

Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção

ANÁLISIS MULTI-CRITERIO SOBRE LA VALORACIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE ITAIPU EN EL MERCADO ELÉCTRICO BRASILEÑO

Félix Fernández¹

Raúl Amarilla²

Gerardo Blanco³

Victorio Oxilia⁴

RESUMEN: La Hidroeléctrica Itaipu Binacional aprovecha uno de los recursos que posee Paraguay en condominio con Brasil para producir energía. Dicha central satisface casi totalmente la demanda de electricidad del Paraguay, existiendo incluso excedentes de energía que, bajo lo reglado en el Tratado, son cedidos al país condómino. En el Paraguay, últimamente se ha generado un debate sobre el uso de dicho excedente. Una de las alternativas es la venta de dicha energía en el mercado brasileño. Un insumo para dicha estrategia es la valoración de la energía de Itaipu. Sin embargo, actualmente no existe una valoración. La valoración existente es la tarifa de Itaipu y la compensación por cesión de energía. Para el desarrollo del enfoque se utiliza el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), éste se aplica para la toma de decisión multi-criterio y para la valoración de activos. El objetivo es estimar el valor de la energía de Itaipu. Los atributos del AHP -i.e. aspectos técnicos, económicos y ambientales- son priorizados con dicha técnica. Finalmente, las alternativas son valoradas mediante un *benchmarking* con las centrales brasileñas, cuyo valor estimado da como resultado 102,7 USD/MWh. Posteriormente, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad, para comprobar la robustez de los resultados

Palabras-clave: AHP. Centrales Eléctricas. Energía. Valoración multi-criterio.

1 INTRODUCCIÓN

La integración económica mundial de las últimas décadas ha sido principalmente basada en la creación de mercados comunes, en las que los países puedan comercializar sus bienes sin fronteras. Del mismo modo, la liberalización de los mercados energéticos ha tenido lugar

¹ Facultad Politécnica de la UNA, Paraguay, ffernandez@pol.una.py

² Facultad Politécnica de la UNA, Paraguay, ramarilla@pol.una.py

³ Facultad Politécnica de la UNA, Paraguay, gblanco@pol.una.py

⁴ Facultad Politécnica de la UNA, Paraguay, voxilia@pol.una.py

prácticamente al mismo tiempo, en busca de la creación de un Mercado Integrado de Electricidad.

Por su parte, el sector de la energía en el Paraguay se diferencia particularmente de otros países, debido a la capacidad existente de energía hidroeléctrica. Esta energía renovable, acompañada de una planificación de desarrollo sostenible, podría ser la piedra angular de una política energética que impulse la economía del país. Por lo tanto, se puede decir que el Paraguay, debe aprovechar el alto nivel de energía hidroeléctrica disponible, mediante el fomento del uso de la energía eléctrica, o en su defecto, comercializarla a terceros países, buscando incrementar los beneficios económicos para el país.

En este sentido, últimamente se ha creado una gran discusión en el Paraguay, sobre el uso de los excedentes de energía de la Central Itaipu Binacional, así como su posible comercialización en terceros mercados eléctricos, y el valor de la mencionada energía. Así, los diferentes análisis en este tipo de debates se han caracterizado por el conflicto de intereses existentes, sean estos, económicos, técnicos, ambientales, etc. Por lo tanto, en la búsqueda por mejorar los niveles de eficiencia, exige examinar metodologías de apoyo para la valoración de la energía, más aun, donde intervienen múltiples criterios de decisión.

Por otro lado, la percepción general de la sociedad paraguaya es clara y uniforme, en el sentido de que los negociadores deben tomar las decisiones que reditúen los mayores beneficios para el país. Los modelos de toma de decisión deben ser debidamente asimilados por los negociadores y sus asesores, así como también divulgados entre los diferentes sectores de la economía y la política paraguaya, de manera a centrar el debate en torno a criterios analíticos. Para el análisis apropiado de problemas de este tipo, se han desarrollado en las últimas décadas un gran número de métodos de valoración multi-criterio, todos ellos de gran importancia de aplicación en la práctica. En este sentido, quizás uno de los métodos más difundidos sea el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, del inglés *Analytic Hierarchy Process*), el cual se conoce como una metodología estructurada para el tratamiento de decisiones complejas desarrollada por el matemático Thomas Saaty. Uno de los aspectos más relevantes del modelo consiste en la estructuración de la jerarquía del problema de forma visual. El fundamento de la propuesta de Saaty se basa en la posibilidad de asignar valores numéricos a los juicios dados por los tomadores de decisión, mediante el cual se puede medir cómo contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del cual se desprende. Actualmente, la metodología multi-criterio del AHP es también utilizada en el proceso de estimación de un valor, en la valoración de bienes o activos financieros, en la

valoración de riesgos de un proyecto (Jiménez L. y Cuesta C., 1998), en la tasación de deportistas y en la valoración económica de activos ambientales (Ospina M., 2012). En dicho contexto, los diversos análisis realizados sobre la valoración de la energía eléctrica de Itaipu han generado en los últimos años mucha incertidumbre. Debido a los diferentes aspectos involucrados, establecer una idea clara acerca de qué es lo que se pretende y que además, reditue los mayores beneficios para el país, no es una tarea trivial. Por lo tanto, la toma de decisiones multi-criterio para la valoración de la energía de Itaipu, es un aspecto clave que debe ser considerado para el análisis de este tipo de problemas.

En este trabajo se tomará como caso de estudio diversas alternativas de centrales de generación de energía eléctrica, sean éstas centrales térmicas o hidroeléctricas. Dichas alternativas serán estudiadas bajo múltiples criterios de evaluación, tales como: impacto ambiental, factor de planta, flexibilidad operativa, confiabilidad y potencia instalada. Con dichas consideraciones, se pretende brindar a los tomadores de decisiones una herramienta de valoración para tener un soporte analítico en sus estrategias de negociación, y de esta manera tomar una decisión fundamentada que produzca los mayores beneficios y ayude a encontrar una hoja de ruta para el desarrollo sostenible del Paraguay.

2 ANALYTIC HIERACHY PROCESS (AHP – Processo Analítico jerárquico)

La metodología del AHP fue desarrollado durante los años setenta por Thomas Saaty, buscando el desarrollo de una herramienta sistemática para la determinación de un ranking de alternativas que tenga un fundamento matemático sólido y que sea simple en su aplicación (Saaty T. L., 1994).

2.1 Estructuración del proceso de valoración con el AHP

El AHP ayuda a determinar escalas relativas utilizando una ponderación o datos de una escala estandarizada, realizando la operación aritmética posterior en tales escalas. Por lo tanto, las ponderaciones se dan en forma de comparaciones por pares.

Si asumimos que existen n criterios, cuyos pesos w_1, w_2, \dots, w_n son respectivamente conocidos. En el proceso se determina una matriz de relación por pares, cuyas filas dan las relaciones de pesos de cada criterio con respecto a todos los demás. Entonces, tenemos la siguiente ecuación matricial (Ec. 1), mostrada a continuación:

$$\begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n * w \quad (1)$$

Si se define A , como la matriz de relación de pares normalizada de la ecuación anterior, entonces n es un valor propio de A , y a continuación, W es el vector propio asociado a él. Por lo tanto, para hacer W único, normalizamos sus entradas dividiendo por su suma. A es considerada consistente cuando cumple la siguiente condición (Ec. 2):

$$a_{jk} = a_{ik} / a_{ij}, i, j, k = 1, \dots, n \quad (2)$$

Por lo tanto, primeramente es necesario establecer los criterios a ser evaluados y las alternativas a ser consideradas como comparables en el proceso de valoración. Esta distribución puede tener tantos niveles como sea necesario, en el nivel superior se encuentra el objetivo principal a lograr, en los niveles intermedios los criterios de evaluación, y en los niveles inferiores las alternativas a ser consideradas como comparables (De Las Nieves G., 2003). El segundo paso consiste en la ponderación obtenida de la comparación por pares. Los elementos del segundo nivel están dispuestos en una matriz y las ponderaciones (de los criterios) son realizadas con relación al objetivo principal. Por lo general, la metodología utiliza una escala de ponderación con valores de 1 al 9, como se describe en (Saaty T. L., 1994).

En la Ec.1 se puede observar la matriz de comparaciones por pares de los criterios obtenidos a partir de las ponderaciones de los tomadores de decisión, además del vector resultante de las ponderaciones. Dicho vector se estima a través del autovector de la matriz.

Posteriormente, en el tercer paso se realiza la comparación por pares de los elementos en el nivel más bajo, es decir, las alternativas son comparadas por pares con respecto a cada criterio de evaluación. En esta parte del proceso, se evalúan las ponderaciones de cada alternativa con respecto a cada criterio, según (Vargas R. V. y IPMA-B P. M. P., 2010). Luego, se multiplica la matriz resultante de la ponderación de cada criterio por el vector resultante de la ponderación de cada alternativa en función de cada criterio, y este producto nos da como resultado un vector columna que representa la ponderación global de las distintas alternativas en función de todos los criterios. Finalmente, conocida esta última ponderación global y el valor de las alternativas que fueron consideradas comparables, se calcula un ratio entre la suma de ambos valores, dicho ratio se multiplica por la ponderación de la alternativa evaluada y así, se determina el valor de la alternativa considerada como objetivo principal del proceso de valoración.

3 PROPUESTA DE VALORACIÓN DE LA ENERGÍA ITAIPU EN EL MERCADO ELÉCTRICO BRASILEÑO

3.1 Aplicaciones del AHP en las diferentes áreas

Los métodos de análisis de decisión multi-criterio se han aplicado en varias áreas, una de ellas es la planificación energética, por ejemplo, en la planificación de energías renovables (Ramanathan R. y Ganesh L.S., 1995), en la asignación de recursos de energía (Hobbs B.F. y Horn G.T., 1997), y en la planificación de servicios eléctricos (Rahman S. y Frair L.C., 1984). Asimismo, este enfoque ha sido utilizado en los últimos años para la clasificación de las diversas tecnologías de producción de electricidad (Stein E. W., 2013), así como en la clasificación estratégica de un plan integral óptimo de los recursos (Ren, J. y Sovacool B. K., 2015). Además, se ha aplicado como un enfoque para evaluar la seguridad energética de los países que son dependientes de los combustibles fósiles (Ahmad S. y Tahar R. M., 2014). Por lo tanto, se puede notar desde el estado del arte, que la técnica del AHP quizás es el método más popular para ponderar y tomar decisiones en los procesos de valoración de las alternativas evaluadas. Esto puede ser debido a la capacidad de convertir un problema complejo en una jerarquía simple y flexible, con la capacidad de realizar ponderaciones tanto cualitativas como cuantitativas con el mismo enfoque de valoración (Amarilla; Ojeda; García; Blanco, 2014).

3.2 Criterios de Evaluación y sus indicadores

Las alternativas antes mencionadas son evaluadas en función de varios criterios, tales como: Impacto Ambiental, Factor de Planta, Potencia Instalada, Flexibilidad Operativa y Confiabilidad. Se puede observar en la Fig. 1, la jerarquía de la decisión empleada en el proceso de valoración de la energía eléctrica de la Central Hidroeléctrica Itaipu Binacional, realizando un benchmarking con las Usinas Hidroeléctricas y Usinas Termoeléctricas del mercado eléctrico brasileño. A continuación se describen los criterios mencionados.

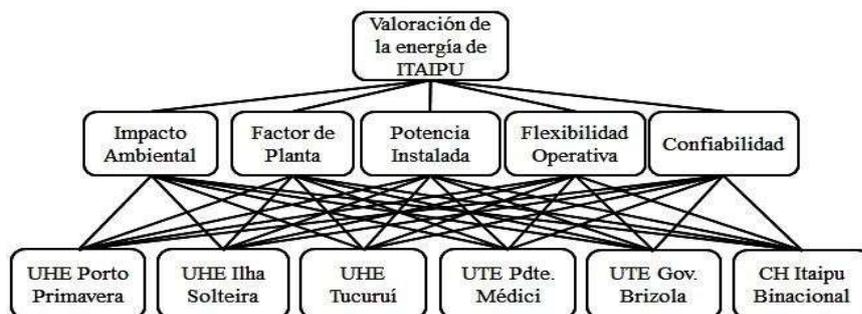


Fig. 1. Árbol Jerárquico de decisión

Impacto ambiental (C1): el indicador considerado es la emisión de gases de efecto invernadero (CO₂) de cada central eléctrica, este indicador ha sido ponderado considerando los rangos de emisiones de CO₂ según (Koch F. H., 2001). Además, se ha considerado el tamaño del embalse de cada central hidroeléctrica⁵. Finalmente, estos datos son procesados y normalizados para hallar el vector propio de este criterio

Factor de planta (C2): el indicador de este criterio muestra la capacidad de utilización de una central eléctrica en el tiempo. El cálculo del factor de planta está dado por la siguiente ecuación (Ec. 3):

$$Fp = Pot_{MedGen} / Pot_{Inst} \quad (3)$$

Donde Fp es el factor de planta, Pot_{MedGen} es la potencia media generada anual y Pot_{Inst} es la potencia instalada de cada central eléctrica. Para el cálculo de este criterio, fueron necesarios datos de generación de energía de las centrales⁶. Además, se ha considerado la potencia instalada de las centrales⁷. Finalmente, estos resultados son normalizados de manera a determinar el vector propio (peso ponderado) de este criterio.

⁵ Datos técnicos de la UTE Presidente Médici (on line). Disponible en: <http://tinyurl.com/gnyz6ve>
 Datos técnicos de la UHE Porto Primavera (on line). Disponible en: <http://tinyurl.com/hy76mk4>
 Datos técnicos de la UHE Ilha Solteira (on line). Disponible en: <http://tinyurl.com/z78q7du>
 Datos técnicos de la UHE Tucuruí (on line). Disponible en: <http://tinyurl.com/grnuwpk>
 Datos técnicos de la UTE Governador Brizola (on line). Disponible en: <http://tinyurl.com/gsey9x9>
 Datos técnicos de la CH Itaipu Binacional (on line). Disponible en: <http://tinyurl.com/z5dat7r>

⁶ Rafael Santos Rocha. "Ferramenta para Avaliação da Energia Firme Baseada em Técnica de Pontos Interiores", p. 45-47.

Eletronorte em Números 2010. Eletrobrás. Ministério de Minas e Energia.

Relatório de Administração e Demonstrações Financeiras 2012.

Plano da Operação elétrica 2014/2015. PEL 2013. Relatório Executivo.

⁷ Datos técnicos de la UTE Presidente Médici. Disponible en: <http://tinyurl.com/gnyz6ve>
 Datos técnicos de la UHE Porto Primavera. Disponible en: <http://tinyurl.com/hy76mk4>
 Datos técnicos de la UHE Ilha Solteira. Disponible en: <http://tinyurl.com/z78q7du>
 Datos técnicos de la UHE Tucuruí. Disponible en: <http://tinyurl.com/grnuwpk>
 Datos técnicos de la UTE Governador Brizola. Disponible en: <http://tinyurl.com/gsey9x9> Datos técnicos de la CH Itaipu Binacional. Disponible en: <http://tinyurl.com/z5dat7r>

Flexibilidad operativa (C3): el indicador de este criterio revela la capacidad que posee cada central eléctrica en responder inmediatamente ante las fluctuaciones de la demanda de electricidad. Primeramente, cabe destacar que la metodología del AHP nos permite introducir variables cualitativas y cuantitativas que otros métodos no permiten. Así, las variables cualitativas pasan a ser cuantitativas debido a que son cuantificadas a través de sus vectores propios. Para este criterio, la ponderación fue realizada en forma cualitativa, a través de juzgamientos de expertos en el área de energía, considerando válida sus experiencias en las ponderaciones efectuadas. Por lo tanto, para la realización de estas ponderaciones se ha tenido en cuenta las siguientes consideraciones: una planta de generación a gas natural ofrece flexibilidades operativas con un rápido arranque (Arango; Sánchez F.; Sánchez G., 2015), como es el caso de la UTE Gobernador Brizola. Por otro lado, para las centrales a carbón, como es el caso de la UTE Presidente Médici, la flexibilidad operativa se ve relativamente reducida debido a los procesos químicos de la desulfuración y desnitrificación (Josa A. C., 2012). Asimismo, las centrales hidroeléctricas con embalses ofrecen flexibilidad operativa (pero más reducida), ante las fluctuaciones de la demanda. Con estas consideraciones, se han realizado las ponderaciones correspondientes, que finalmente se traduce en un ranking de las alternativas con respecto a este criterio.

Confiabilidad (C4): Este indicador corresponde a la disponibilidad de una unidad generadora o de una central eléctrica, se refiere a la fracción de tiempo en la que es capaz de proveer servicio. La ponderación cualitativa de este criterio fue basada en el conocimiento y experiencia de expertos en el área de la energía eléctrica. Además, dicha ponderación fue realizada teniendo en cuenta la Tasa de Salida Forzada (FOR, Forced Outage Rate, por sus siglas en inglés), dicha tasa se refiere al porcentaje de tiempo de funcionamiento programado en que una unidad está fuera de servicio debido a problemas inesperados o fallas (G. Michael Curley, 2013)⁸. Por lo tanto, las alternativas fueron comparadas bajo ésta condición, además de considerar el número de unidades generadoras en operación de cada central⁸, al momento de efectuar las respectivas ponderaciones.

⁸ Datos técnicos de la UTE Presidente Médici. Disponible en: <http://tinyurl.com/gnyz6ve>

Datos técnicos de la UHE Porto Primavera. Disponible en: <http://tinyurl.com/hy76mk4>

Datos técnicos de la UHE Ilha Solteira. Disponible en: <http://tinyurl.com/z78q7du>

Datos técnicos de la UHE Tucuruí. Disponible en: <http://tinyurl.com/grnuwvk>

Datos técnicos de la UTE Gobernador Brizola. Disponible en: <http://tinyurl.com/gsey9x9> Datos técnicos de la CH Itaipu Binacional. Disponible en: <http://tinyurl.com/z5dat7r>

Potencia instalada (C5): Este indicador representa a la capacidad máxima de generación de energía eléctrica, se refiere a la capacidad de energía que puede generar una central eléctrica en condiciones ideales.

Para el análisis de este criterio de evaluación, fueron utilizados los datos de potencia instalada de cada central, que fueron mencionadas anteriormente. Esta información fue procesada para su normalización y así, posteriormente hallar el vector propio correspondiente.

3.3 Alternativas analizadas

Las alternativas consideradas comparables fueron observadas en la Fig. 1, dichas alternativas son Usinas tanto Hidroeléctricas como Termoeléctricas que se encuentran en operación en el mercado eléctrico brasileño. Las mismas fueron seleccionadas de acuerdo a su importancia en la operación del sistema interconectado brasileño. Las alternativas analizadas son las siguientes centrales: UHE Porto Primavera (A1), UHE Ilha Solteira (A2), UHE Tucuruí (A3), UTE Presidente Médici (A4), UTE Governador Brizola (A5), y por último, la alternativa analizada como objeto de valoración es la CH Itaipu Binacional (A6).

4 CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS

4.1 Análisis y resultados de los criterios de evaluación

Este trabajo analiza un caso de estudio que supone las alternativas mencionadas anteriormente. Inicialmente, se realizó la ponderación de los criterios de evaluación. Para esta parte del proceso de valoración, las comparaciones por pares fueron consideradas equilibradas con relación al objetivo principal (ponderaciones de 1), que para el caso de estudio es la “Valoración de la energía de Itaipu en el mercado eléctrico brasileño”, lo cual implica que cada criterio afecta de igual manera al cumplimiento del objetivo global. El resultado de dicha comparación nos determina la matriz de ponderación de todos los criterios en función al objetivo (ver Apéndice A).

Con el objetivo de interpretar y proporcionar la ponderación relativa a cada criterio, es necesario realizar la normalización de la matriz de comparación por pares. El valor de cada criterio es determinado mediante cálculos del vector propio. Dicho vector nos brinda la ponderación relativa entre cada criterio, que se ha obtenido mediante el cálculo de la media aritmética de dichos criterios. Es así como se normaliza la matriz de comparación por pares,

es decir, se realiza dividiendo cada elemento de la matriz por el valor total de la suma de la columna de la matriz.

4.2 Análisis y resultados de las alternativas analizadas

En esta parte del proceso de valoración, se realiza la comparación por pares de las alternativas analizadas en función de cada uno de los criterios de evaluación considerados.

Como fue mencionado, existen criterios que son considerados cuantitativos y cualitativos. Cabe destacar que para este caso de estudio son considerados cuantitativos los siguientes criterios: Factor de Planta y Potencia Instalada. Por otro lado, los criterios considerados cualitativos son los siguientes: Impacto Ambiental, Flexibilidad Operativa y Confiabilidad. Por lo tanto, la ventaja comparativa que ofrece este método es la introducción de ambas variables, lo que no es tan trivial conseguirlo con otros métodos. Como se ha señalado, las ponderaciones cualitativas pasan a ser cuantitativas porque son cuantificadas a través del vector propio de cada matriz de comparación por pares. Por el contrario, cuando han sido evaluados los criterios cuantitativos se procedió a realizar la normalización por la suma, de manera a obtener el vector propio de cada criterio.

Al final de este análisis, se ha obtenido la ponderación de las centrales eléctricas en función de cada uno de los criterios, así, los resultados de las ponderaciones de las centrales eléctricas se muestran en el Apéndice B, con respecto a las emisiones de CO₂ para el criterio Impacto Ambiental (C1). Cabe destacar que para las ponderaciones consideradas cualitativas se han analizado sus consistencias, según (Amarilla; Ojeda; García; Blanco, 2014). En el Apéndice C, se muestran los resultados de los pesos obtenidos para las centrales eléctricas respecto al criterio Factor de Planta (C2); en el Apéndice D, se muestran los pesos correspondientes a las ponderaciones de las centrales eléctricas con respecto al criterio Flexibilidad Operativa (C3); en el Apéndice E, se exponen los resultados de los pesos correspondientes a las ponderaciones de las centrales eléctricas con respecto al criterio Confiabilidad (C4); y finalmente, en el Apéndice F, se muestran los resultados de los pesos obtenidos para el criterio Potencia Instalada (C5). Por último, los resultados de los pesos previos obtenidos son agrupados para conformar la matriz de ponderaciones de las alternativas respecto a cada uno de los criterios.

Este resultado puede observarse en el Apéndice G.

4.3 Análisis y resultados de la valoración de la energía de la CH Itaipu (A6)

Para el proceso de valoración, ya es conocida la ponderación de las alternativas consideradas comparables. Asimismo, los valores de los precios de venta de energía de las centrales eléctricas brasileñas consideradas comparables son observables⁹, a través de las publicaciones mensuales de la Cámara de Comercialización de Energía Eléctrica, con datos consolidados de los resultados de las subastas de electricidad. Posteriormente, se procedió a sumar dichos valores (la ponderación y el precio de energía), para luego calcular el ratio entre ellos. Finalmente, el valor de la energía de Itaipu en el mercado brasileño se determina a través del producto entre el ratio obtenido y la ponderación global que se había determinado con anterioridad para la alternativa de la CH Itaipu Binacional. Este proceso de valoración se detalla en el Apéndice H. Por lo tanto, considerando la tasa de cambio actual del Paraguay, además de todos los criterios de evaluación y la realización del *benchmarking* con las centrales eléctricas brasileñas, el valor estimado de la energía de la Central Itaipu según el precio de energía del mercado eléctrico brasileño sería de 102,7 USD/MWh.

5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Este análisis se lleva a cabo con el fin de examinar el grado de sensibilidad del resultado obtenido al variar el peso de un determinado criterio o dos. El análisis de sensibilidad consiste en variar los pesos de los criterios y evaluar qué alternativas se obtienen bajo los distintos escenarios. En el Apéndice I, se observan cuáles son las mejores alternativas para cada análisis, siendo la diagonal principal las priorizaciones respectivas con respecto a la variación de un solo criterio, y los demás componentes representan el resultado de las mejores alternativas tomando en cuenta la variación de dos criterios. En dicho apéndice se puede observar que la alternativa que se obtiene con mayor frecuencia es la alternativa 6, lo cual demuestra que bajo la mayor cantidad de escenarios posibles la mejor alternativa no varía con respecto al análisis inicial, donde fue considerado que ningún criterio es más importante que otro criterio de evaluación.

6 CONCLUSIONES

La producción de energía a través de la Central Hidroeléctrica de Itaipu, es uno de los recursos más importantes que posee el Paraguay y, por lo tanto, debería ser valorada adecuadamente. El impacto que tendría una valoración adecuada de la energía de Itaipu

⁹ Câmara de Comercialização de Energia. Disponible en: <http://tinyurl.com/j3c4y6w>

podría afectar positivamente en diferentes áreas, debido a que esto se traduciría en un aumento de empleos, mejor educación y mayor inversión en salud.

Bajo este contexto, la valoración de la energía de dicha central podría tornarse en una tarea compleja debido a los diferentes criterios de evaluación existentes. En ese sentido, este trabajo presenta al AHP como una herramienta de valoración multi-criterio adecuada para el caso de estudio analizado. Se ha propuesto un modelo para la valoración de la energía de Itaipu en el mercado eléctrico brasileño. Con el método del AHP se han incorporado tanto variables cuantitativas como cualitativas difíciles de identificar mediante enfoques usuales de evaluación, esto representa una ventaja debido al hecho de que es uno de los pocos métodos que permite realizar dicha incorporación, el cual fue realizado mediante las matrices de comparación por pares. Además, con esto se pretende proporcionar a los tomadores de decisiones una herramienta con rigor científico, con el análisis de una problemática contemporánea, de manera a tomar decisiones fundamentadas que producirán los mayores beneficios para el país.

Finalmente, se ha propuesto un novel enfoque de valoración basado en la técnica del AHP para el análisis del valor de la energía de Itaipu en el mercado eléctrico brasileño, donde fueron evaluados múltiples criterios de evaluación que han sido considerados relevantes. El resultado muestra que el valor de la energía de Itaipu en el mercado eléctrico brasileño debería ser de 102,7 USD/MWh bajo las hipótesis asumidas en el análisis, lo que representaría grandes beneficios para el Paraguay en muchos aspectos.

7 REFERENCIAS

AHMAD, S.; TAHAR, R. M. Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia. **Journal of Renewable Energy**, vol. 63, 2014, p. 458-466.

JOSA, A. C. La integración de las energías renovables en el sistema eléctrico. Documento de trabajo 176, 2012, p. 5-20.

AMARILLA, R.; OJEDA, H.; GARCÍA, M.; BLANCO, G. Modelo de planificación energética multicriterio: Caso de estudio de la utilización de los excedentes hidroeléctricos del Paraguay. In Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), 2014 IEEE, p. 663-668. IEEE.

ARANGO, S. P.; SÁNCHEZ, F. M.; SÁNCHEZ, G. V.; de Ciencias, E. Metodología para la valoración de proyectos de generación eléctrica en Colombia vía opciones reales, 2015, p. 10.

Câmara de Comercialização de Energia. Disponible en: <http://tinyurl.com/j3c4y6w>

Datos técnicos de la CH Itaipu Binacional. Disponible en: <http://tinyurl.com/z5dat7r>

Datos técnicos de la UHE Ilha Solteira. Disponible en: <http://tinyurl.com/z78q7du>

Datos técnicos de la UHE Porto Primavera. Disponible en: <http://tinyurl.com/hy76mk4>

Datos técnicos de la UHE Tucuruí. Disponible en: <http://tinyurl.com/grnuwpk>

Datos técnicos de la UTE Governador Brizola. Disponible en: <http://tinyurl.com/gsey9x9>

Datos técnicos de la UTE Presidente Médici. Disponible en: <http://tinyurl.com/gnyz6ve>

DE LAS NIEVES, G. Técnicas participativas para la planeación de procesos **Breves de intervención**. Fundación ICA, AC, 2003, p. 167-182.

Eletronorte em Números 2010. Eletrobrás. Ministério de Minas e Energia.

CURLEY, G. M. . **Reliability Analysis of Power Plant Unit Outage Problems**, 2013, p. 1-42.

HOBBS B.F.; HORN G.T. Building public confidence in energy planning: a multi-method MCDM approach to demand side planning at BC gas. **Energy Policy**, vol. 25, no. 3, 1997, p. 357-75.

JIMÉNEZ L. M.; DE LA TORRE C. Valoración de riesgos de un proyecto utilizando el proceso jerárquico de análisis. Área de Matemáticas. Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales (Toledo). Universidad de Castilla-La Mancha. 1998. p. 1-10.

KOCH, F. H. **Externalities and Energy Policy: The Life Cycle Analysis Approach**. In Workshop Proceedings. Paris, France. Nuclear Energy Agency. 2001, p. 132-135.

OSPINA BLANDÓN, M. J. Aplicación del modelo multicriterio metodologías AHP Y GP para la valoración económica de los activos ambientales. 2012. Tesis (Maestría en Administración) – Facultad de Administración, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. p. 11-95.

Plano da Operação elétrica 2014/2015. PEL 2013. Relatório Executivo.

RAHMAN S.; FRAIR L.C. A hierarchical approach to electric utility planning. **International Journal of Energy Research**, vol. 8, no. 2, 1984, p. 185-196.

RAMANATHAN R.; GANESH L.S. Energy resource allocation incorporating qualitative and quantitative criteria: an integrated model using goal programming and AHP. **Socio-Economic Planning Sciences**, vol. 29, no. 3, 1995, p. 197-218.

Relatório de Administração e Demonstrações Financeiras 2012.

REN, J.; SOVACOOOL, B. K. Prioritizing low-carbon energy sources to enhance China's energy security. **Journal of Energy Conversion and Management**, vol. 92, 2015, p. 129-136.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **Interfaces**, vol. 24, no. 6, 1994, p. 19-43.

SANTOS ROCHA, R. Ferramenta para Avaliação da Energia Firme Baseada em Técnica de Pontos Interiores. 2008. Tesis (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil. p. 45-47.

STEIN, E. W. A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies. **Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 22, 2013, p. 640-654.

VARGAS, R. V.; IPMA-B, P. M. P. **Using the analytic hierarchy process (ahp) to select and prioritize projects in a portfolio**. In PMI global congress. 2010, p. 1-22.

Originais recebidos em: 23/11/2016

Aceito para publicação em: 08/12/2016

Apéndice A. Ponderación de los criterios en función al objetivo

Valoración de la energía de la CH Itaipu	Ponderaciones	Normalización	Pesos
Impacto Ambiental (C1)	1	1/5	0,20
Factor de Planta (C2)	1	1/5	0,20
Flexibilidad Operativa (C3)	1	1/5	0,20
Confiabilidad (C4)	1	1/5	0,20
Potencia Instalada (C5)	1	1/5	0,20
Σ Columna	5	1	1,00

Apéndice B. Emisiones de CO₂ para el criterio Impacto Ambiental (C1)

Ponderaciones para el C1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Pesos
A1	1	1/3	2	4	3	1/2	0,1657
A2	3	1	4	6	5	2	0,3873
A3	1/2	1/4	1	3	2	1/3	0,1064
A4	1/4	1/6	1/3	1	1/2	1/5	0,0448
A5	1/3	1/5	1/2	2	1	1/4	0,0681
A6	2	1/2	3	2	4	1	0,2277
Σ Columna	7,08	2,45	10,83	18,00	15,50	4,28	1,0000

Apéndice C. Resultados de los pesos obtenidos para las centrales eléctricas respecto al criterio Factor de Planta (C2)

Ponderaciones para el C2	C2	Normalización	Pesos
A1	0,7792	1/4	0,2340
A2	0,6678	1/5	0,2006
A3	0,5651	1/6	0,1697
A4	0,3790	1/9	0,1138
A5	0,1341	0	0,0403
A6	0,8042	1/4	0,2415
Σ Columna	3	1	1,0000

Apéndice D. Resultados de los pesos correspondientes a las ponderaciones de las centrales eléctricas con respecto al criterio Flexibilidad Operativa (C3)

Ponderaciones para el C3	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Pesos	
A1	1	3	3/4	3/5	1/2	1 1/2	0,1414	
A2	1/3	1	1/4	1/5	1/6	1/2	0,0471	
A3	1	4	1	4/5	2/3	2	0,1886	
A4	1/3	1	5	1 1/4	1	5/6	2 1/2	0,2357
A5	2	6	1 1/2	1	1	3	0,2829	
A6	2/3	2	1/2	2/3	1/3	1	0,1042	
Σ Columna	7,00	21,00	5,25	4,47	3,50	10,50	1,0000	

Apéndice E. Resultados de los pesos correspondientes a las ponderaciones de las centrales eléctricas con respecto al criterio Confiabilidad (C4)

Ponderaciones para el C4	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Pesos
A1	1	1/2	1/4	2	3	1/3	0,1039
A2	2	1	1/3	3	4	1/2	0,1627
A3	4	3	1	5	6	2	0,3831
A4	1/2	1/3	1/5	1	2	1/4	0,0662
A5	1/3	1/4	1/6	1/2	1	1/5	0,0438
A6	3	2	1/2	3	5	1	0,2403
Σ Columna	10,83	7,08	2,45	14,50	21,00	4,28	1,0000

Apéndice F. Resultados de los pesos obtenidos para el criterio de evaluación correspondiente a la Potencia Instalada (C5)

Ponderaciones para el C5	C5	Normalización	Pesos
A1	1.540	0	0,0534
A2	3.444	1/8	0,1193
A3	8.370	2/7	0,2900
A4	446	0	0,0155
A5	1.058	0	0,0367
A6	14.000	1/2	0,4851
Σ Columna	28.858	1	1,0000

Apéndice G. Vector de priorización final de las alternativas

Vector de prioridad de las alternativas	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Resultados	0.1397	0.1834	0.2276	0.0952	0.0943	0.2598
	13,97%	18,34%	22,76%	9,52%	9,43%	25,98%

Apéndice H. Proceso de valoración de la energía

Alternativas comparables	Precio de venta de energía (R\$/MWh)	Ponderación global de centrales
A1	198,43	0,1398
A2	217,8	0,1834
A3	170,51	0,2276
A4	213,26	0,0952
A5	289,55	0,0943
Suma	1089,55	0,7403
Ratio	1471,7	
Valor de la energía de ITAIPU	1471,7 x 0,2598 =	382,3 R\$/MWh

Apéndice I. Análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos

Análisis de Sensibilidad	Impacto Ambiental (C1)	Factor de Planta (C2)	Flexibilidad Operativa (C3)	Confiabilidad (C4)	Potencia Instalada (C5)
Impacto Ambiental (C1)	A6	A6	A6	A6	A6
Factor de Planta (C2)	A6	A6	A6	A6	A6
Flexibilidad Operativa (C3)	A6	A6	A3	A3	A6
Confiabilidad (C4)	A6	A6	A3	A3	A6
Potencia Instalada (C5)	A6	A6	A6	A6	A6