	0,671	0,259
5	Vapor Fuel	150	10,18870	0,000797	2,56	70	0,588	0,116
6	Vapor Fuel	150	10,18870	0,000797	2,65	70	0,447	0,116
7	Vapor Fuel	100	10,18870	0,000797	2,89	70	0,331	0,079
8	Vapor Fuel	100	10,18870	0,000797	2,89	70	0,315	0,116
9	Vapor Fuel	100	10,18870	0,000797	2,98	70	0,133	0,124
10	Gas	100	8,54642	0,000996	2,61	48,46	0	0,111
11	Gas	100	8,54642	0,004014	2,61	48,46	0	0,111

La tabla 6 presenta los resultados de cada Optimización Monocriterio, considerando la función objetivo determinística, que se corresponde con $f = CT, CO_2, SO_2, NO_x$. Es es decir que, en cada caso, se minimiza el criterio f, sin restricciones, y se evalúa el resultado de los demás, conforme los datos presentados del Sistema. Por ello se tiene una estructura matricial. Los valores resultantes

Periodo	Nivel de Carga			
	1	2	3	4
	MW	MW	MW	MW
1	2.000,00	1.700,00	1.300,00	1.200,00
2	2.010,00	1.708,50	1.306,50	1.206,00
3	2.020,05	1.717,04	1.313,03	1.212,03
4	2.030,15	1.725,63	1.319,60	1.218,09
5	2.040,30	1.734,26	1.326,20	1.224,18
6	2.050,50	1.742,93	1.332,83	1.230,30
7	2.060,76	1.751,64	1.339,49	1.236,45
8	2.071,06	1.760,40	1.346,19	1.242,64
9	2.081,41	1.769,20	1.352,92	1.248,85
10	2.091,82	1.778,05	1.359,68	1.255,09
11	2.102,28	1.786,94	1.366,48	1.261,37
12	2.112,79	1.795,97	1.373,31	1.267,67

Tabla 4: Demanda Nominal del Sistema y Niveles de de Carga Considerados

Periodo	Escenario Aporte Medio			Escenario Aporte Bajo		
	Unidad Hidráulica			Unidad Hidráulica		
	1	2	3	1	2	3
	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh
1	397.100	18.911	28.241	313.855	14.947	22.320
2	403.662	16.550	26.477	250.109	10.255	16.405
3	160.395	7.996	11.164	290.981	14.506	20.233
4	220.767	14.641	43.203	177.551	11.775	34.746
5	184.488	9.326	28.639	145.959	7.379	22.658
6	338.697	16.430	16.935	103.962	5.043	5.198
7	289.013	12.130	14.451	263.514	11.060	13.176
8	515.405	27.258	10.250	446.409	23.609	8.878
9	928.066	61.739	20.643	328.104	21.827	7.298
10	428.785	16.132	5.502	405.068	15.243	5.198
11	382.194	16.448	3.300	694.924	29.907	6.000
12	675.051	43.350	26.814	453.158	29.101	18.000
Total	4,92E+06	2,61E+05	2,36E+05	3,87E+06	1,95E+05	1,80E+05

Tabla 5: Inyecciones o Aportes Hidro en cada uno de los dos Escenarios considerados

son los Puntos Óptimos o Ideales que se constituyen en las referencias pertinentes para definir las correspondientes *variables de apartamento*, empleadas en los Conjuntos Difusos exponenciales dados por la expresión (16).

Escenarios	Objetivo	Resultado para los Atributos considerados como Objetivos Únicos de Optimización – Valores de Referencia			
		Costo	CO ₂	SO ₂	NO _x
		U\$Sx10 ⁶	ton x 10 ³ /año	ton x 10 ³ /año	ton x 10 ³ /año
Aporte Bajo	Costo	157,93	6.558,50	72,379	16,063
	CO ₂	208,69	5.651,70	35,888	10,722
	SO ₂	207,68	5.664,70	35,44	10,832
	NO _x	196,92	5.893,60	43,366	9,364
Aporte Medio	Costo	127,96	5.771,40	65,993	14,116
	CO ₂	186,64	43722,40	27,004	9,322
	SO ₂	180,53	4.742	25,841	7,854
	NO _x	175,07	4.843,6	29,953	7,47

Tabla 6: Resultados de las Optimizaciones MonoCriterio

En la tabla 7, se presentan los resultados correspondientes a Modelo de Optimización Tradicional, dado por las ecuaciones (7) a (15), donde los objetivos ambientales son considerados como restricción, según (14).

Tabla 7: Resultados de las Optimizaciones MonoCriterio con Restricciones Ambientales

	Atributos			
	Costo	CO ₂	SO ₂	NO _x
Escenarios	U\$Sx10 ⁶	ton x 10 ³ /año	ton x 10 ³ /año	ton x 10 ³ /año
Aporte Bajo	188,08	6.000	50	12
Aporte Medio	145,42	5.411,20	50	12

Finalmente, en la tabla 8, siguiendo los desarrollos teóricos del Modelo de Optimización Multicriterio propuesto, desde las ecuaciones (16) a (24), sintetizado en las ecuaciones (25) y (26) y fijando un umbral mínimo de satisfacción $\alpha_{Ext} = 0,5$, se presentan sus resultados.

Tabla 8: Resultados del Modelo de Optimización Multicriterio con

		Atributos			
		Costo	CO ₂	SO ₂	NO _x
		U\$Sx 10 ⁶	ton x 10 ³ /año	ton x 10 ³ /año	ton x 10 ³ /año
Aporte Bajo	Punto Ideal	157,93	5.651,70	35,44	9,364
	Enfoque Multicriterio	169,76	5,972,10	51,373	13,575
	Grado de Satisfacción $\mu\{D\}$	0,6379	0.9449	0,6379	0,6379
Aporte Medio	Punto Ideal	127,96	4.722,40	25,841	7,47
	Enfoque Multicriterio	139,93	4.884,40	40,345	11,664
	Grado de Satisfacción $\mu\{D\}$	0,5705	0,9663	0,5705	0,5705

5. CONCLUSIONES

5.1. Este trabajo propone un nuevo contexto metodológico orientado a incluir consideraciones ambientales en la Planificación de la Explotación de los Sistemas Eléctricos. El concepto de *solución óptima*, congruente con las técnicas tradicionales de decisión, *parece colapsar al considerar la complejidad del problema ambiental*. Se plantea la necesidad de una definición más amplia del *proceso dinámico de toma de decisión*, subyacente en la planificación de los sistemas, tal que considere el *mérito subjetivo de las soluciones obtenidas*. La solución no sólo debe referirse a *mediciones objetivas*, sino que debe incluir la *percepción del planificador respecto de las mismas*; es decir: el *grado de satisfacción que el centro de decisión percibe respecto de estas soluciones*. Se destaca que en un *contexto de toma de decisión* como el presentado para el problema propuesto, la Optimización Multicriterio, como Modelo Satisfactor (Schweickardt, 2007), *guarda consistencia metodológica con el paradigma alternativo de toma de decisión, sujeto a incertidumbres no estocásticas y racionalidad acotada*, que ha sido descrito.

5.2. Se ha presentado, en primer lugar, el Modelo Tradicional de Planificación, con la variante de incluir aspectos ambientales centrados en las emisiones de CO₂, SO₂ y NO_x, generadas por las Unidades de Producción Térmicas. Posteriormente se ha introducido el Modelo de Optimización Multicriterio, en el seno del paradigma cuyos presupuestos básicos (racionalidad acotada e incertidumbre fundamental) son instrumentados aplicando técnicas de toma de decisión sustentada en Conjuntos Difusos y Teoría de Preferencias (caso de los Ponderadores de Yager). Desde datos reales de un Sistema Hidro-Térmico de mediano porte, para un horizonte de operación o explotación de un año (mediano plazo), se han efectuado las simulaciones correspondientes. Han sido seleccionados dos escenarios contemplando los regímenes hidrológicos que exhiben un contraste relativamente marcado: Aporte Bajo y Aporte Medio.

5.3. En el Modelo Multicriterio Propuesto, los criterios ambientales son integrados del mismo modo que el criterio económico, permitiendo, a su vez, fijar, mediante los ponderadores exponenciales asociados a cada Conjunto Difuso, la importancia de cada uno respecto del resto. Aquí estriba la flexibilidad y valor que exhibe el Modelo en términos de permitir incorporar, con mayor atención, los criterios ambientales, en general. Sean cual fueren estos, más allá que en esta simulación fueron considerados los vinculados a las emisiones referidas.

5.4. La posibilidad de incluir un umbral o grado mínimo de satisfacción, externamente fijado, en el Modelo Multicriterio, incorpora el concepto de aversión/propensión al riesgo que el tomador de decisiones pueda tener. Esta es otra flexibilidad que permite captar factores subjetivos, entre los cuales puede considerarse la no admisión de soluciones que exhiban elevados impactos ambientales, a través de grados de satisfacción resultantes, pequeños.

5.5. Finalmente, dado que el Modelo Multicriterio permite obtener un valor para cada Función de Pertenencia de su Conjunto Difuso asociado, las mismas pueden verse como *funciones de utilidad* (satisfacción) que resultan de las propiedades intrínsecas del sistema. De tal forma, es posible aplicar una técnica de Costo Intrínseco para valorizar, monetariamente, cada uno de los impactos ambientales, en este caso, generados por las emisiones de los agentes considerados. El concepto de Costo Intrínseco, ha sido desarrollado y aplicado por el primer autor para valorizar atributos no monetizables en forma directa, tales como la Energía No Suministrada en Sistemas de Distribución Eléctrica, y por los autores del presente trabajo, para valorizar el Impacto Visual de Redes y Aparata Eléctrica en tal clase de Sistemas.

6. REFERENCIAS

- Bellman R., Zadeh L., 1970. Decision-Making in a Fuzzy Environment. *Management Science*, 17, pp. 141-164.
- Buchanan J.T., Hening E.J., Hening M.I., 1998. Objectivity and Subjectivity in the Decision Making Process. *Annals of Operations Research*, vol. 80, pp. 333-345.
- Doubois D., Prade H., 1980. *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*. New York, London, Toronto Press.
- Hening M.I., Buchanan J.T., 1994. Decision making by multiple criteria: A concept of solution. XI th International Conference on Multiple Criteria Decision Making, August 1-6, Coimbra, Portugal, p. 47.
- Lavoie, M. 1992. *Foundations of PostKeynesian Economic Analysis*. Edward Elgar Publishing. University of Ottawa, Canada.
- Lax P., 1997. *Linear Algebra*. Wiley Interscience: New York. Chapter 16, pp. 196.
- Moreno J. M., Aguarón J., Escobar M.T., 2001. Metodología Científica en la Valoración y Selección Ambiental. *Pesquisa Operacional*. Junio, vol. 21 N° 1, pp. 1-16.
- Rahman, S., De Castro, A., 1995. Environmental Impacts of Electricity generation: A Global Perspective. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 10, N° 2, June, pp. 307-314.
- Romero C, 1993. *Teoría de la Decisión Multicriterio: Conceptos, Técnicas y Aplicaciones*. Editorial Alianza Universidad Textos. Madrid.
- Saaty T., 1977. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*. 15, pp. 234-281.
- Schweickardt G., 2007. *Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Económicamente Adaptados. Discusión y Propuestas Metodológicas*. Editorial Fundación Bariloche, Argentina. ISBN 978-987-23544-0-4.
- 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.
- Yager R., 2004. Modeling Prioritized Multicriteria Decision Making, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—part b: Cybernetics*, vol. 34, N° 6, pp. 2396-2404, December.
- Zimmermann H., 1996. *Fuzzy set theory and its applications*. Kluwer Academic Publishers. Third Edition.

Lista de Abreviaciones

Variables:

Cd_m^n	Costo de la Potencia no Abastecida en el nivel de demanda m y en el período n
C_{sm}^n	Costo de Producción de la unidad s en el nivel de demanda m del período n
CT	Costo Total de Producción del Sistema en el escenario considerado
DNS_m^n	Demanda no Abastecida en el nivel m y en el período n
E_{km}^n	Emisiones del tipo k asociadas a la unidad térmica s en el nivel de demanda m y en el período n
ETk	Emisiones Totales del tipo k
PH_{hm}^n	Potencia Entregada por la unidad hidro h en el nivel de demanda m y en el período n
PT_{sm}^n	Potencia Entregada por la unidad térmica s en el nivel de demanda m y en el período n
SP_h^n	Agua liberada desde el reservorio h en el período n
t_m	Duración del nivel de demanda m
U_{sm}^n	Coefficiente de Compromiso en la decisión de abastecimiento por parte de la unidad térmica s en el nivel de demanda m y en el período n
V_h^n	Reserva de Energía Hidro correspondiente a la unidad h en el período n
W_f	Ponderador relativo del tomador de decisiones (ponderador de Yager) sobre la desviación normalizada entre el valor del atributo de decisión f y su valor ideal f*
$\mu_{DEM_m}^n$	Función de Pertenencia correspondiente al Conjunto Difuso asociado a la Restricción de Demanda en el nivel m para el período n
$\mu_{AP_h}^n$	Función de Pertenencia correspondiente al Conjunto Difuso asociado a la Restricción de Balance de Agua para el reservorio h en el período n
$\mu_{Re_m}^n$	Función de Pertenencia correspondiente al Conjunto Difuso asociado a la Restricción de Reserva para el nivel de demanda m en el período n
α	Nivel de Satisfacción correspondiente a los atributos de decisión

Constants:

$a1_s$	Coefficiente Lineal de la Curva de Calentamiento de la unidad térmica s
$a2_s$	Coefficiente Cuadrático de la Curva de Calentamiento de la unidad térmica s
AP_h^n	Inyección Hidro expresada en Energía para la unidad h en el período n
CE_{ks}	Coefficiente de Emisión asociado al tipo k para la unidad térmica s
CF_s	Costo de Combustible asociado a la unidad térmica s
D_m^n	Demanda de Potencia Nominal en el nivel m y en el período n
dAP	Máxima Desviación de las Inyecciones respecto del valor pronosticado
dDem	Máxima Desviación de la Demanda de Potencia respecto de su valor nominal
dRe	Máxima Desviación porcentual de la Reserva respecto de su valor nominal
$ETmax_k$	Máxima Cantidad de emisión del tipo k en el horizonte de planificación
N	Número de Periodos considerados en la Optimización del Sistema
NB	Número de niveles de demanda considerados en la Optimización del Sistema
NS	Número de unidades térmicas del Sistema
NH	Número de unidades hidro del Sistema

PH_{max_h} Máxima tasa de variación de la capacidad de la unidad hidro h

PT_{max_s} Máxima tasa de variación de la capacidad de la unidad térmica s

PT_{min_s} Mínima tasa de variación de la capacidad de la unidad térmica s

Re_m^n Porcentaje Nominal de Reserva en el nivel de demanda n y en el periodo m

V_{max_h} Máxima Energía de Reserva para la unidad hidro h

V_{min_h} Mínima Energía de Reserva para la unidad hidro h

Operadores:

Min t-norma Min, que resulta en el valor mínimo de las funciones de pertenencia, en cierta instancia, asociadas a cada Conjunto Difuso representativo de los criterios de optimización

Conjuntos:

H Unidades Hidro, de índice h

S Unidades Térmica, de índice s

K Conjunto de Emisiones, de índice k

