



## **Análisis Multicriterio del Costo de Oportunidad de la Venta de la Energía Paraguaya de Itaipu al Mercado Brasileiro**

**Arturo González\*, Gerardo Blanco\*, Richard Ríos\*, Cecilia Llamosas\*, Victorio Oxilia\*, Félix Fernández\***

**\*Grupo de Investigación en Sistemas Energéticos, Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción**

**Campus Universitario, San Lorenzo, Paraguay**

### **RESUMEN**

La abundancia de electricidad, limpia y renovable, es un activo estratégico para el desarrollo de los países. Este recurso tiene el potencial de contribuir al crecimiento económico y al progreso social de un país, generando rentas económicas a través de su comercialización y/o promoviendo procesos de desarrollo industrial que podrían apalancar significativamente el desarrollo del país y mejorar la calidad de vida de la población. En este contexto, es necesario destacar el caso particular de Paraguay debido a su gran disponibilidad de energía hidroeléctrica en base a su participación en las centrales hidroeléctricas binacionales de Itaipu y Yacyretá, en condominio con Brasil y Argentina respectivamente. Hoy, Paraguay solo consume una pequeña porción de la energía que le corresponde y el excedente se cede a los condominios -que compensan a Paraguay- de acuerdo con el marco regulatorio establecido por los Tratados constitutivos de la empresa. A pesar de otras obras, argumentan que dado el excedente energético de Paraguay, se podrían obtener ventajas importantes al fomentar el consumo de energía mediante la instalación de industrias, generando empleos y movilizando la economía doméstica, en lugar de vender su energía, incluso a un precio justo en mercados de terceros países. Obviamente, al menos parcialmente, estas estrategias son mutuamente excluyentes, porque la energía exportada renuncia a una estrategia alternativa potencial. Siguiendo esta línea de pensamiento, está claro que cualquier venta de exceso de energía provocará el rechazo de ciertas alternativas y, en consecuencia, estará vinculado a un costo de oportunidad, definido como el valor máximo entre las opciones no realizadas. En ese sentido, es claro que el uso estratégico de la hidroelectricidad excedente que se actualmente es cedida, podría ser clave para impulsar el proceso de desarrollo económico y social de Paraguay; En este sentido, es muy importante apoyar y acompañar este proceso de toma de decisión colectiva, con una herramienta que nos permita considerar todas las opciones desde diferentes perspectivas, teniendo en cuenta los efectos que estas estrategias pueden tener, materializarse y cómo afectarían los objetivos de desarrollo del país. Por lo tanto, al comparar los beneficios de las diferentes estrategias, el impacto de estas estrategias debe considerarse en diferentes dimensiones que afectan los sectores socioeconómicos del país, es decir, la dimensión social, económica, ambiental, etc .; Esto hace necesario no solo definir los niveles de precios que hacen que la opción de exportar energía eléctrica al mercado eléctrico brasileño cubra los costos de oportunidad de las otras estrategias desde el punto de vista económico, sino que también es vital analizar las variaciones en estos costos de oportunidad con la consideración de otras dimensiones socioeconómicas de interés. Por lo tanto, se propone una metodología basada en un modelo AHP para determinar el costo de oportunidad de la venta de la energía paraguaya de Itaipu al mercado brasileiro como un problema de toma de decisiones multicriterio teniendo en cuenta varias posibles estrategias de utilización de los excedentes hidroenergéticos del Paraguay.

### **PALABRAS CLAVES**

AHP; Costo de Oportunidad; Itaipu

### **1. INTRODUCCIÓN**

La abundancia de energía eléctrica, limpia y renovable, constituye un bien estratégico para el desarrollo de los países [1]. Este recurso tiene el potencial de contribuir al crecimiento económico y progreso social de un país,

**XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
**06 y 07 de Setiembre de 2018**

generando rentas económicas a través de su comercialización y/o impulsar procesos de desarrollo industrial que podrían apalancar significativamente el desarrollo del país y mejorar la calidad de vida de la población [2].

Ante este contexto, es necesario destacar el caso particular del Paraguay debido su gran disponibilidad de energía hidroeléctrica en base a su participación en las centrales binacionales Itaipú y Yacyreta, en condominio con Brasil y Argentina respectivamente. Hoy en día, Paraguay solo consume una pequeña porción de la energía que le corresponde, y el excedente es cedido a los países condóminos –que compensan al Paraguay- según el marco normativo establecido por los Tratados constitutivos del emprendimiento.

Para el caso específico de Itaipu, según el Tratado firmado entre Brasil y Paraguay en 1973 [6], no es posible exportar los excedentes hidroenergéticos a terceros países. Sin embargo, como resultado de intensas negociaciones del Gobierno Paraguayo con el Gobierno Brasileiro en el año 2009 [7], [8] se abrió la posibilidad de comercializar los excedentes hidroenergéticos del Paraguay directamente “solo” al mercado libre Brasileiro [4]. Dicha alternativa, ha sido discutida ampliamente en la sociedad paraguaya [4], constituyéndose en una estrategia para capturar rentas económicas que podrían ser ejecutarse de manera rápida y que presentaría resultados de manera visible en muy poco tiempo.

No obstante otros trabajos sostienen que ante el superávit energético del Paraguay, se podrían obtener importantes ventajas incentivando el consumo de su energía a través de la instalación de industrias, generando de este modo puestos de trabajo y la movilización de la economía interna, en lugar de vender su energía, incluso a un precio justo en mercados de terceros países [4]. En este contexto, en [9] se compararon diferentes alternativas para el aprovechamiento de los excedentes hidroenergéticos del Paraguay, basado en un modelo de Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) [10], mediante el cual se concluye que un incremento de la actividad en el industrial incidiría notablemente en el desarrollo del país.

Obviamente, al menos de forma parcial, dichas estrategias son mutuamente excluyentes, debido a que la energía exportada resigna una potencial estrategia alternativa. Siguiendo esta línea de pensamiento, es claro que cualquier venta de energía excedente originará el rechazo de ciertas alternativas y consiguientemente estará vinculada con un costo de oportunidad, definido como el máximo valor entre las opciones no realizadas.

En ese sentido, es claro que el uso estratégico del excedente de hidroelectricidad que actualmente es cedido, podría ser clave para conducir el proceso de desarrollo económico y social del Paraguay; sin embargo, debido a la alta complejidad de los procesos de toma de decisiones en materia de política energética, en particular para los países como Paraguay que están en medio del camino hacia el desarrollo, implica un complejo problema de decisión que se compone de varias opciones de estrategias a seguir, que tienen el potencial de influir en el bienestar del país y en todas las dimensiones del desarrollo socioeconómico.

En este sentido, es de suma importancia apoyar y acompañar este proceso de toma de decisiones colectivo, con una herramienta que permite considerar todas las opciones desde diferentes ópticas, teniendo en consideración los efectos que pueden tener esas estrategias, de llegar a materializarse, y como afectarían los objetivos del desarrollo del país.

Así, al comparar los beneficios las diferentes estrategias debe contemplarse el impacto de las mismas en diferentes dimensiones que afectan los sectores socio-económicos del país, i.e. dimensión social, económica, ambiental, etc.; esto hace necesario no solo definir los niveles de precio que hacen que la opción de exportar la energía eléctrica al mercado eléctrico brasileño cubra los costos de oportunidad de las otras estrategias desde el punto de vista económico, sino además es vital analizar las variaciones de estos costos de oportunidad con la consideración de otras dimensiones socio-económicas de interés.

El aprovechamiento de los ingresos por la venta de la energía hidroeléctrica paraguaya de Itaipu al Brasil no solo generaría un importante aporte al crecimiento del PIB del Paraguay, sino también podría direccionarse a inversiones en infraestructura pública en el país. Según datos oficiales del Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones del Paraguay [Referenciar Documento] las inversiones en infraestructura generaron solo en el periodo 2013-2017 unos 150.000 empleos directos e indirectos. Por lo que un aumento en los ingresos del Paraguay bien podría incidir no solo económicamente sino también socialmente en el desarrollo del país.

Ante este escenario, este trabajo propone una metodología para atender el problema de la toma de decisiones planteado en el Paraguay, desarrollando una herramienta de análisis de decisiones multicriterio (MCDA), basado en un modelo de Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) bajo cinco ópticas o criterios: económico,

**XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
**06 y 07 de Setiembre de 2018**

técnico, social, ambiental y político, considerando como opciones o alternativas: (A2) la venta de excedentes hidroeléctricos en el mercado mayorista brasileño; (A1) continuar con la situación actual, cediendo el excedente hidroeléctrico a Brasil (continuando con el curso normal de la operación); (A3) instalar una industria electro-intensiva de aluminio; y, (A4) un alto desarrollo de la industria nacional.

## 2. PANORAMA ENERGÉTICO DEL PARAGUAY: ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICAS

El sector energético del país presenta un caso paradójico. Se puede resaltar la gran capacidad de producción de energía hidroeléctrica ya que cuenta con tres grandes centrales: Itaipú (Paraguay- Brasil), con una potencia instalada de 14.000 MW, en igualdad de propiedad de la producción de energía para ambas partes; Yacyretá (Paraguay - Argentina), con una potencia instalada de 3.200 MW, de las cuales 1.600 MW pertenecen a Paraguay, y Acaray-propiedad exclusiva del estado paraguayo, con una potencia instalada de 210 MW [12]. Según datos del Balance Energético Nacional [13] del año 2015, la producción primaria de energía se distribuye en hidroenergía con un 67% y biomasa con un 33%. De este 67% de hidroenergía producida es cedida cerca del 80% a los mercados de Brasil y Argentina.

La energía eléctrica participa con solo el 18,4 % dentro del consumo final de energía, siendo complementado el consumo con los derivados del petróleo en un 39% y la biomasa un 42,6%. [14]

Itaipú Binacional es la principal fuente productora de electricidad en el Paraguay, dicha central fue concebida a partir de un tratado binacional firmado en el año 1973 entre los gobiernos de Paraguay y Brasil para el desarrollo y la explotación del potencial hidroeléctrico del Río Paraná [15]. Itaipú produce cerca de 90.000 GWh/año [12]. Dado que Paraguay sólo consume alrededor del 7% de su cuota total [6], la energía eléctrica no utilizada es cedida al Brasil a cambio de una compensación económica establecida en el tratado de 1973 el cual estipula que el excedente no consumido por una de las partes, será transferida a la otra parte contratante, restringiendo así la posibilidad de que una de las partes disponga de su excedente para venderlo a terceros [15], [16], [17]. No obstante, como se mencionó antes, en el año 2009 [7], [8] se abrió la posibilidad de comercializar los excedentes del Paraguay directamente “solo” al mercado libre Brasileiro [4].

Ante este escenario, la principal problemática radica en que en el Paraguay no se aprovecha al máximo el excedente de electricidad disponible, por lo que existe actualmente una importante participación de la biomasa no sostenible y de las fuentes de energía basadas en el petróleo que representan un claro desequilibrio en la seguridad energética del país, el medio ambiente y la calidad de vida de la población.

Esta situación no es favorable para el país y manifiesta un claro desequilibrio que perjudica la seguridad energética del país además de la sostenibilidad de su matriz energética en detrimento del medio ambiente y la calidad de vida de la población, abarcando así todos los frentes: sociales, económicos y ambientales [9]

## 3. PROCESO ANALITICO JERARQUICO (AHP)

El método AHP fue desarrollado durante los años setenta por el Dr. Thomas Saaty, en búsqueda del desarrollo de una herramienta sistemática que permita la evaluación y selección de alternativas que tengan un marco bien fundado, sólido en sus fundamentos matemáticos y simples en su aplicación [10]. El AHP es una herramienta sistemática ampliamente utilizada en la literatura para la evaluación y selección de alternativas que tengan un marco bien fundamentado en lo matemático y simple en su aplicación [22]. Permite derivar escalas relativas utilizando el juicio o datos estándar, realizando operaciones aritméticas posteriores en tales escalas [10]. Como es señalado en [9], el AHP permite 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 o atributos, 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. 2), mostrada a continuación:

$$\begin{bmatrix} W_1/W_1 & W_1/W_2 & \dots & W_1/W_n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & \dots & W_n/W_n \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = n * \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = n * W \quad (2)$$

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
06 y 07 de Setiembre de 2018

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. Considerando que  $A = (a_{ij}), a_{ij} = \frac{W_i}{W_j}, i, j, k = 1, \dots, n$  y se satisface la recíproca entonces  $A$  es considerada consistente porque cumple la siguiente condición (Ec. 3):

$$a_{jk} = a_{ik} / a_{ij}, i, j, k = 1, \dots, n \quad (3)$$

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 [23]. 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 [10], siendo: 1- igualdad de importancia, 3- moderada importancia de uno sobre otro, 5- fuerte importancia, 7- muy fuerte importancia, y 9- importancia extrema. En la Ec. 2 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 [24]. 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 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 de valoración.

El AHP, es una herramienta muy versátil, que permite la realización de un análisis de sensibilidad, con respecto a la preferencia de los criterios. [25] Esto se realiza asignando valoraciones diferentes a los criterios con respecto a su estado inicial, con lo cual se determina nuevas prioridades para los criterios, de esta manera respondemos a la pregunta ¿Qué pasa si...?. Estos análisis son una herramienta que ayuda a verificar los resultados obtenidos mediante el AHP, además de proporcionar una visión general de las diferentes alternativas de acuerdo a los tomadores de decisiones. [9]

#### 4. COSTO DE OPORTUNIDAD

Analizando desde un enfoque económico, se parte de la idea de que los recursos son limitados y, generalmente, tienen usos diversos. Por lo tanto, surge la necesidad de tomar decisiones teniendo en cuenta la escasez de los recursos. Entonces, por ejemplo, la producción de un determinado bien (O la elección de una alternativa específica, en el caso de toma de decisiones) implica la renuncia a fabricar otro producto con esos mismos recursos (Descartar otras alternativas posibles). El bien o servicio al que se le han aplicado esos recursos se expresará en términos del bien o servicio sacrificado. [11] Tomar decisiones en un mundo con escasos recursos nos obliga a no elegir todas las opciones, lo cual implica el sacrificio de hacer otra cosa u otra opción. Esta opción a la que se renuncia o se sacrifica se denomina costo de oportunidad. [26]

Se puede hablar de tres casos en los que el coste de oportunidad toma este valor: [27]

- Bienes libres: Se trata de bienes que existen en abundancia en la naturaleza y cuyo empleo no genera costes de oportunidad.
- Factores de un solo uso: Aquellos recursos que se pueden emplear en diferentes alternativas tienen un coste de oportunidad porque al optar por una de ellas, se está sacrificando al resto. Si ese recurso sólo tuviese una única alternativa, su coste de oportunidad sería cero.
- Desempleo general: En general, la elaboración de un bien supone apartar recursos de la producción de otro bien. En determinadas ocasiones, los recursos están desempleados y el coste de oportunidad es cero.

**XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
**06 y 07 de Setiembre de 2018**

En este caso, la mejor utilización de los excedentes hidroenergéticos del Paraguay, supone un factor de un solo uso, por lo que visiblemente se genera un costo de oportunidad. El cual se debe identificar para tener una clara perspectiva a la hora de la toma de decisiones.

## 5. METODOLOGÍA

Se propone una metodología basada en un modelo AHP para determinar el costo de oportunidad de la venta de la energía paraguaya de Itaipú al mercado brasilero como un problema de toma de decisiones en donde se abordan varias posibles estrategias de utilización de los excedentes hidroenergéticos del Paraguay, teniendo en cuenta múltiples criterios.[9] Donde primeramente se estructura el problema basado en el modelo AHP y posteriormente se determinan los costos de oportunidad de la venta de la energía excedente del Paraguay al mercado Brasilero.

### 5.1 Estructuración del Problema AHP

Se establecieron el objetivo, los criterios de evaluación y las alternativas a ser evaluadas de la siguiente manera:

- *Objetivo*

Determinar el costo de oportunidad de la venta de la energía paraguaya de Itaipú al mercado brasilero.

- *Criterios*

Criterio Ambiental (C1)<sup>1</sup>: el indicador de este criterio es la tasa de crecimiento promedio de la emisión de gases de efecto invernadero (GEL), que se estima por una proyección que incluye el consumo de energía como variable exógena. El análisis de series de tiempo se realiza con base en los datos históricos de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Paraguay.

Criterio Económico<sup>2</sup> (C2): el indicador de este criterio es la tasa media anual de crecimiento del PIB del país en el horizonte analizado. Se estima la proyección del PIB por medio de series de tiempo histórica. Cada alternativa tiene un tratamiento especial en cuanto a su contribución marginal al PIB.

Criterio Social<sup>3</sup> (C3): el indicador de este criterio es el número de empleos que se generaría por cada estrategia. Se calcula mediante las proyecciones basadas en datos históricos o estudios adicionales específicos en función de la estrategia que se está analizando.

Criterio Técnico<sup>4</sup> (C4): el indicador de este criterio es el Costo Esperado de Energía No Suministrada (CEENS). Dentro de este análisis, la tasa de crecimiento de la demanda eléctrica se considera incierta y su evolución se replica mediante simulaciones de Monte Carlo a través de un Movimiento Browniano (BM). Además, análisis de contingencia de líneas de transmisión son llevados a cabo en cada realización. Finalmente, Flujos Óptimo de Potencia (OPF) son calculados en el sistema de potencia de Paraguay con el fin de determinar el ECENS mínimo de cada hora, realización y contingencia a lo largo del horizonte de análisis.

Criterio de Factibilidad (C5): aquí se establece una clasificación basada en el conocimiento experto de la probabilidad de una efectiva implementación de las alternativas analizadas.

- *Alternativas*

A1: Seguir cediendo energía eléctrica a Brasil;

A2: Vender directamente la energía al mercado mayorista brasilero. La electricidad se vende en el mercado mayorista brasileño a diferentes precios de mercado (los precios se establecen en el siguiente apartado), generando un ingreso neto en base los mismos.

A3: Fomentar la instalación de industrias electro-intensivas: una fábrica de aluminio de 1.100 MW se instala en Paraguay en el año 2.017.

A4: Incentivar la Industria Nacional mediante el desarrollo de pequeños parques industriales: Parques industriales de 180 MW por año se establecen en Paraguay por un periodo de 4 años.

El problema se puede representar de forma gráfica y se puede observar en la Fig. 1.

<sup>1</sup>Datos Utilizados para el criterio Ambiental. Disponible en: <https://goo.gl/g6bAF5>

<sup>2</sup>Datos Utilizados para el criterio Económico. Disponible en: <https://goo.gl/SXSVKd>

<sup>3</sup>Datos Utilizados para el criterio Social. Disponible en: <https://goo.gl/9Sf2ad>

<sup>4</sup>Datos Utilizados para el criterio Técnico. Disponible en: <https://goo.gl/RmCKVM>

**XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
**06 y 07 de Setiembre de 2018**

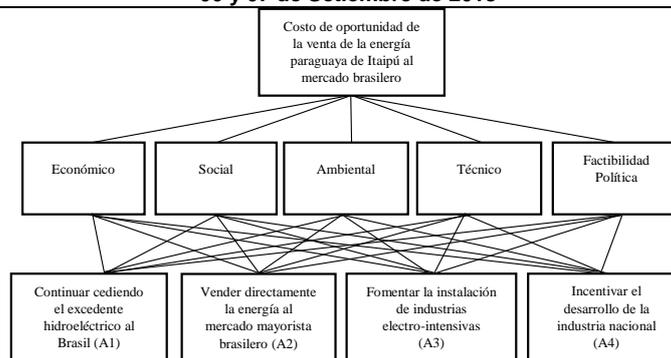


Fig. 1: Árbol Jerárquico de decisiones [9]

**5.2 Análisis del costo de oportunidad, considerando la renta por la variación de los precios de la energía, para la venta al mercado Brasileiro**

Se realizaron cálculos en base a diferentes precios de venta de la energía eléctrica de Itaipu al mercado brasilero, bajo el cual exista un costo de oportunidad para la estrategia “A2”.

Dichos cálculos, consisten en realizar un total de 145 análisis basados en la metodología AHP, estableciendo diferentes precios de venta de la energía eléctrica de Itaipú en el mercado brasilero, en progresión aritmética, tomando como precio de venta base (PV0) de la energía eléctrica 56 US\$/MWh en base a [Referenciar Material de Richard], con un crecimiento a razón de 50 US\$/MWh y con un total de 145 precios posibles. Siendo el precio tope el costo de energía no suministrada establecido para el mercado brasilero, 7.200 US\$/MWh [29] debido a que teóricamente, es el máximo precio que se estaría dispuesto a pagar por la energía en dicho mercado. Por lo tanto, se sumaron los ingresos por la venta de 9.504 GWh de energía (Lo que implica un bloque fijo de potencia media reservada para la venta de 1.100 MW) con un horizonte de 4 años, descontando el precio de contratación de potencia de Itaipú, que por motivos prácticos fue convertido a precio de energía.

El costo (C) de la energía (46,4 US\$/MWh) calculado en base a [Referenciar libro amarillo] teniendo así una renta (R) que obedece esta ecuación

$$R = PV - PC \tag{4}$$

Esto permitió calcular el crecimiento promedio del PIB del Paraguay por un periodo de 18 años para cada caso del análisis AHP, lo que implicó la variación en el parámetro de la alternativa “A2” con respecto al criterio económico (Aporte de los ingresos netos por la venta directa al mercado brasilero).

Teniendo en cuenta la renta obtenida por la comercialización de la energía en el mercado brasilero, se estableció un rango de valores de las ponderaciones, relativa a la alternativa “A2” bajo el criterio social. Esto debido a que mediante la utilización de la renta mencionada anteriormente, se podría aplicar a programas de inversión pública, como por ejemplo inversión en infraestructura vial, edificios educativos, etc., lo que generaría un alto índice de empleo incidiendo de forma directa en el criterio social.

Criterio Social		
	USD/MWh	Ponderación
Rangos de la Renta	50 <	1
	(50;100]	3
	(100;150]	5
	(150;200]	7
	>200	9

TABLA I: PONDERACIONES PARA LOS RANGOS DE LA RENTA OBTENIDA POR LA VENTA DE LA ENERGÍA HIDROELECTRICA PARAGUAYA EN EL MERCADO BRASILEIRO

Para cada análisis AHP, se realizó un análisis de sensibilidad, con el objeto de establecer las mejores estrategias teniendo en cuenta las diferentes posibilidades y combinaciones de preferencias de los criterios, abarcando todas las posibles preferencias de los criterios.

Mediante este análisis de sensibilidad, para cada posible combinación de preferencias de criterios y para los 145 precios posibles, se determinaron los costos de oportunidad de la alternativa “A2” los cuales, nos indican a que precios y bajo que escenarios posibles, vender el excedente hidroeléctrico del Paraguay presenta un costo de oportunidad.

5. RESULTADOS

Como resultado de 145 análisis AHP<sup>5</sup>, con diferentes precios, se pudo identificar 24 costos de oportunidad para la alternativa “A2”, además se determinaron los escenarios para los cuales dicha opción representa de forma clara la mejor para el aprovechamiento de los excedentes hidroenergéticos del Paraguay.

Los costos de oportunidad identificados se presentan en casos donde los tomadores de decisiones tengan una marcada preferencia hacia los criterios ambiental y/o económico. Lo que es bastante lógico considerando que desde el punto de vista económico, la venta de la energía al mercado brasilero es muy conveniente gracias a la renta que produce la misma. En cuanto al aspecto ambiental, el consumo de energía influye en la generación de GEI en el Paraguay, por lo que un escenario de alta exportación de electricidad implica el no consumo de la misma por lo que disminuiría la generación de GEI.

También se presentan costos de oportunidad en escenarios donde el criterio social tiene una marcada preferencia, debido a que a medida que aumentan los ingresos por la venta de la energía al mercado brasilero, se obtiene un aprovechamiento de la renta obtenida como un beneficio social. Por lo tanto, los costos de oportunidad identificados, y los más convenientes, fueron en escenarios combinados de preferencias de los criterios ambientales, económicos y sociales.

Los resultados generales (La preferencia de los criterios y los precios de venta de la energía hidroeléctrica paraguaya) para los cuales se identificaron un costo de oportunidad se muestran en la Fig. 2

Los principales costos de oportunidad identificados se muestran en las Figuras: 3, 4 y 5.

El costo de oportunidad más bajo se puede observar en el escenario donde hay mayor preferencia combinada de los criterios Ambiental y Económico, a un precio de venta de 63,55 USD/MWh (Ver Fig. 3), y el costo de oportunidad más elevado se registró en el escenario donde el criterio Técnico y Económico tienen una mayor preferencia, obteniendo un precio de 2841 USD/MWh. (Ver Fig. 5).



Fig. 2: Costos de oportunidad identificados para la alternativa A2 teniendo en cuenta las diferentes preferencias de criterios

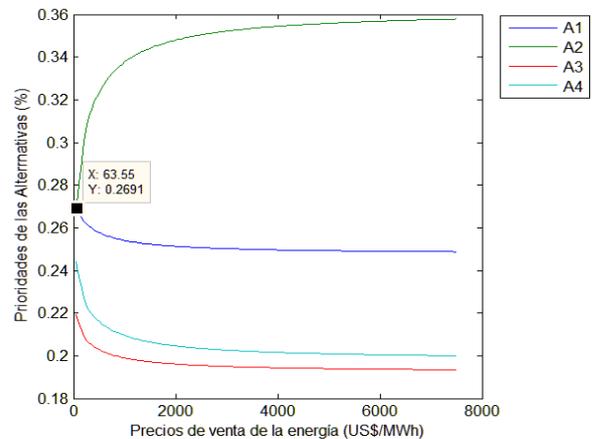


Fig. 3: Costo de oportunidad de A2 para una mayor preferencia de los criterios Ambiental y Económico. Precio de la energía a 63,55 \$/MWh

<sup>5</sup>Los datos, los resultados de los modelos AHP y los análisis de sensibilidad se presentan de forma exhaustiva en: [Falta Link]

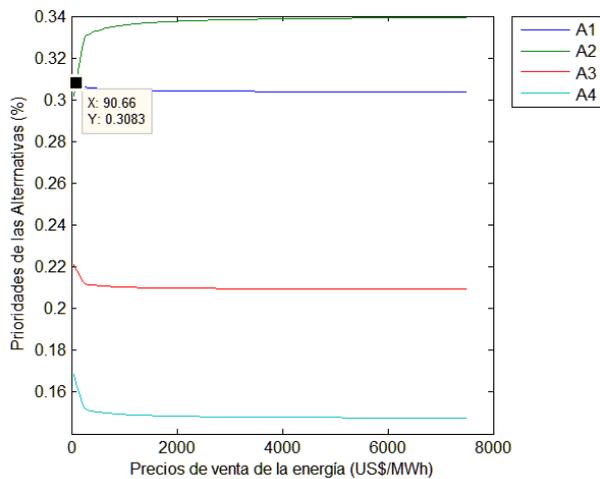


Fig. 4: Costo de oportunidad de A2, para una mayor preferencia del criterio Ambiental. Precio de la energía a 90,66 \$/MWh

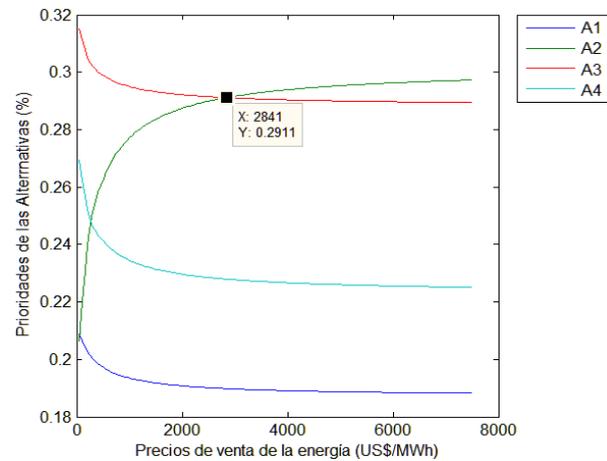


Fig. 5: Costo de oportunidad de A2 para una mayor preferencia de los criterios Técnico, Económico y de Factibilidad Política. Precio de la energía a 2841 \$/MWh

## 6. CONCLUSIONES

La venta de la Energía eléctrica excedente del Paraguay en el mercado Brasileiro es una opción válida para la utilización de la misma, pero como se puede observar en este estudio, también existen otras posibilidad a ser consideradas. Cabe destacar que las alternativas posibles con respecto a la utilización de los excedentes hidroenergéticos compiten entre ellas, además de que existen una cantidad de factores que no se consideran en este estudio; factores que bien podrían influir en el proceso de toma de decisiones.

El AHP, método utilizado para este trabajo, representa una útil herramienta científica para analizar a profundidad los costos de oportunidad de “Vender directamente la energía en el mercado mayorista brasileiro”, ya que en gran parte de los escenarios posibles, la mencionada alternativa no es la más conveniente.

Se puede concluir, de acuerdo a las condiciones consideradas en el presente estudio, que un escenario de alta exportación de la energía hidroeléctrica paraguaya al Brasil presenta costo de oportunidad, para varios escenarios donde los tomadores de decisiones tengan una notoria predilección a los criterios Económico, Ambiental y Social además de algunas combinaciones de estos criterios con otros. Lo que implica una decisión lógica, ya que un escenario de exportación implica un buen ingreso en cuanto a renta, lo que implicaría un aporte importante al crecimiento del PIB del Paraguay. Dicho escenario implicaría, que la energía eléctrica exportada no sea consumida en el país, lo que evitaría la generación de gases de efecto invernadero ya que está directamente relacionada al consumo de energía eléctrica en el Paraguay. Tampoco se puede dejar de lado la posibilidad de utilizar las rentas obtenidas por la venta de la energía paraguaya de Itaipu al Brasil, como una vía de producción de empleos mediante la inversión en obras de infraestructura para el país.

Otro aspecto importante obtenido como resultado de este trabajo son los precios de venta de la energía en el mercado brasileiro para los cuales se generaría rentas que impacten significativamente en el desarrollo del Paraguay, que varían desde 63,55 US\$/MWh hasta 2481 US\$/MWh. Esto implica que no todos los precios de venta son realmente competitivos ya que varios de ellos son muy elevados. Es importante sin embargo, considerar todas las posibles líneas de acción para el manejo de los recursos energéticos del Paraguay.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de Paraguay (CONACyT) por su apoyo financiero a través de los proyectos 14-INV-290, 14-POS-032 y PRONII.

## Referencias

- [1] "The Atlas of Economic Complexity," Center for International Development at Harvard University, <http://www.atlas.cid.harvard.edu>
  - [2] Toth, F.L.,(2012), Energy for Development. Resources, Technologies, Environment, Springer Netherlands. International Atomic Energy Agency.
  - [3] Amarilla, R., Ojeda, H., Garcia, M., & Blanco, G. (2014, June). 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* (pp. 663-668). IEEE.
  - [4] G. Blanco and L. Aguiar, "Pensando estratégicamente sobre la renegociación del tratado de Itaipú: una visión desde la teoría de juegos," presented at the XIV Encuentro Regional Iberoamericano del CIGRÉ, Ciudad del Este XIV, 2011
  - [5] L. Aguiar, G. Blanco y E. Buzarquis, "Análisis de la Renegociación del Tratado Bilateral de la Itaipú Binacional," *VIII Latin American Congress on Electricity Generation & Transmission*, Ubatuba, Brasil, Oct. 2009.
  - [6] Itaipú Binacional. *Tratado de Itaipú*. Documentos Oficiales. Disponible online: [www.itaipu.gov.br/files/tratadoitaipu\\_Esp.doc](http://www.itaipu.gov.br/files/tratadoitaipu_Esp.doc)
  - [7] Comisión de Entes Binacionales Hidroeléctricos (CEBH). Ministerio de Relaciones Exteriores (MRE). *Las negociaciones del Paraguay con el Brasil sobre Itaipú*. Abril 2009. Disponible en: <http://tinyurl.com/2arooqe>.
  - [8] Comisión de Entes Binacionales Hidroeléctricos (CEBH). Ministerio de Relaciones Exteriores (MRE). *Declaración conjunta Paraguay-Brasil*. Julio 2009. Disponible en: <http://tinyurl.com/26nunet>.
  - [9] Blanco, G., Amarilla, R., Martínez, A., Llamosas, C., & Oxilia, V. (2017). Energy transitions and emerging economies: A multi-criteria analysis of policy options for hydropower surplus utilization in Paraguay. *Energy Policy*, 108, 312-321.
  - [10] T. L. Saaty, "How to make a decision: the analytic hierarchy process," *Interfaces*, vol. 24, no. 6, pp. 19-43, 1994.
  - [11] Díaz, B. G. (2000). *El coste de oportunidad como herramienta empresarial*. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de Oviedo.
  - [12] Arce, P. E., Encina, A. S. A., & Carneiro, A. A. (2013). Modelo de optimización de contratos de potencia para el suministro al sistema eléctrico paraguayo desde Itaipú. *FPUNE Scientific*, 8(8).
  - [13] MOPC, 2015. Balance Energético Nacional 2014 en términos de Energía Final, Asuncion. <http://www.ssme.gov.py/vmme/pdf/balance2014/Balance%20Energetico%20Nacional%202014-Final-3.pdf>. Accessed 10 May 2016.
  - [14] Amarilla, R., Buzarquis, E., Domaniczky, J., Barán, B., & Blanco, G. (2015, November). Analysis of the energy sector of Paraguay. Energy balance in terms of useful energy in 2011. In 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV) (pp. 1-7). IEEE.
  - [15] Debernardi, E. (1996). Apuntes para la Historia de Itaipu. *Assunción, Paraguay: Editorial Gráfica Continua SA*.
  - [16] Itaipú Binacional. Prestación de los Servicios de Electricidad y Bases Financieras: Compendio. ITAIPU Binacional 2003.
  - [17] Itaipú Binacional. Documentos oficiales. Anexo C [Online]. Disponible en: <http://tinyurl.com/6652y93>.
  - [18] Itaipú Binacional. Prestación de los Servicios de Electricidad y Bases Financieras: Compendio. ITAIPU Binacional 2003.
  - [19] Itaipu Binacional, Technical Report. RIAT. Agosto, 2012.
  - [20] Itaipu Binacional Tratado entre Brasil y Paraguay.1973.
  - [21] GUARNIER, E.. (2014). SIMULADOR DE ESTRATÉGIAS DE PARTICIPAÇÃO EM LEILÕES DE ENERGIA EXISTENTE PARA GERADORES. junio 20, 2017, de Biblioteca Digital USP Sitio web: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-16102014-161741/pt-br.php>
  - [22] M. J. Ospina, "Aplicación del Modelo Multicriterio Metodologías AHP Y GP para la Valoración Económica de los Activos Ambientales". Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales, p. 11-95.
  - [23] De Las Nieves, G. D. L. N. S. "Técnicas participativas para la planeación de procesos Breves de intervención", Fundación ICA, AC, 2003, p. 167-182.
  - [24] Vargas, R. V., & IPMA-B, P. M. P. "Using the analytic hierarchy process (ahp) to select and prioritize projects in a portfolio", PMI global congress. 2010, p. 1-22.
  - [25] Ortigoza, E., Gonzalez, A., Blanco, G., & Martinez, A. (2016). TRANSFORMACIÓN ESTRUCTURAL DEL SECTOR PRODUCTIVO DEL PARAGUAY: UN ENFOQUE DESDE LA PERSPECTIVA DE LA COMPLEJIDAD ECONÓMICA Y DEL ESPACIO PRODUCTO. *Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção*, 4(6), 69-77
  - [26] SAMUELSON, P. A. y NORDHAUS, W. D. (1992): *Economía*, McGraw Hill, México.
  - [27] LIPSEY, R. G. y HARBURY, C. (1989): *Principios de economía*, Vicens-Vivens, Barcelona.
  - [28] Fernández, F., Blanco, G., Oxilia, V. (2017). Valoración Multicriterio de la Energía Eléctrica de Itaipu Binacional en el mercado Brasileño. Décimo Séptimo Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ, XVII ERIAC, Ciudad del Este, Paraguay.
- Consultores, M. E., (2016), AVALIAÇÃO DOS CUSTOS RELACIONADOS ÀS INTERRUPÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA E SUAS IMPLICAÇÕES NA REGULAÇÃO. Relatório 3.b, Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasil