

DISCUSIÓN DE LA TEORÍA ECONÓMICA Y SU APLICACIÓN EN MODELOS MULTIDISCIPLINARIOS ENERGÉTICOS

PARTE 1: INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DE DECISIÓN DIFUSOS

FEDERICO G. CAMARGO - ESTEBAN SARROCA - OMAR FAURE - FÉLIX D. ARGANÁRAZ - JOSÉ A. CABANA - CLAUDIO KARAM - GONZALO SOSA - YOLANDO R. ROMERO - VICENTE CALBO - EDUARDO A. PEREZ

UTN – Facultad Regional La Rioja, Facultad Regional de Concepción del Uruguay, Facultad Regional de Concordia – Argentina.

camargof@frcu.utn.edu.ar - esarroca@gmail.com - ofaure@gmail.com - arganarazfelixdaniel@gmail.com - josecabanaconsultora@gmail.com - claudio_karam@hotmail.com - gonzalososa1@gmail.com - romero.yr@gmail.com - vicentecalbo@yahoo.com.ar - ing_eduardoperez@hotmail.com

Fechas recepción: agosto 2022 - Fecha aprobación: abril 2023

ARK CAICYT: <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s18539777/r6x80gjkr>

RESUMEN

En el presente trabajo se abordan aspectos introductorios a la teoría de decisión difusa: ley de oferta y demanda, mercado y sus limitaciones (externalidades) con las soluciones propuestas en la teoría y práctica para solucionarlas (peaje). Dentro de estas limitaciones (aún en discusión), se introduce el concepto de incertidumbre, aspecto que dificulta una toma de decisión óptima de los individuos participantes en base a las teorías económicas actuales que se basan en la plena certidumbre del contexto económico. Por lo tanto, se introduce la teoría de decisión y su extensión hacia la teoría de la decisión difusa, que es aplicable en contextos de incertidumbre. Se presenta el Análisis de Procesos Jerárquicos – Analytic Hierarchy Process (AHP) y su vínculo con los modelos de decisión difusos mediante los ponderadores exponenciales. Por lo tanto, el propósito del presente artículo es definir una metodología de evaluación, valoración y regulación óptima, en contextos de incertidumbre del tipo fundamental, determinando el premio o castigo óptimo, en base a índices no monetizables (traducibles a un costo económico equivalente) de forma directa. A partir de allí se define un índice experimental, el cual es utilizado en la presente línea de investigación, el Costo Intrínseco – *Intrinsic Cost* (IC).

PALABRAS CLAVE: Problema multiobjetivo - Teoría de la decisión difusa-externalidad - Valoración económica - Valor intrínseco.

ABSTRACT

This paper deals with introductory aspects of fuzzy decision theory: law of supply and demand, market and its limitations (externalities) with the solutions

proposed in theory and practice to solve them (tolls). Within these limitations (still under discussion), the concept of uncertainty is introduced, an aspect that hinders an optimal decision making of the participating individuals based on current economic theories that are based on the full certainty of the economic context. Therefore, decision theory and its extension to fuzzy decision theory, which is applicable in contexts of uncertainty, are introduced. The Analytic Hierarchy Process (AHP) and its link with fuzzy decision models by means of exponential weights are presented. Therefore, the purpose of this article is to define a methodology for optimal evaluation, valuation and regulation, in contexts of fundamental uncertainty, determining the optimal reward or punishment, based on non-monetizable indexes (directly translatable to an equivalent economic cost). From there, an experimental index is defined, which is used in the present line of research, the Intrinsic Cost (IC).

KEYWORDS: Multi-objective problem - Fuzzy decision theory - Externality - Economic valuation - Intrinsic value.

1. INTRODUCCIÓN

En el presente artículo se desarrollan los fundamentos teóricos de la economía, que servirán de introducción para futuros trabajos. El aporte teórico y práctico es de carácter multidisciplinario e involucra ramas de la economía, ingeniería eléctrica, ambiental, software, entre otros. Por lo que se torna compleja su comprensión y resolución debido a los vacíos metodológicos y desacuerdo entre dichas disciplinas en criterios de medición, definición y evaluación ya que algunas de ellos son contrarias. En segundo lugar, para formular estos problemas se requieren de programas caros y complejos, sobre todo en las redes eléctricas. Finalmente, no hay acuerdo sobre el mecanismo de regulación más apropiado para aplicar y las sanciones requeridas para garantizar los criterios de calidad mínimos requeridos. Esto se debe a que estos atributos no están sujetos a las leyes convencionales de equilibrio de mercado y, en consecuencia, no son monetizables directa y objetivamente. Los métodos utilizados en la actualidad se fundan en suposiciones simplificadoras como la linealización de la función y las restricciones, el uso de modelos estocásticos, entre otros. En consecuencia, los planes de inversión teóricamente óptimos resultantes podrían no serlo en absoluto. Los autores de este artículo han resuelto problemas que presentan múltiples índices a optimizar mediante técnicas avanzadas de inteligencia artificial. Algunos ejemplos son el balance de fases en una red eléctrica de baja tensión y el problema de confiabilidad en redes de media tensión.

En el presente trabajo se abordan aspectos introductorios a la teoría de decisión difusa: ley de oferta y demanda, mercado y sus limitaciones (externalidades) con las soluciones propuestas en la teoría y práctica para solucionarlas (peaje). Dentro de estas limitaciones (aún en discusión), se introduce el concepto de incertidumbre, aspecto que dificulta una toma de decisión óptima de los individuos participantes en base a las teorías económicas actuales que se basan en la plena certidumbre del contexto económico. Por lo tanto, se introduce la teoría de decisión y su extensión hacia la teoría de la

decisión difusa, que es aplicable en contextos de incertidumbre. Se presenta el Análisis de Procesos Jerárquicos – Analytic Hierarchy Process (AHP) y su vínculo con los modelos de decisión difusos mediante los ponderadores exponenciales. Por lo tanto, el propósito del presente artículo es definir una metodología de evaluación, valoración y regulación, en contextos de incertidumbre del tipo fundamental, determinando el premio o castigo óptimo, en base a índices no monetizables (traducibles a un costo económico equivalente) de forma directa. A partir de allí se define un índice experimental, el cual es utilizado en la presente línea de investigación, el Costo Intrínseco – *Intrinsic Cost* (IC). El IC se asocia al efecto (marginal) de empeorar o mejorar un índice respecto al otro. Esto es útil para establecer mecanismos de penalización de externalidades negativas (métodos a posteriori). Se busca que dichas penalizaciones no sean bajas ni excesivas, esto es de forma tal de incentivar a la empresa a mejorar su eficiencia mediante las inversiones necesarias y que estas sean recuperadas en el menor tiempo posible (Camargo, 2021a, 2022b, 2022c, 2023d; Camargo et al 2018).

Las ventajas de la presente metodología (introducidas en el presente trabajo) son las siguientes. 1) Posee flexibilidad dado que incorpora diversos aspectos considerados en las distintas teorías económicas y de la teoría de decisión: valoración objetiva y subjetiva, consideración de las preferencias del tomador de decisiones (individuo, agente, etc.), nivel de aceptación (utilidad) e inclusión de límites (disponibilidad y escases). 2) Incorporación de la incertidumbre fundamental, que implica el desconocimiento del costo económico asociado a índices no monetizables en forma directa, que no tienen un mercado asociado y cuya resolución mediante las técnicas utilizadas en la programación matemática no es simple (esto verá en la siguiente publicación). 3) Flexibilidad para la incorporación del AHP y posibilidad de analizar la consistencia de los mismos. Adicionalmente se pueden incorporar metaheurísticas tales como variantes de la Optimización por Enjambre de Partículas. 4) La expresión del IC es relativamente simple de calcular y se puede aplicar antes de realizar una optimización del problema, obteniendo de esta forma una estimación de los costos asociados. Por último, esta expresión incluye las tres ventajas mencionadas anteriormente.

El artículo se estructura como se detalla a continuación. En la Sección 2 se presenta el estado del arte: problemas multidisciplinarios y ley de la oferta y demanda (sección 2.1), mecanismos de regulación y optimización (Sección 2.2), frontera de eficiencia (Sección 2.3), teoría de la decisión: riesgo e incertidumbre (Sección 2.4), axiomas para la evaluación de alternativas (Sección 2.5), AHP (Sección 2.6), conjuntos difusos (Sección 2.7), confluencia de conjuntos difusos y ponderaciones (Sección 2.8), análisis de procesos jerárquicos en modelos de decisión difusos (Sección 2.9) y el índice de costo intrínseco (Sección 2.10). En la Sección 3 se consideran los principales aspectos analizados y se presentan los futuros trabajos.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Problemas Multidisciplinarios y Ley de Oferta y Demanda

La adaptación es la cualidad de un agente de acomodarse a una situación determinada optimizando el uso de los recursos escasos (economía). Cuando una persona decide asignar un recurso a un uso concreto, está descartando su uso para otro fin. A esto se le conoce como costo de oportunidad. La herramienta más utilizada en ese sentido se llama mercado. En ese sentido, el propósito principal en la ingeniería es la solución de problemas (asignación de recursos), buscando la mejor satisfacción de estas necesidades. Es decir, el método utilizado debe cumplir ciertos requisitos: satisfacción de los requerimientos respecto a costos, reglamentaciones respecto a impacto ambiental, normas y procedimientos estándares, entre otros. Entonces, interesa conocer la calidad de la solución obtenida y si se cumplieron los requisitos de calidad, surgiendo conceptos como eficacia y eficiencia. La eficacia se refiere a si se lograron los objetivos, en cambio la eficiencia se refiere a la capacidad de disponer de algo o de alguien para conseguir un objeto determinado con el mínimo de recursos posible viable, es decir, es la relación entre los recursos utilizados y los logros obtenidos (Camargo, 2021a, 2022b, 2022c, 2023d; Camargo et al 2018).

La satisfacción de estos objetivos involucra el área computacional, donde se busca la solución más satisfactoria, dado que los problemas son multiobjetivos y la solución óptima depende de los criterios de decisión. Se tienen los siguientes interrogantes (que se discutirán en las siguientes secciones) de las disciplinas estudiadas: economía, ingeniería, ambiental y computacional, los cuales son los siguientes (Camargo, 2021a, 2022b, 2022c, 2023d; Camargo et al 2018). 1) ¿Cómo asignar de mejor forma los recursos limitados o escasos (economía)? 2) ¿Cuál es la mejor forma de resolver este problema (ingeniería)? 3) ¿Qué herramientas se disponen y cuáles son las más adecuadas (área computacional/sistemas)? 4) ¿Cuál es la mejor solución o la solución más satisfactoria en problemas multidisciplinarios? 5) ¿Cuál es la planificación óptima de esta solución propuesta cuidando el medio ambiente?

En la ley de Oferta y Demanda (FIGURA 1), oferentes (línea azul) como demandantes (línea roja) de un producto se ponen de acuerdo (punto de equilibrio) respecto al precio y cantidad de transacción, sin capacidad de imponer el precio de transacción (Competencia Perfecta). Manteniéndose todo lo demás constante (Ceteris Paribus), si Q_{oferta} aumenta, entonces P_{oferta} aumenta, debido al incremento de los costos marginales o por unidad producida, mientras que al aumentar $Q_{demanda}$, el consumidor podrá pagarlo a un menor precio $P_{demanda}$ debido a sus límites presupuestarios.

Si los costos asociados a la oferta crecen (logística, insumos, subas de combustibles), entonces la curva de la oferta se traslada y por lo tanto también el punto de equilibrio. Entonces el precio de transacción será mayor y la cantidad será menor (y viceversa), ver ECUACIÓN 1 y FIGURA 2 (a). En cambio, si el presupuesto de la demanda se incrementa (mayores sueldos), entonces el incremento de la demanda asociada producirá un incremento del precio (y viceversa), ver ECUACIÓN 1 y FIGURA 2 (b) (Maamoun, 2019; Miyamoto and Takeuchi, 2019, Ichihashi, 2021; Jeanne and Korinek, 2019; Cavallaro et al., 2018; Pradhan and Ghosh, 2022; Robson et al., 2018).

$$((P_2 > P_1) \cap (Q_2 < Q_1)) \cup ((P_2 > P_1) \cap (Q_2 > Q_1)) \quad (1)$$

Las curvas de oferta y demanda definen fronteras de eficiencia, donde oferentes y demandantes maximizan sus funciones de utilidad o beneficios. Se toma el supuesto de la elección racional, donde las personas (individuos o agentes) sopesan (preferencias) sus costos (restricciones presupuestarias) y la satisfacción de necesidades (maximización de utilidad) que le reporta cada una de las posibilidades de adquisición. A partir de la teoría del valor y marginal surge un concepto denominado valor intrínseco, que está asociado a aquellos recursos que son esenciales a algo (utilidad marginal), es decir, el valor está asociado a la utilidad marginal. La teoría subjetiva del valor sostiene que el valor de un bien no está determinado por ninguna propiedad inherente a este (utilidad marginal), ni por la cantidad de trabajo requerido para producirlo (restricciones presupuestarias), sino por la importancia que un individuo le da para satisfacer sus necesidades (Robson et al., 2018; Zhang and Zhang, 2018; Simshauser, 2018; Aydin and Esen, 2018; Silajdzic and Mehic, 2018).

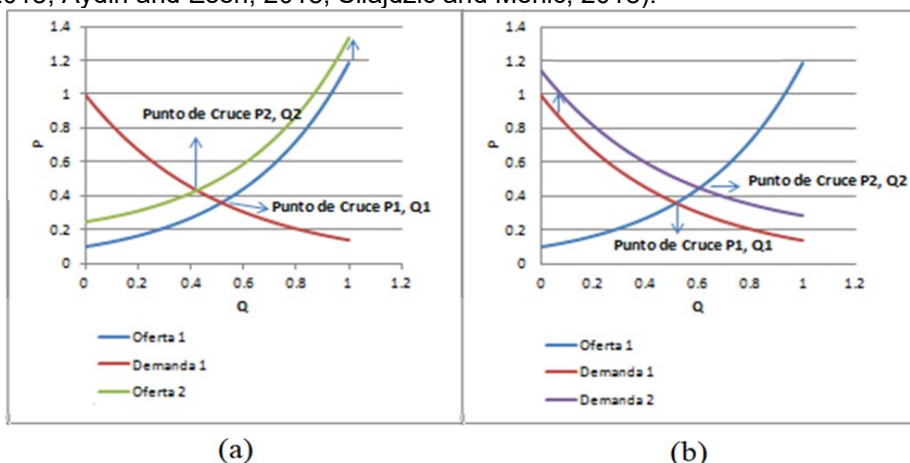


FIGURA 1. (a) Desplazamiento de oferta y (b) Desplazamiento de demanda.
Fuente: elaboración propia.

Desde la perspectiva de la demanda (FIGURA 1): al incrementarse la disponibilidad del producto, su valor percibido (por la demanda) cae debido a que tiene menor importancia para satisfacer sus necesidades. Sin embargo, cuando la disponibilidad de agua es baja (en un desierto), su utilidad marginal es mayor que para los diamantes. Adicionalmente, si un granjero tiene cinco sacos de granos, el valor de la bolsa corresponde al último uso realizado con respecto a la bolsa, lo cual se verá influenciado por su escases o disponibilidad (utilidad marginal decreciente). Por lo tanto, la apreciación del valor de un bien por parte de la demanda depende de la disponibilidad y necesidades del individuo (preferencias) y no de sus propiedades intrínsecas.

Desde el punto de vista de la oferta: el valor del agua es usualmente menor que el de un diamante porque el trabajo socialmente necesario para conseguir un diamante es mayor (mayor escasez) que el necesario para proveerse de agua, independiente de que el agua sea usada para satisfacer una

función vital y el diamante no. La eficiencia asignativa de los recursos significa que las actividades productivas poseen un costo marginal igual al precio, es decir, el precio de un bien es el costo de producir una unidad adicional. El costo marginal, correspondiente a la transacción realizada en el mercado analizado, dependerá de los siguientes factores: 1) La naturaleza de la función de utilidad (o de aptitud), 2) Las restricciones de disponibilidad (límites) y 3) Los parámetros de contorno que son considerados datos, tales como el precio de los recursos utilizados (certidumbre). Conforme las características de funcionamiento de los mercados se van apartando del modelo ideal, el concepto de costo marginal igual al precio es difícil de sostener. Sin embargo, el concepto ha sido utilizado ampliamente en los mercados eléctricos. En el despacho económico, se recurre al concepto del costo de la última unidad de generación incorporada.

2.2 Mecanismos de regulación y valoración

Se distinguen los siguientes mecanismos de regulación (Maamoun, 2019; Miyamoto and Takeuchi, 2019, Ichihashi, 2021). 1) A los métodos de regulación basados en costos se les conoce como métodos con incentivos de bajo poder, pues le permiten a la empresa recuperar sus costos sea cual sea su desempeño eficiente o ineficiente. 2) Los mecanismos de regulación por incentivos se les conoce como métodos con incentivos de alto poder, pues disocian a los precios regulados con la evolución de los costos de la empresa regulada, permitiéndole a esta última aprovecharse de cualquier mejora en eficiencia que ella logre. 3) El mecanismo de regulación por costos comprende lo que se conoce como regulación de la tasa de retorno (*Rate of Return o Cost-Plis*). 3.1) La Regulación por Precios Tope - Price Cap Regulation consiste en fijar un precio máximo en el servicio que brinda la empresa. De esta manera se incentiva a reducir costos para incrementar su beneficio. 3.2) La Regulación por Precios Ramsey - Ramsey Pricing es aplicable a un monopolio natural multiproducto, los cuales se definen como precios lineales y deben satisfacer la restricción de ingresos totales iguales a los costos totales, minimizando las pérdidas de bienestar. 3.3) La Regulación por Comparación - Yardstick competition consiste en obtener información sobre los parámetros relevantes mediante la observación de otras empresas similares tecnológicamente. Se busca inferir los costos a ser aplicados en la regulación tarifaria de la empresa de interés. 3.4) La Regulación basada en el desempeño de una empresa modelo eficiente consiste en comparar el desempeño de la empresa regulada con una empresa ficticia eficiente.

En condiciones normales, si se establecen los derechos de propiedad entre ambos (seguridad energética y calidad de la energía) y existe la máxima eficiencia, las transacciones (entre el proveedor y los consumidores) se realizan a costo cero. En caso contrario, si la provisión de servicio energético repercute negativamente sobre la sociedad (mala calidad de servicio energético o externalidad), entonces se establecen impuestos pigouvianos (penalización). En segundo lugar, cuando el costo social (marginal) es mayor que el beneficio social (marginal), el generador del daño tiende a sobre-explotar dicha actividad, principalmente porque no afronta todos los costos asociados. Entonces, la sanción económica penaliza al generador de una externalidad negativa

(proveedor de energía) por el daño (marginal) que inflige al resto de la sociedad (consumidores). De esta forma, el Estado debe estimar correctamente el beneficio privado y el costo social de la externalidad, para obtener el impuesto a aplicar, buscando no desequilibrar la economía, lo cual es fácil de calcular en la práctica (Jeanne y Korinek, 2019; Camargo, 2021a, 2022b, 2022c, 2023d; Camargo et al 2018). En el mercado de carbono, se ofrecen y demandan permisos de emisiones de CO_2 según si se disponen o no de los mismos, sujetándose su precio a las leyes de la oferta y demanda del mercado eléctrico. Este precio tiene en cuenta el mercado global y no tiene en cuenta las situaciones individuales de los participantes (preferencias), sus límites de emisiones, nivel de desarrollo económico y posibilidad de acceso a tecnologías de mitigación de emisiones.

2.3 Frontera de eficiencia

En los problemas de optimización multidisciplinarios o multiobjetivos, existen distintos atributos del sistema $f_i(x)$ que se quieren maximizar o minimizar (ver FIGURA 2). Dado un conjunto de alternativas X , se buscan soluciones que maximicen y/o minimicen los índices evaluados.

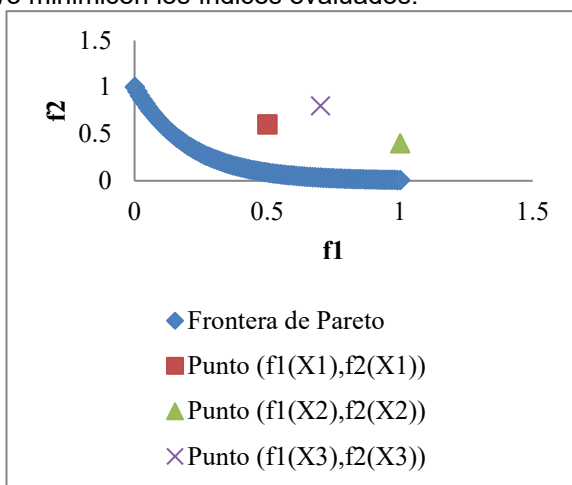


FIGURA 2. Soluciones no dominadas y Frontera de Pareto.

Fuente: elaboración propia.

Este concepto, que es utilizado en economía y diferentes ciencias sociales, se denomina eficiencia de Pareto, óptimo de Pareto u optimalidad de Pareto (Camargo, 2021a, 2022b, 2022c). Entonces, dada una asignación inicial de bienes entre un conjunto de individuos, un cambio hacia una nueva asignación que al menos mejora la situación de un individuo sin hacer que empeore la situación de los demás se denomina mejora de Pareto. Es decir, una asignación se define como Pareto-eficiente o Pareto-óptima cuando no pueden lograrse nuevas mejoras de Pareto. Entonces, la eficiencia de Pareto es una noción mínima de la eficiencia y no necesariamente da por resultado una distribución socialmente deseable de los recursos. La dominancia es un concepto clave en

los problemas multiobjetivos, la elección depende de las preferencias del individuo (evaluador) y la cantidad de evaluadores involucrados da pie a lo que se llama: teoría de la decisión.

2.4 Teoría de la decisión: riesgo e incertidumbre

La teoría de la decisión se ocupa de analizar cómo elige una persona aquella acción que, de entre un conjunto de acciones posibles, le conduce al mejor resultado dadas sus preferencias (Camargo, 2021a, 2022b, 2022c, 2023d; Camargo et al 2018). Se puede clasificar según la cantidad de actores, el contexto de decisión y el manejo y tipo de información disponible. Se presenta en la TABLA 1 un resumen de las teorías de decisión utilizadas.

	TIPOS	MANEJO DE LA INFORMACIÓN	
UN ACTOR	Paramétrica: el contexto es un parámetro.	Información completa	Certidumbre
		Información incompleta	Riesgo
			Incertidumbre
MÁS DE UN ACTOR	Estratégica: las decisiones y preferencias de un actor dependen de las decisiones de los demás.	Teoría de juegos: la elección de cada individuo dependerá de las elecciones de los otros.	
		Teoría de la decisión social: la preferencia colectiva dependerá de las preferencias de cada individuo.	

TABLA 1. Clasificación de la teoría de la decisión. Fuente: elaboración propia.

En el caso de un actor, condiciones paramétricas y manejo de información completa, el individuo encontrará una situación de certidumbre con la elección y jerarquía realizada. Podrá de esta manera maximizar a su criterio la utilidad conforme a la elección tomada. Esta condición es la ideal, aunque raramente se da en la práctica. Cuando el individuo posee información incompleta sobre las consecuencias posibles de su elección, entonces puede darse una situación de riesgo o incertidumbre. Existe riesgo si el individuo dispone al menos de estudios probabilísticos sobre las consecuencias de las elecciones a tomar. El individuo puede inferir con cierto grado de confianza sobre las consecuencias de sus elecciones y tomar en base a estas las elecciones que maximicen su utilidad. Existe incertidumbre, cuando ya se desconoce el resultado de su elección y la probabilidad de ocurrencia. Por lo tanto, el decisor difícilmente puede establecer un criterio de jerarquía entre los atributos analizados, este concepto fue referido por Keynes como incertidumbre fundamental, entonces, se recurre a la Teoría de Decisión Difusa (Fuzzy Decision Making). Esta teoría permite incorporar la valoración subjetiva de índices y criterios de jerarquía.

2.5 Axiomas para la evaluación de alternativas

Se busca que las preferencias satisfagan ciertos criterios básicos de

consistencia lógica, estos son los axiomas de la teoría de decisión social. En la TABLA 2 se presentan los axiomas de la teoría de la decisión social: transitividad, completitud, asimetría, simetría de la indiferencia, unanimidad, indiferencia de las alternativas irrelevantes y dictadura. Si los primeros cuatro requisitos no se cumplen a la vez, resultará imposible saber qué es lo que el individuo prefiere; no se podrán ordenar —jerarquizar— sus preferencias. En ese caso, la teoría de la decisión considerará que dicha persona no elige racionalmente, es decir de forma lógicamente consistente. Si se cumple con el requisito de la transitividad entonces el tomador de decisiones no saldrá perjudicado con su elección. La completitud exige que el decisor compare entre sí todas sus opciones y se decida por una de ellas o manifieste su indiferencia. A su vez, la asimetría y la simetría resultan evidentes de por sí y, adicionalmente, son contradictorias entre sí. En este sentido, si es indiferente entre la alternativa *A* y *B*, no puede afirmar que prefiere la alternativa *B* a la *A*; y si prefiere estrictamente la alternativa *B* al *A*, no puede preferir la alternativa *A* a la *B* (Camargo, 2021a, 2022b, 2022c, 2023d; Camargo et al 2018).

AXIOMA	CONDICION	CASO 1	CASO 2
Transitividad	Para toda alternativa <i>A, B, C</i>	Si <i>A</i> es preferida a <i>B</i> y <i>B</i> es preferida a <i>C</i>	Entonces <i>A</i> es preferida a <i>C</i>
Completitud		O bien la alternativa <i>A</i> es preferida a <i>B</i>	O bien <i>B</i> es preferida a <i>A</i>
Asimetría		Si la alternativa <i>A</i> es preferida estrictamente a <i>B</i>	Entonces <i>B</i> no es preferida estrictamente a <i>A</i>
Simetría		Si la alternativa <i>A</i> es indiferente a <i>B</i>	Si la alternativa <i>B</i> es indiferente a <i>A</i>
Unanimidad		La sociedad prefiere <i>A</i> a <i>B</i>	Si cada individuo prefiere <i>A</i> a <i>B</i> .
Independencia		No añadir o considerar nuevas alternativas a <i>A, B, C</i> o variar el orden de preferencia.	
Dictadura		Si un individuo prefiere <i>A</i> a <i>B</i>	Entonces la sociedad prefiere <i>A</i> a <i>B</i>

TABLA 2. Axiomas de la teoría de decisión social. Fuente: elaboración propia.

Si estos requisitos se cumplen se podrá atribuir al individuo una función de utilidad, es decir, orden jerárquico desde lo menos preferido a lo más preferido. Para proceder al análisis de la decisión en estos axiomas, es preciso identificar previamente un conjunto de opciones posibles o factibles de alternativas y un

conjunto de consecuencias de cada una de las opciones. Se supone que, dado su conjunto factible, el individuo elegirá aquella opción que tenga las mejores consecuencias, es decir, la que prefiera más. La paradoja de Arrow o teorema de imposibilidad de Arrow establece que cuando los votantes tienen tres o más alternativas, no es posible diseñar un sistema de votación que permita reflejar las preferencias de los individuos en una preferencia global de la comunidad de modo que al mismo tiempo se cumplan ciertos criterios 'racionales': 1) Dominio no restringido. 2) Ausencia de un "dictador", es decir, de un individuo o agente que tenga el poder para cambiar las preferencias del grupo. 3) Eficiencia de Pareto. 4) Independencia de alternativas irrelevantes (Camargo, 2021a, 2022b, 2022c, 2023d).

Entonces, la teoría de la decisión social busca responder a la siguiente pregunta: ¿En qué contexto resulta posible que las preferencias agregadas de un conjunto de individuos sean racionales (reflexivas, transitivas y completas)? Es decir, ¿Se puede obtener de alguna forma una función que agregue todas las preferencias individuales y cumpla un mínimo de condiciones democráticas? El resultado del Teorema de Arrow concluye que no existe ninguna regla de agregación de preferencias que satisfaga todas las propiedades normativas deseables, es decir lo siguiente. 1) La agregación resulte en preferencias racionales que represente a cada individuo. 2) La regla y los resultados sean válidos para cualquier configuración de preferencias. 3) Se obtenga una decisión unánime o satisfactoria para todos los individuos. 4) La preferencia social entre dos alternativas sea independiente de la existencia o no de terceras alternativas, a no ser que las preferencias sean el fiel reflejo de las preferencias de algún individuo (dictador).

2.6 Proceso analítico jerárquico (AHP)

A partir del análisis el cumplimiento de los primeros cuatro axiomas surge el Análisis de procesos Jerárquicos (AHP), desarrollado por Thomas L. Saaty, que está diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples (Saaty, 2003; Camargo, 2023d; Liu et al., 2020). El AHP requiere que el tomador de decisiones proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y especificar su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión. El resultado del AHP es una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada una de las alternativas de decisión. Para una instancia de un problema de optimización con j objetivos, se desea establecer una escala de preferencias entre los mismos a través de un vector de prioridades $w = [w_1, \dots, w_k]$ cuyos elementos representen ponderaciones para los objetivos. Entonces, relacionándolo con los axiomas presentados, se presenta en la TABLA 3 los principales axiomas relacionados a la teoría de la decisión social, donde w_A y w_B son ponderadores utilizados para evaluar los atributos A y B .

Se construye una matriz de preferencia donde cada elemento representa las preferencias relativas de un atributo respecto de otro $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$. Para esto, se requiere una matriz de preferencias A , de orden $n \times n$, cuyas entradas

representan la importancia relativa de los objetivos. Así, la entrada a_{ij} de la matriz indica cuánto más importante es el objetivo i respecto del objetivo j . La importancia se mide en una escala de valores enteros del 1 al 9. Si, por ejemplo, $a_{12} = 2$, significa que el objetivo 1 es doblemente importante que el objetivo 2. De esta definición se sigue que $a_{ii} = 1$ para toda i , y que $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$. De esta forma, resulta que A es una matriz positiva y recíproca. Utilizando el mismo ejemplo, si $a_{12} = 2$, luego $a_{21} = 1/2$.

AXIOMA	Transitividad	Completitud	Asimetría	Simetría
CONDICION	Si $w_A > w_B$ y $w_B > w_C$ Entonces $w_A > w_C$	O bien $w_A \geq w_B$ O bien $w_A \leq w_B$	Si $w_A > w_B$ Entonces $w_A < w_B$	Si $w_A = w_B$ Entonces $w_B = w_A$

TABLA 3. Axiomas de la teoría de decisión social. Fuente: elaboración propia.

La matriz de preferencias A se define entonces de forma genérica, para n objetivos, en la ECUACIÓN 2. El teorema de Perron garantiza, para tal matriz, la existencia de un autovalor dominante y positivo, λP , así como de su correspondiente autovector, VP , cuyos componentes son también positivos. Se cumple que $\lambda P \geq n$ (donde n es el orden de la matriz). Solo si la matriz A exhibe preferencias consistentes, resultará $\lambda P = n$.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{21}} & 1 & a_{2k} \\ \frac{1}{a_{n1}} & \frac{1}{a_{2k}} & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow a_{ik} = a_{ij} \cdot a_{jk} \quad \forall i, j, k = 1, \dots, n \quad (2)$$

Para medir la consistencia de la matriz A , se define la razón de consistencia en la ECUACIÓN 3. Donde IC_{AHP} se llama Índice De Consistencia y RI es el denominado coeficiente de consistencia aleatoria. Si $RC \leq 0.1$, el nivel de inconsistencia es aceptable. De lo contrario, la inconsistencia es alta y quizás el tomador de decisiones deba revisar las estimaciones de los a_{ij} . Se distinguen tres tipos de metodologías para la resolución de problemas multiobjetivo basados en el tipo de información sobre las preferencias del decisor: sin información, con información a priori y a posteriori (Camargo2022b; Camargo et al 2018).

$$RC = \left[\begin{matrix} IC_{AHP} \\ RI \end{matrix} \right] = \left[\begin{matrix} \frac{\lambda P - n}{n - 1} \\ \frac{1.98 \cdot (n - 2)}{n} \end{matrix} \right] \quad (3)$$

2.7 Conjuntos difusos

Se analizaron las distintas áreas en la teoría de decisiones, una de ellas es cuando el decisor posee incertidumbre en el resultado de su decisión y la probabilidad asociada, la cual se denomina como incertidumbre fundamental. Zadeh ha sugerido un enfoque para la gestión de la incertidumbre basándose en la lógica difusa (Zadeh et al., 2014; Liu et al. 2020; Camargo, 2021a, 2022b, 2022c, 2023d; Camargo et al 2018). La lógica difusa o borrosa provee un modelo

para realizar razonamientos aproximados. Esto difiere de la lógica clásica, donde los sistemas formales proveen un modelo de razonamiento exacto, modelos en los cuales no hay lugar para la imprecisión, la vaguedad o la ambigüedad. Por razonamiento aproximado se entiende un proceso por el cual se deduce una conclusión imprecisa posible de un conjunto de premisas imprecisas. Los rasgos distintivos de la lógica difusa son: Valores de verdad difusos expresados en términos lingüísticos, Tablas de verdad imprecisas y Reglas de inferencia cuya validez es aproximada en lugar de exacta. En un contexto de toma de decisiones, los conjuntos difusos pueden ser utilizados para representar apreciaciones subjetivas del decisor sobre el grado en que los elementos de un conjunto cumplen con determinado objetivo.

Un objetivo representa una medida de eficiencia que permite establecer qué soluciones son preferibles respecto de otras y una restricción establece un requisito que las soluciones deben cumplir para ser consideradas factibles. Estas restricciones no son más que conjuntos rígidos, que asignan valor 1 o 0 a cada solución, según resulte factible o no (grados de satisfacción). La lógica difusa se basa en la premisa de que la percepción humana involucra conjuntos difusos, esto es, clases de objetos en los cuales la transición entre pertenencia y no pertenencia es gradual en lugar de abrupta. La pertenencia en un subconjunto clásico A de X puede verse como una función característica, μ_A de X a $\{0, 1\}$, según la ECUACIÓN 4. El término *sii* es la abreviatura de “si y sólo si” y $\{0, 1\}$ es llamado el conjunto de valuación, que puede ser el intervalo real entre 0 y 1, entonces \tilde{A} es llamado conjunto difuso. $\mu_{\tilde{A}}$ es llamada función de pertenencia y $\mu_{\tilde{A}}(x)$ es el grado de pertenencia de x a \tilde{A} . Cuanto más cerca de 1 es el valor de $\mu_{\tilde{A}}(x)$, x pertenece en mayor medida al conjunto \tilde{A} . Luego \tilde{A} queda caracterizado por el conjunto (rígido) de pares ordenados

$$A = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)), x \in X\} \quad \forall \mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 1, & \text{sii } x \in A \\ 0, & \text{sii } x \notin A \end{cases} \quad (4)$$

2.8 Confluencia de conjuntos difusos y ponderadores exponenciales

Si dos conjuntos \tilde{A} y \tilde{B} representan los objetivos “bonito” y “barato”, el conjunto $\tilde{A} \cap \tilde{B}$ representará el conjunto “bonito y barato”, sea cual sea la t-norma elegida (generalización de los conjuntos rígidos). El conjunto intersección $\tilde{A} \cap \tilde{B}$ es llamado también conjunto difuso de decisión, \tilde{D} , y mapea los elementos del dominio del discurso con su grado de satisfacción simultáneo de ambos objetivos componentes. Así, $\mu_{\tilde{D}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}(x)$. En general, suponiendo que existen n objetivos $\tilde{G}_1, \tilde{G}_2, \dots, \tilde{G}_n$ y m restricciones $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2, \dots, \tilde{C}_m$ puede formarse el conjunto difuso de decisión, \tilde{D} (ECUACIÓN 5 y ECUACIÓN 6), mediante la aplicación de la intersección según una norma triangular t , que representa la confluencia de todos los objetivos y las restricciones (Camargo, 2021a, 2022b, 2022c, 2023d; Camargo et al 2018).

$$\tilde{D} = \tilde{G}_1 \underset{t}{\cap} \tilde{G}_2 \underset{t}{\cap} \tilde{G}_3 \underset{t}{\cap} \dots \underset{t}{\cap} \tilde{G}_n \underset{t}{\cap} \tilde{C}_1 \underset{t}{\cap} \tilde{C}_2 \underset{t}{\cap} \tilde{C}_3 \dots \underset{t}{\cap} \tilde{C}_m \quad (5)$$

$$\mu_{\tilde{D}}(x) = \mu_{\tilde{G}_1} \underset{t}{\cap} \mu_{\tilde{G}_2} \underset{t}{\cap} \dots \underset{t}{\cap} \mu_{\tilde{G}_n} \underset{t}{\cap} \mu_{\tilde{C}_1} \underset{t}{\cap} \mu_{\tilde{C}_2} \underset{t}{\cap} \dots \underset{t}{\cap} \mu_{\tilde{C}_m} \quad (6)$$

Donde el operador se denomina operador de confluencia o t-norma.

Resulta razonable en la mayoría de los casos elegir aquella alternativa x (ECUACIÓN 7) cuyo grado de pertenencia al conjunto difuso de decisión (esto es, el grado de satisfacción simultáneo de objetivos y restricciones) resulte máximo (decisión maximizante) (Zadeh et al., 2014; Liu et al. 2020).

$$S = \{x^* | \mu_{\bar{D}}(x^*) = \text{Max}\{\mu_{\bar{D}}(x)\}_{x \in X}\} \tag{7}$$

Los elementos de tal conjunto son las soluciones óptimas para el proceso de decisión (soluciones más satisfactorias). Para elegir la mejor alternativa mediante una estrategia exhaustiva, se debería realizar lo siguiente. 1) Calcular el valor de pertenencia (ECUACIÓN 8) asociado al conjunto difuso de decisión de cada alternativa posible $x \in X$ utilizando una t-norma elegida previamente. 2) Seleccionar aquella/s alternativa/s cuyo valor de pertenencia al conjunto difuso de decisión sea el valor máximo. En el caso de considerar más evaluadores, se tendría que definir una función $\mu_{\bar{D}}$ en función de las preferencias de cada evaluador. Aunque existen muchas t normas en el estado del arte, se presentan a continuación las que son de interés, donde x e y son funciones de pertenencia genéricas. Una cualidad que es buscada en la presente investigación es que la t norma sea diferenciable, esto es no presente puntos de discontinuidad por lo menos en una región acotada.

$$\mu_m = \begin{cases} 1 \cup 0 & , U_m^{Inf} \geq U_m \\ \left(\frac{U_m^{Sup} - U_m}{U_m^{Sup} - U_m^{Inf}} \right)^{EW_m} \cup \left(\frac{U_m - U_m^{Inf}}{U_m^{Sup} - U_m^{Inf}} \right)^{EW_m} & , U_m^{Inf} \leq U_m \leq U_m^{Sup} \\ 0 \cup 1 & , U_m^{Sup} \leq U_m \end{cases} \tag{8}$$

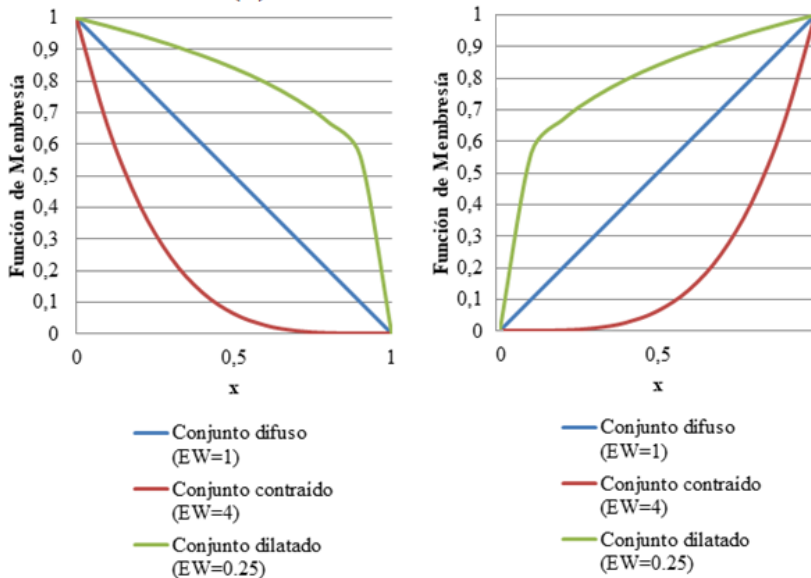


FIGURA 3. Conjuntos difusos con pendiente negativa (a) y positiva (b).
Fuente: elaboración propia.

Los ponderadores exponenciales EW aumentan o disminuyen la importancia de los objetivos contrayendo o dilatando las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos solidarios a cada criterio m . Si se tiene una función difusa lineal, de pendiente positiva o negativa y valores de referencia máximo U_m^{Sup} y mínimo U_m^{Inf} , entonces se tiene la ECUACIÓN 8 (FIGURA 3 (a) y FIGURA 3 (b)). Si $EW > 1$ tal objetivo será más importante en el proceso de decisión, en cambio, si $EW < 1$, será menos importante. Esta expansión y contracción permite al tomador de decisiones tener una mayor sensibilidad o indiferencia ante el estímulo dado, esto es, ante los índices evaluados (Zadeh et al., 2014; Liu et al. 2020; Camargo, 2021a, 2022b; Shahzadi et al., 2020). Los límites de la zona de transición establecen los niveles de aceptación del individuo, mientras mayor sea el intervalo entre ellos, con mayor facilidad se obtendrán mejores niveles de aceptación (de forma similar a la influencia de la escases y disponibilidad en la economía). Una vez que se obtienen los EW, se obtiene la función de aptitud mediante la ECUACIÓN 10, la cual implica que la decisión será tomada en base a un valor que será inferior o igual a la mínima función difusa evaluada. Por lo tanto, los EW son una buena estimación de las preferencias del tomador de decisiones y, con el objetivo de que cumplan los axiomas de la teoría de la decisión (AHP).

2.9 Análisis de Procesos Jerárquicos (AHP) en Modelos difusos

Para aplicar el Análisis de Procesos Jerárquicos (AHP) en Modelos de decisión difusos se trabajan con ponderadores exponenciales EW y las condiciones de consistencia. El proceso requiere que el responsable de la toma de decisiones proporcione evaluaciones subjetivas (a priori) sobre la importancia relativa de cada uno de los atributos (FIGURA 4). Se construye una estructura jerárquica para los criterios de precalificación y los contratistas que desean precalificarse para el modelo (Saaty, 2003; Camargo, 2023d; Liu et al., 2020; Amenta et al., 2021). Los atributos se valoran de forma relativa, es decir, un atributo es tantas veces mayor que el otro (condición de consistencia (1) de la FIGURA 4), según la escala de valores que se haya establecido y se almacenan en la matriz de preferencias (Sección 2.7). Obviamente, si la preferencia de un atributo se compara consigo mismo, será la unidad, por lo que la diagonal de la matriz será la unidad (ver ECUACIÓN 3).

A partir de esta matriz se obtienen los valores propios de Perron y los vectores propios λP_k . Hay consistencia perfecta si estos valores propios λP_k son iguales al orden de la matriz (n). En caso contrario, deben tener al menos ese valor (ver Sección 2.7.). A partir de estos criterios de consistencia, se proponen otros índices de consistencia (condición de consistencia (2) en la FIGURA 4), que aseguran el cumplimiento de los axiomas en la ponderación de los atributos, según la teoría de la decisión (transitividad, completitud, asimetría y simetría de la diferencia). La alteración de esta matriz hace que pierda coherencia (consistencia), con un menor cumplimiento de los axiomas mencionados. Los índices que miden esta consistencia se denominan índices de consistencia. Esta alteración puede hacerse para flexibilizar las preferencias (EW), en caso de que se busque un decisor más laxo, a costa de perder consistencia en su toma de

decisiones. Para más detalles al respecto, las siguientes referencias presentan más información al respecto.

Dado que la matriz de preferencias satisface los axiomas matemáticos del teorema de Perron, se habla de eigenvectores de Perron. Se toma el eigenvector dominante (eigenvector cuyo valor propio es dominante o mayoritariamente positivo), que se normalizan, para no sobrevalorar ni infravalorar los atributos. A partir de ahí, se determinan los pesos exponenciales de las funciones de preferencia, que expanden o contraen los índices difusos. A partir de estos pesos, se puede obtener de nuevo la matriz de preferencias, dividiéndolos $a_{ij} = \frac{EW_i}{EW_j}$, lo cual puede realizarse si la matriz de preferencias tiene una consistencia perfecta.

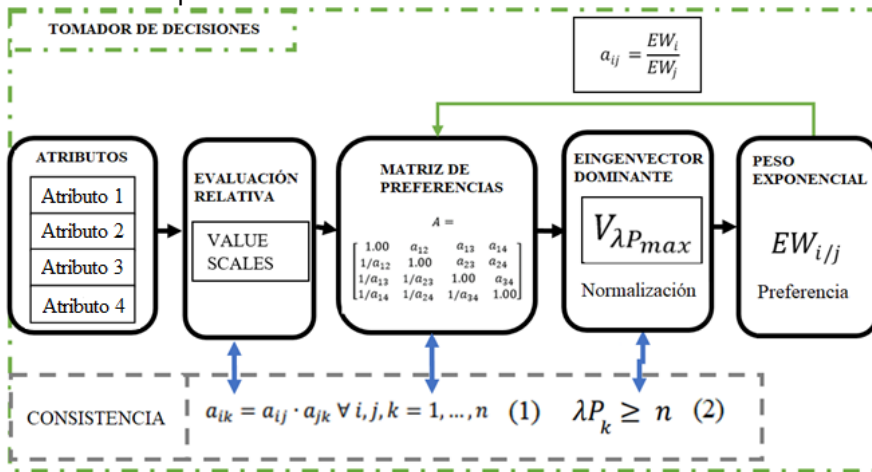


FIGURA 4. EW y Análisis de Procesos Jerárquicos (AHP).
Fuente: elaboración propia.

2.10 Índice de Costo Intrínseco (IC)

El Índice de Costo Intrínseco (IC) corresponde a la derivada de un índice respecto al otro (valoración económica), que no es fácil de determinar debido a la presencia de incertidumbre y subjetividad (Camargo, 2021a, 2022b, 2022c, 2023d, 2019e; Camargo et al 2018; Camargo et al 2019; Camargo and Schweickardt, 2014). El IC es presentado en la ECUACIÓN 9, donde $i = 1$ es el índice a valorar económicamente y $j = 2$ es el Costo de Inversión en la adquisición y mantenimiento de los equipos. Es decir, es el perjuicio o mejora económica marginal ∂U_j por mejorar o empeorar el índice analizado ∂U_i , y en consecuencia, es la multa o subsidio correspondiente.

$$IC_{ji} = \frac{\partial U_j}{\partial U_i} = \frac{\partial U_j}{\partial \mu_j} \cdot \frac{\partial \mu_j}{\partial \mu_i} \cdot \frac{\partial \mu_i}{\partial U_i} \quad \forall \quad \frac{\partial \mu_{i/j}}{\partial U_{i/j}} = \pm \frac{EW_{i/j}}{U_{i/j}^{Sup} - U_{i/j}^{Inf}} \cdot \mu_i^{1 - \frac{1}{EW_{i/j}}} \quad (9)$$

En la ECUACIÓN 11, el término $\frac{\partial \mu_{i/j}}{\partial U_{i/j}}$ (dependiendo de si se trabaja con i o j) es la derivada de la respectiva función de preferencia $\mu_{i/j}$, asociada a su

índice respectivo (i o j). El signo corresponde a la pendiente positiva o negativa (ver ECUACIÓN 10) de la función de preferencia μ_{ij} . En la ECUACIÓN 10 se aplicó la cláusula ‘Ceteris Paribus’ que implica que la operación difusa $tp(\mu_i, \mu_j)$ se mantiene constante (Camargo, 2021a, 2022b, 2022c, 2023d, 2019e), lo cual simplificó enormemente la expresión matemática del IC, incrementando su aplicabilidad y versatilidad.

$$\frac{\partial \mu_j}{\partial \mu_i} = - \left(\frac{\mu_j}{\mu_i} \right) \cdot \left(\frac{\mu_j - 2}{\mu_i - 2} \right) \quad \forall \quad t_{pe}(\mu_i, \mu_j) = \frac{\mu_i \cdot \mu_j}{2 - (\mu_i + \mu_j - \mu_i \cdot \mu_j)} \quad (10)$$

$$IC_{ij} = IC_{ij} = \begin{matrix} \pm & \left(\frac{EW_i}{EW_j} \right) & \cdot & \left(\frac{U_j^U - U_j^L}{U_i^U - U_i^L} \right) & \cdot & \frac{\partial \mu_j}{\partial \mu_i} \\ \downarrow & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ sign & a_{ij} & & b_{ij} & & c_{ij} \end{matrix} \quad (11)$$

De la ECUACIÓN 10 y la ECUACIÓN 11, si ambos atributos (i y j) deben maximizarse o minimizarse, entonces el IC tendrá signo positivo (-), en cualquier otro caso será negativo (+). Donde a_{ij} representa los componentes de la matriz de preferencias obtenidos a partir de los pesos exponenciales (preferencias). El término b_{ij} es el costo incremental de un atributo j respecto a otro de interés i. El término c_{ij} está asociado a la influencia de la aceptación de los atributos, las preferencias de los decisores y corresponde a la derivada de la función difusa $\partial \mu_j$ respecto a la función difusa $\partial \mu_i$ que está asociada a la t norma correspondiente (producto de Einstein, que es derivable y produce buenos resultados en problemas multiobjetivos). b_{ij} determina la valoración objetiva (costo incremental) del atributo j, mientras que a_{ij} , c_{ij} determinan la valoración subjetiva. Esto es según el AHP, por lo tanto, la valoración del costo intrínseco depende de la jerarquía establecida realizada (valoración subjetiva) y de los límites establecidos (valoración objetiva). Si las condiciones de la ECUACIÓN 12 se cumplen en forma separada o simultáneamente, entonces el IC_{ij} tenderá a un valor muy grande en valor absoluto. Esto implica una valoración muy alta del atributo i respecto a j y una penalización (o subsidio) excesiva.

$$(a_{ij} \gg 1) \cup (b_{ij} \gg 1) \cup (c_{ij} \gg 1) \Rightarrow |IC| = \infty \quad (12)$$

Adicionalmente, si se cumple las condiciones de la ECUACIÓN 13, entonces se obtendrá un valor constante independiente de los índices evaluados. Si se considera también que los límites inferiores son nulos, el IC (costo marginal) será igual al costo medio de los límites superiores. El IC puede aplicarse como indicador económico para evaluar atributos no monetizables y como mecanismo regulador. Asociado al teorema de Coase y a los derechos de propiedad, es el precio al que deben negociar las partes implicadas (proveedor del servicio y usuarios) en función de la externalidad producida. Al tratarse de una externalidad negativa es un impuesto (penalización) que debe pagar el proveedor del servicio energético. En caso contrario, entonces se trata de un subsidio por buena calidad de servicio.

$$(a_{ij} = b_{ij} = 1) \cap (U_j^{Inf} = U_i^{Inf} = 0) \Rightarrow |IC_{ij}| = \frac{U_j^{Sup}}{U_i^{Sup}} \quad (13)$$

3. CONSIDERACIONES FINALES

En la Sección 2 se presentan conceptos básicos de la economía: ley de oferta y demanda, competencia, teoría del valor, modelos económicos y regulación y se introduce el concepto de impuesto pigouviano (subsidio o peaje). Este impuesto (o subsidio) está asociado a la compensación (o premio) económica óptima que debe realizarse por no (si) cumplir de forma óptima los criterios de calidad establecidos. A partir de las limitaciones en los modelos económicos se introduce la teoría de las decisiones, el concepto de incertidumbre y de esa forma, se presenta la teoría de la decisión difusa. Esto es propiciado por las limitaciones de los modelos económicos, debido a la inaplicabilidad de las leyes de oferta y demanda a índices que no tienen un mercado asociado por el desconocimiento del valor económico que tiene el criterio de calidad analizado y cómo debe ser aplicada dicha penalización o compensación. Se observa que los individuos participantes en el proceso de decisión buscan maximizar su utilidad (función de aptitud), ponderando los criterios de decisión (preferencias asociadas), esto es teniendo en cuenta su nivel de aceptación al mismo. Mediante la teoría de la decisión difusa, se engloban los conceptos económicos vistos de disponibilidad y escasos (nivel de aceptación dados los límites máximos y mínimos), utilidad (valoración por preferencias) mediante el uso de funciones de aptitud asociadas funciones difusas. Los axiomas lógicos relacionados a la teoría de decisiones se expresaron mediante la matriz de prioridades, con las cuales se obtienen los ponderadores exponenciales a partir de los autovalores y autovectores de Perron mediante el Análisis de Procesos Jerárquicos (AHP).

La teoría y práctica económica no define claramente el mecanismo para determinar la compensación. Entonces, resulta difícil la valoración económica de múltiples atributos en entornos de incertidumbre, subjetividad en las preferencias de atributos, presencia de externalidades y desigualdades sociales, según las teorías económicas y técnicas de programación matemáticas. Existen vacíos teóricos y metodológicos respecto a las herramientas y criterios a utilizar para obtener dicha penalización. Por lo tanto, se recurre a la teoría de decisión difusa y se introduce un concepto de la presente investigación: el valor intrínseco del costo asociado a una variable dada o Costo Intrínseco. De esta forma, la presente línea de investigación realiza diversos aportes en problemas relacionados a los sistemas de potencia, tales como el balance de fases y la confiabilidad, aprovechando el uso de la teoría de la decisión difusa y técnicas de inteligencia artificial.

Se define un método de incentivos basado en índices no monetizables (con un costo económico equivalente) de forma directa y se analizan las siguientes ventajas. 1) Existe flexibilidad y versatilidad de aplicación, incorporando diversos aspectos teóricos y prácticos de las teorías económicas y decisión: valoración objetiva y subjetiva, consideración de las preferencias del tomador de decisiones (individuo, agente, etc.), nivel de aceptación (utilidad) e inclusión de límites (disponibilidad y escasos). 2) Se incorpora la incertidumbre fundamental, la cual radica en el desconocimiento del costo económico asociado a índices no monetizables en forma directa, que no tienen un mercado asociado. 3) Se observa la relación entre las preferencias, los ponderadores exponenciales.

el AHP y la consistencia de la matriz de preferencia. 4) La expresión del IC es relativamente simple de calcular y se puede aplicar antes de realizar una optimización del problema, obteniendo de esta forma una estimación de los costos o beneficios asociados. Es decir, es el perjuicio o mejora económica marginal ∂U_j por mejorar o empeorar el índice analizado ∂U_i , y en consecuencia, es la multa o subsidio correspondiente. Se observó que esta expresión es matemáticamente coherente e incluye las tres ventajas mencionadas anteriormente.

Por lo tanto, el IC puede usarse para evaluar atributos no monetizables y como mecanismo regulador. Asociado al teorema de Coase y a los derechos de propiedad, es el precio negociado por las partes implicadas (proveedor del servicio y usuarios) en función de la externalidad producida. Al tratarse de una externalidad negativa (signo negativo), es un impuesto (penalización) que debe pagar el proveedor del servicio energético. En caso contrario, si el IC tiene signo positivo, entonces se trata de un subsidio por buena calidad de servicio. Como continuidad del presente artículo, en un próximo trabajo de investigación se presentará y aplicará el procedimiento desarrollado a problemas de optimización de sistemas energéticos para maximizar la rentabilidad energética, económica y potencia instalada y minimizar las emisiones de CO_2 y se evaluarán económicamente los índices asociados a valores no económicos.

4. REFERENCIAS

Amenta, P., Lucadamo, A., & Marcarelli, G. (2021). On the choice of weights for aggregating judgments in non-negotiable AHP group decision making. *European Journal of Operational Research*, 288(1), 294-301. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.05.048>

Aydin, C., & Esen, Ö. (2018). Reducing CO2 emissions in the EU member states: Do environmental taxes work? *Journal of Environmental Planning and Management*, 61(13), 2396-2420.

Camargo, F. G. (2021a). Survey and calculation of the energy potential and solar, wind and biomass EROI: application to a case study in Argentina. *DYNA*, 88(219), 50-58. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n219.95569>

Camargo, F. G. (2022b). Dynamic Modeling of The Energy Returned on Invested. *DYNA*, 89(221), 50-59.

Camargo, F. G. (2022c). Fuzzy multi-objective optimization of the energy transition towards renewable energies with a mixed methodology. *Production*, 32, e20210132. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20210132>

Camargo, F. G. (2023d). A hybrid novel method to economically evaluate the carbon dioxide emissions in the productive chain of Argentina. *Production*, 33, e20210132. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20220053>

Camargo, F. G. (2019e). Metodología regulatoria para propiciar la eficiencia energética desde el lado de la oferta en sistemas de distribución de energía eléctrica, 32, 1-330. Fundación Suyay. Recovered from <http://hdl.handle.net/20.500.12272/7010>

Camargo, F. G., Casanova Pietroboni, C. A., Pérez, E., & Schweickardt, G. A. (2019). Metodología regulatoria para propiciar la eficiencia energética desde

el lado de la oferta con penetración de fuentes primarias de energías renovables. Parte 1: Descripción y alcance del modelo de optimización. Recovered from <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/5349>.

Camargo, F. G., & Schweickardt, G. A. (2014). Estimación de la tasa de retorno energético: Análisis comparativo de las metodologías disponibles en la actualidad. <https://publicaciones.uca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/575>

Camargo, F. G., Schweickardt, G. A., & Casanova, C. A. (2018). Maps of Intrinsic Cost (IC) in reliability problems of medium voltage power distribution systems through a Fuzzy multi-objective model. *Dyna*, 85(204), 334-343. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.65836>

Cavallaro, F., Danielis, R., Nocera, S., & Rotaris, L. (2018). Should BEVs be subsidized or taxed? A European perspective based on the economic value of CO2 emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 64, 70-89. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.017>

Hao, Y., Tian, C., & Wu, C. (2020). Modelling of carbon price in two real carbon trading markets. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118556. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118556>

Ichihashi, S. (2021). The economics of data externalities. *Journal of Economic Theory*, 196, 105316.

Jeanne, O., & Korinek, A. (2019). Managing credit booms and busts: A Pigouvian taxation approach. *Journal of Monetary Economics*, 107, 2-17. <https://doi.org/10.1016/j.jmoneco.2018.12.005>

Liu, Y., Eckert, C. M., & Earl, C. (2020). A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. *Expert Systems with Applications*, 161, 113738. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113738>

Maamoun, N. (2019). The Kyoto protocol: Empirical evidence of a hidden success. *Journal of Environmental Economics and Management*, 95, 227-256. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2019.04.001>

Miyamoto, M., & Takeuchi, K. (2019). Climate agreement and technology diffusion: Impact of the Kyoto Protocol on international patent applications for renewable energy technologies. *Energy policy*, 129, 1331-1338. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.053>

Pradhan, B. K., & Ghosh, J. (2022). A computable general equilibrium (CGE) assessment of technological progress and carbon pricing in India's green energy transition via furthering its renewable capacity. *Energy Economics*, 106, 105788. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105788>

Robson, E. N., Wijayarathna, K. P., & Dixit, V. V. (2018). A review of computable general equilibrium models for transport and their applications in appraisal. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 116, 31-53. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.06.003>

Saaty, T. L. (2003). Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. *European journal of operational research*, 145(1), 85-91. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00227-8)

Shahzadi, G., Akram, M., & Al-Kenani, A. N. (2020). Decision-making approach under Pythagorean fuzzy Yager weighted operators. *Mathematics*, 8(1), 70. <https://doi.org/10.3390/math8010070>

Silajdzic, S., & Mehic, E. (2018). Do environmental taxes pay off? The impact of energy and transport taxes on CO2 emissions in transition economies. *South East European Journal of Economics and Business*, 13(2), 126-143. <https://doi.org/10.2478/jeb-2018-0016>

Simshauser, P. (2018). Price discrimination and the modes of failure in deregulated retail electricity markets. *Energy Economics*, 75, 54-70. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.08.007>

Zadeh, Lotfi A.; FU, King- Zhang; Tanaka, Kokichi (ed.). (2014). *Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes: Proceedings of the us-japan seminar on fuzzy sets and their applications, held at the university of california, berkeley, california, July 1-4, 1974*. Academic press.

Zhang, J., & Zhang, Y. (2018). Carbon tax, tourism CO2 emissions and economic welfare. *Annals of Tourism Research*, 69, 18-30. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2017.12.009>