

**Facultad Politécnica Universidad Nacional de Asunción  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**

**Proyecto 14-INV-271  
“Valuación de Inversiones en Infraestructura Eléctrica y  
Comportamiento Estratégico”**

**ANEXO 17  
PGT 4.1 – Formulación de modelos de teoría de Juegos  
– Informe**

**Comité de Estudio C5 – Mercados de Electricidad y Regulación**

**VALORACIÓN MULTICRITERIO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE ITAIPU  
BINACIONAL EN EL MERCADO ELÉCTRICO BRASILEÑO**

**F. FERNÁNDEZ\***  
Facultad Politécnica - UNA  
Paraguay

**G. BLANCO**  
Facultad Politécnica - UNA  
Paraguay

**V. OXILIA**  
Facultad Politécnica - UNA  
Paraguay

**Resumen** – La producción de energía eléctrica limpia y renovable ha adquirido en las últimas décadas un rol preponderante en la valoración de la matriz de generación eléctrica de los países y regiones buscando seguridad y sustentabilidad energética. Así, la Central Hidroeléctrica de Itaipu Binacional, aprovecha uno de los recursos naturales que posee el Paraguay en condominio con el Brasil. Dicha central satisface casi la totalidad de la demanda de energía eléctrica del Paraguay, existiendo incluso excedentes de energía que, bajo lo reglado en el Tratado binacional, son cedidos al país condómino.

En los últimos años, en el Paraguay se ha generado un interesante debate sobre cuál sería el mejor uso de dicho excedente. Una de las alternativas es la venta de dicha energía paraguaya en el mercado eléctrico brasileño. Un aspecto relevante para el análisis de dicha estrategia es la valoración de la energía de Itaipu, que sirva como insumo de negociación en el mercado mayorista brasileño. Sin embargo, en la actualidad, no existe un mecanismo integral de valoración de dicha energía que tome en cuenta todas las características y/o prestaciones de la energía de Itaipu, y su apreciación en el mercado del Brasil. La única valoración que se posee es la tarifa de la energía de Itaipu y la compensación por cesión de energía, basadas exclusivamente en las condiciones financieras definidas en el Tratado binacional.

Para el desarrollo de este enfoque se utiliza la metodología del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Esta técnica se aplica para la toma de decisión multicriterio y puede ser utilizado para la valoración de activos. En este caso, el objetivo es, mediante un modelo basado en el AHP, reconocer, estimar o apreciar el valor de la energía de Itaipu y la fuente de generación de dicho valor. Así, este trabajo va más allá de una simple comparación y asignación de precios, contemplando de manera integral los múltiples atributos más relevantes de la oferta de energía eléctrica considerados en un mercado competitivo. Los atributos contemplados en este trabajo para el desarrollo del AHP -i.e. aspectos técnicos, económicos y ambientales- son priorizados en función de su grado de importancia. Finalmente, las alternativas son valoradas mediante un benchmarking con el valor de centrales de generación eléctrica que comercializan en el mercado mayorista brasileño.

**Palabras clave:** Energía – Centrales eléctricas – Itaipu – Mercado – Valoración multicriterio – AHP – Benchmarking

## 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 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 hidroelectricidad. Esta energía renovable, acompañada de una planificación de desarrollo sostenible, debería ser la piedra angular de una política energética que impulse la economía del país. Así, se puede decir que el Paraguay, debe aprovechar el alto nivel de energía hidroeléctrica disponible, mediante el fomento del uso de dicha energía, o en su defecto, comercializarla en terceros países, buscando incrementar los beneficios económicos para el país. En este sentido, se ha creado en los últimos años un gran debate 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 (Acuerdo de Presidentes del 2009 para comercializar energía paraguaya en el Brasil), y el valor de la mencionada energía [1]. 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.

La percepción general de la sociedad paraguaya es clara, 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, así como también divulgados entre los diferentes sectores de la economía paraguaya, de manera a centrar el debate en torno a criterios analíticos. Para el análisis apropiado de este tipo de problemas, se han desarrollado en las últimas décadas, un gran número de métodos de valoración multicriterio, buscando eliminar las conjeturas sesgadas, el pensamiento no explicado, injustificado e intuitivo que en ocasiones acompaña a la mayoría de las decisiones que se toman con respecto a problemas complejos.

Para la resolución de este tipo de problemas, no basta con aplicar la técnica multicriterio bajo un punto de vista teórico y objetivista, así como en la aplicación de un procedimiento analítico que determine la solución óptima de un problema altamente complejo, más bien, se debería utilizar la herramienta bajo un punto de vista práctico, es decir, siguiendo un paradigma de racionalidad más amplia, flexible y realista que el tradicional. Por lo tanto, los métodos de decisión multicriterio, cuya utilización permite encontrar una solución eficiente, son una base sustentada en elementos científicos, que aportan mejoras distintivas en todo el proceso de valoración.

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 [2]. 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 manera jerárquica al nivel inmediatamente superior del cual se desprende. Actualmente, la metodología 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 [3], en la tasación de deportistas y en la valoración económica de activos ambientales [4]. En este 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 reditúe los mayores beneficios para el país, no es una tarea trivial. Por lo tanto, la toma de decisiones multicriterio para la valoración de la energía de Itaipu, es un aspecto clave que debe ser considerado para el análisis de este tipo de problemas.

Este trabajo toma como caso de estudio varias alternativas de centrales eléctricas. Dichas alternativas serán estudiadas bajo múltiples criterios de evaluación, tales como: Impacto Ambiental, Factor de Planta, Potencia Instalada, Flexibilidad Operativa y Confiabilidad. Con estas 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 HIERARCHY PROCESS

### 2.1 Estructuración del proceso de valoración con el AHP

Como es señalado en [4], 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 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. 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. Considerando que  $A = (a_{ij})$ ,  $a_{ij} = W_i/W_j$ ,  $i, j, k =$

$1, \dots, n$  y se satisface la recíproca  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ , entonces  $A$  es considerada consistente porque 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 [5]. 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 [4], 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.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 [6]. 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.

### 2.2 Aplicaciones del AHP en diferentes áreas

Los métodos de análisis de decisión multicriterio han sido empleados en diversas áreas de los sistemas energéticos, como por ejemplo: en la planificación energética, en la planificación de energías renovables [7], en la asignación de recursos de energía [8], y en la planificación de servicios eléctricos [9]. Asimismo, este enfoque se ha utilizado en los últimos años para la clasificación de las diversas tecnologías de producción de electricidad [10], así como en la clasificación estratégica de un plan integral óptimo de los recursos [11]. Además, se ha aplicado como un enfoque para evaluar la seguridad energética de los países que son dependientes de los combustibles fósiles [12]. Actualmente, la metodología multicriterio 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 [3], en la tasación de deportistas y en la valoración económica de activos ambientales [4]. Además, la técnica del AHP es utilizada en la valoración de inmuebles con carácter histórico-artístico [13]. Asimismo, el AHP es utilizado para valorar las patentes de nuevos productos que son desarrollados por una empresa [14], en la valoración de ecosistemas naturales [15], y en la valoración social de los sistemas agrarios periurbanos [16].

El estado del arte indica que, la técnica del AHP es quizás 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 [17].

### 3 PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA VALORACIÓN DE LA ENERGÍA DE ITAIPU

#### 3.1 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, de manera a realizar un benchmarking con las Usinas Hidroeléctricas del mercado eléctrico brasileño. A continuación se describen los criterios mencionados.

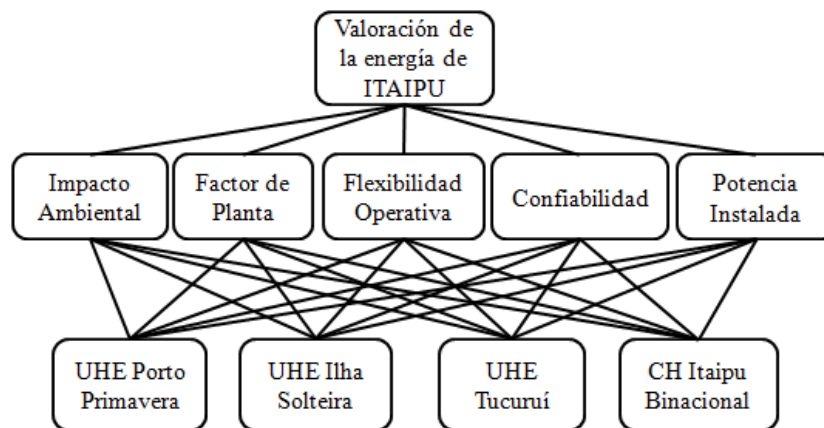


Fig. 1. Niveles del árbol jerárquico de decisión propuesto

*Impacto ambiental:* el indicador considerado para este criterio, es la emisión de gases de efecto invernadero, en este caso metano ( $CH_4$ ). La emisión de gases de cada central hidroeléctrica es proporcional al área de embalse de cada una de ellas, este indicador ha sido ponderado considerando dichas emisiones de  $CH_4$  según [18], además de considerar el tamaño del embalse de cada central hidroeléctrica, estos datos técnicos se han obtenido de [19], [20], [21] y [22]. Finalmente, estos datos son utilizados para realizar la comparación por pares de las alternativas evaluadas y así, calcular el vector propio de este criterio.

*Factor de planta:* 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 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 evaluada. Para el cálculo de este criterio, fueron utilizados datos de generación de energía eléctrica de las centrales evaluadas como alternativas [23], [24], [25] y [26]. Además, fueron utilizados datos de potencia instalada de las mismas centrales [19], [20], [21] y [22]. Finalmente, los resultados de los cálculos obtenidos a partir de la Ec. 3, son normalizados de manera a determinar su vector propio (peso ponderado del criterio de evaluación).

*Flexibilidad operativa:* 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 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. Las centrales hidroeléctricas con embalses ofrecen flexibilidad operacional incomparable ya que pueden responder inmediatamente ante las fluctuaciones de la demanda de electricidad [27]. Por lo tanto, el área del embalse de cada central hidroeléctrica se ha utilizado para realizar la comparación por pares de las alternativas evaluadas, estos datos se han obtenido de [19], [20], [21] y [22]. Luego, se calcula el vector propio de este criterio. Esto finalmente se traduce en un ranking de las alternativas con respecto a este criterio.

*Confiabilidad:* 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 dicha central. La pérdida de capacidad de generación asociada a las fallas depende de la cantidad de unidades generadoras que se encuentren fuera de servicio [28]. La comparación pareada de las alternativas fue realizada en forma cualitativa para este criterio de evaluación, considerando el conocimiento y experiencia de expertos en el área de la energía eléctrica. Por lo tanto, las alternativas fueron comparadas considerando el número de unidades generadoras en operación de cada central [19], [20], [21] y [22], al momento de realizar las comparaciones por pares de las centrales y así, finalmente calcular el vector propio de este criterio.

*Potencia instalada:* 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 considerados datos de potencia instalada de cada central eléctrica [19], [20], [21] y [22]. Finalmente, dicha información fue procesada para su normalización y así, posteriormente calcular el vector propio correspondiente a este criterio.

### **3.2 Alternativas analizadas**

Las alternativas estudiadas en este trabajo, son las centrales eléctricas consideradas comparables que fueron observadas en la Figura 1. Las alternativas son centrales hidroeléctricas que se encuentran en operación en el mercado eléctrico brasileño. Las centrales eléctricas consideradas para este estudio fueron seleccionadas de acuerdo a su importancia en la operación del sistema interconectado del vecino país. Las alternativas comparables tomadas para el caso de estudio son las siguientes centrales eléctricas: UHE Porto Primavera (A1), UHE Ilha Solteira (A2), UHE Tucuruí (A3) y por último, la alternativa analizada como objeto de valoración es la CH Itaipu Binacional (A4). Se ha considerado esta muestra de centrales eléctricas, como una muestra razonable para la realización del benchmarking con las centrales brasileñas.

## **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 anteriormente mencionadas. Inicialmente, se realizó la comparación por pares de los criterios de evaluación. Para esta parte del proceso de valoración, las ponderaciones fueron consideradas equilibradas con relación al objetivo principal (ponderaciones de 1), que para el caso de estudio, el objetivo es “estimar o apreciar el valor 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 determina una matriz de ponderación de todos los criterios de evaluación con respecto al objetivo principal (Tabla I).

Tabla I. Ponderación de criterios de evaluación

Objetivo: Valoración de la energía de la CH Itaipu	Ponderaciones	Normalización	Pesos
Impacto Ambiental (C1)	1	1/5	0,2000
Factor de Planta (C2)	1	1/5	0,2000
Flexibilidad Operativa (C3)	1	1/5	0,2000
Confiabilidad (C4)	1	1/5	0,2000
Potencia Instalada (C5)	1	1/5	0,2000
$\Sigma$ Columna	5	1	1,0000

Con el objetivo de interpretar y proporcionar la ponderación relativa a cada criterio de evaluación, 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, 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. La ventaja comparativa que ofrece el método del AHP es la introducción de ambas variables, lo que no es tan trivial conseguirlo con otros métodos. 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. Además, las ponderaciones cualitativas pasan a ser cuantitativas 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 de evaluación. 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 los pesos para el criterio de Impacto Ambiental se muestran en la Tabla II. Cabe destacar que para las ponderaciones consideradas cualitativas se han analizado sus consistencias, según [17].

TABLA II. PONDERACIÓN DE CENTRALES ELÉCTRICAS CON RESPECTO A LAS EMISIONES DE CH<sub>4</sub>

Impacto Ambiental	UHE Porto Primavera (A1)	UHE Ilha Solteira (A2)	UHE Tucuruí (A3)	CH Itaipu (A4)	Pesos
UHE Porto Primavera (A1)	1	1/3	2	1/2	0,1611
UHE I. Solteira (A2)	3	1	4	2	0,4658
UHE Tucuruí (A3)	1/2	1/4	1	1/3	0,0960
CH Itaipu (A4)	2	1/2	3	1	0,2771
$\Sigma$ Columna	6,50	2,08	10,00	3,83	1,0000
Razón de consistencia: 0,0146					

De la tabla anterior se puede destacar lo siguiente, las centrales eléctricas fueron priorizadas en función de las emisiones de CH<sub>4</sub> de cada una de ellas. Por lo tanto, la central que menos emite CH<sub>4</sub> según las comparaciones realizadas es la UHE Ilha Solteira (A2). Por otro lado, la central que más emite CH<sub>4</sub> es la UHE Tucuruí (A3). En la Tabla III, se muestran los resultados de los pesos obtenidos para el criterio de Factor de Planta.

TABLA III. PONDERACIÓN DE LAS CENTRALES ELÉCTRICAS CON RESPECTO AL FACTOR DE PLANTA (FP)

Factor de Planta	FP	Normalización	Pesos
UHE Porto Primavera (A1)	0,7792	2/7	0,2767
UHE I. Solteira (A2)	0,6678	1/4	0,2371
UHE Tucuruí (A3)	0,5651	1/5	0,2006
CH Itaipu (A4)	0,8042	2/7	0,2856
Σ Columna	3		1,0000

En la tabla anterior se puede observar que, con las ponderaciones obtenidas a través de los cálculos, el mayor peso para el criterio Factor de Planta corresponde a la CH Itaipu, y el menor peso corresponde a la UHE Tucuruí. Los resultados de los pesos obtenidos para el criterio de evaluación correspondiente a la Potencia Instalada se muestran en la Tabla IV.

TABLA IV. PONDERACIÓN DE LAS CENTRALES ELÉCTRICAS CON RESPECTO A LA POTENCIA INSTALADA (PI)

Potencia Instalada	PI	Normalización	Pesos
UHE Porto Primavera (A1)	1.540	0	0,0563
UHE I. Solteira (A2)	3.444	1/8	0,1259
UHE Tucuruí (A3)	8.370	1/3	0,3060
CH Itaipu (A4)	14.000	1/2	0,5118
Σ Columna	27.354		1,0000

De la tabla anterior se puede resaltar que, el mayor peso de las priorizaciones con respecto a la Potencia Instalada corresponde a la CH Itaipu. Por otro lado, el menor peso corresponde a la UHE Porto Primavera. En la siguiente Tabla V, se observan los resultados de los pesos correspondientes a las ponderaciones de las centrales eléctricas con respecto al criterio de Flexibilidad Operativa.



TABLA V. PONDERACIÓN DE CENTRALES ELÉCTRICAS CON RESPECTO A LA FLEXIBILIDAD OPERATIVA

Flexibilidad Operativa	UHE Porto Primavera (A1)	UHE Ilha Solteira (A2)	UHE Tucuruí (A3)	CH Itaipu (A4)	Pesos
UHE Porto Primavera (A1)	1	3	3/4	3/2	0,3000
UHE Ilha Solteira (A2)	1/3	1	1/4	1/2	0,1000
UHE Tucuruí (A3)	4/3	4	1	2	0,4000
CH Itaipu (A4)	2/3	2	1/2	1	0,2000
Σ Columna	3,33	10,00	2,50	5,00	1,0000
Razón de consistencia: 0,0000					

En la tabla anterior se puede observar que, con las comparaciones efectuadas de las alternativas y a través de los cálculos realizados, el mayor peso para el criterio Flexibilidad Operativa pertenece a la UHE Tucuruí (A3), y el menor peso corresponde a la UHE Ilha Solteira (A2).

Por último, en la Tabla VI expuesta a continuación, se observan los resultados de los pesos correspondientes a las comparaciones pareadas de las centrales eléctricas con respecto al criterio de Confiabilidad.

TABLA VI. PONDERACIÓN DE CENTRALES ELÉCTRICAS CON RESPECTO A LA CONFIABILIDAD

Confiabilidad	UHE Porto Primavera (A1)	UHE Ilha Solteira (A2)	UHE Tucuruí (A3)	CH Itaipu (A4)	Pesos
UHE Porto Primavera (A1)	1	1/2	1/4	1/3	0,0960
UHE Ilha Solteira (A2)	2	1	1/3	1/2	0,1611
UHE Tucuruí (A3)	4	3	1	2	0,4658
CH Itaipu (A4)	3	2	1/2	1	0,2771
Σ Columna	10,00	6,50	2,08	3,83	1,0000
Razón de consistencia: 0,0146					

De la tabla anterior se puede destacar lo siguiente, las centrales eléctricas fueron priorizadas en función de la Confiabilidad de cada una de ellas. Por lo tanto, la central que posee el mayor peso según las comparaciones pareadas realizadas es la UHE Tucuruí (A3). Por otro lado, la central que posee el menor peso es la UHE Porto Primavera (A1).

Finalmente, los resultados de los pesos previos obtenidos son agrupados para conformar la matriz de ponderaciones de alternativas respecto a cada uno de los criterios; esta matriz es multiplicada por la matriz de ponderaciones de los criterios en función al objetivo principal. El producto de ambas matrices nos da como resultado la matriz de ponderación global de todas las centrales eléctricas en función de todos los criterios y las alternativas analizadas. Este resultado puede observarse en la siguiente Fig. 2.

$$\begin{bmatrix} 0,1611 & 0,2767 & 0,3000 & 0,0960 & 0,0563 \\ 0,4658 & 0,2371 & 0,1000 & 0,1611 & 0,1259 \\ 0,0960 & 0,2006 & 0,4000 & 0,4658 & 0,3060 \\ 0,2771 & 0,2856 & 0,2000 & 0,2771 & 0,5118 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,2000 \\ 0,2000 \\ 0,2000 \\ 0,2000 \\ 0,2000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1780 \\ 0,2180 \\ 0,2937 \\ 0,3103 \end{bmatrix}$$

Fig. 2. Ponderación global de las centrales eléctricas

### 4.3 Análisis y resultados de la valoración de la energía de la CH Itaipu

Para el proceso de valoración, ya fue calculada la ponderación de las alternativas consideradas comparables. Asimismo, los valores del precio de venta de energía de las centrales eléctricas brasileñas consideradas comparables son observables [29], a través de las publicaciones mensuales de la Cámara de Comercialización de Energía Eléctrica (CCEE), con datos consolidados de los resultados de las subastas de electricidad (ver Tabla VII). Posteriormente, se procedió a sumar dichos valores (las ponderaciones globales de las centrales previamente calculadas y los precios de venta de energía observados de la subasta), para luego calcular el ratio entre ellos. Finalmente, el valor de la energía de Itaipu en el mercado brasileño se calcula a través del producto entre el ratio calculado y la ponderación global que se había determinado con anterioridad para la alternativa de la CH Itaipu Binacional (alternativa considerada como objeto de valoración). Este proceso de valoración se detalla en la siguiente Tabla VII.

TABLA VII. PROCESO DE VALORACIÓN

Alternativas comparables	Precio de venta de energía (R\$/MWh)	Ponderación global de centrales
UHE Porto Primavera	217,67	0,1780
UHE Ilha Solteira	217,8	0,2180
UHE Tucuruí	299,49	0,2937
SUMA	734,96	0,6897
Ratio	$734,96 / 0,6897 = 1065,67$	
Valor de la energía de ITAIPU	$1065,67 \times 0,3103 =$	330,71 R\$/MWh
Tasa de cambio: 1 R\$ = 0.295937 USD		97,87 USD/MWh

Por lo tanto, considerando la tasa de cambio expresada en la tabla anterior (considerada como tasa actual al momento de realizar el cálculo), además de todos los criterios de evaluación y la realización del *benchmarking* con las centrales eléctricas brasileñas, la apreciación o el valor estimado de la energía de la Central Hidroeléctrica Itaipu, según el precio del mercado brasileño es de 97,87 USD/MWh.

## 5 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 podría afectar positivamente en diferentes áreas, debido a que esto se traduciría en un aumento de empleos, mejor educación y mayor inversión en salud; es decir, una mejora en la calidad de vida de los paraguayos. En ese sentido, este trabajo ha presentado el AHP como una herramienta de valoración multicriterio adecuada para el caso de estudio analizado. Se ha propuesto un nuevo 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. Además, es un método que facilita la reflexión del tomador de decisión, porque le permite considerar todas las posibilidades y razonar sobre la estructura de la metodología. Igualmente, con esto se pretende proporcionar a los tomadores de decisiones una herramienta con rigor científico, 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 los criterios de evaluación fueron: Impacto Ambiental, Factor de Planta, Potencia Instalada, Flexibilidad Operativa y Confiabilidad. Además, como caso de estudio fueron consideradas las siguientes alternativas: UHE Porto Primavera, UHE Ilha Solteira, UHE Tucuruí y como objeto de valoración la CH Itaipu Binacional. El resultado final del trabajo brinda una estimación o apreciación del valor de la energía de Itaipu en el mercado eléctrico brasileño, este valor está cuantificado en 97,87 USD/MWh bajo las hipótesis asumidas en la investigación, lo que representaría grandes beneficios para el Paraguay en muchos aspectos. Además, dicho valor estimado, se

podría considerar como referencia para los tomadores de decisión paraguayos, durante las futuras negociaciones de comercialización de la energía paraguaya en el mercado eléctrico del Brasil.

## 6 REFERENCIAS

- [1] L. Arce, “En la búsqueda de una estrategia global: La Política Externa del Paraguay. Cuadernos sobre Relaciones Internacionales, Regionalismo y Desarrollo”, vol. 6, no. 11, 2011, p. 105-127.
- [2] Saaty, T. L. “How to make a decision: the analytic hierarchy process”, *Interfaces*, vol. 24, no. 6, 1994, p. 19-43.
- [3] L. Jiménez and C. De la Torre Cuesta, “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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Hobbs B.F., Horn G.T.F. “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.
- [9] Rahman S., Frair L.C. “A hierarchical approach to electric utility planning. *International Journal of Energy Research*”, vol. 8, no. 2, 1984, p. 185-96.
- [10] E. W. Stein. “A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*”, 22 (2013), p. 640-654.
- [11] J. Ren, B.K. Sovacool. “Prioritizing low-carbon energy sources to enhance China’s energy security. *Journal of Energy Conversion and Management*”, 92 (2015), p. 129-136.
- [12] S. Ahmad, R.M. Tahar. “Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia. *Journal of Renewable Energy*”, 63 (2014), p. 458-466.
- [13] Gimeno Valero, M. Design of a valuation method of historical and artistic buildings with multicriteria valuation methods: AHP and AMUVAM.
- [14] Chiu, Y. J., & Chen, Y. W. (2007). Using AHP in patent valuation. *Mathematical and Computer Modelling*, 46(7), 1054-1062.
- [15] Reyna, S., & Cardells, R. F. (1999). Valoración AHP de los ecosistemas naturales de la Comunidad Valenciana. *Revista valenciana d’estudis autonòmics*, 57(2).
- [16] Marques-Perez, I., Segura, B., & Maroto, C. (2014). Evaluating the functionality of agricultural systems: Social preferences for multifunctional peri-urban agriculture. The “Huerta de Valencia” as case study. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12(4), 889-901.
- [17] R. Amarilla, H. Ojeda, M. García and G. Blanco. “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. IEEE, 2014, pp. 663-668.
- [18] Paucar Samaniego, M. A. (2014). Estudio de emisiones de metano producidas por embalses en centrales hidroeléctricas en Ecuador (Master's thesis, Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile).
- [19] Datos técnicos de la UHE Porto Primavera (en línea). Disponible en: <http://tinyurl.com/hy76mk4>
- [20] Datos técnicos de la UHE Ilha Solteira (en línea). Disponible en: <http://tinyurl.com/z78q7du>
- [21] Datos técnicos de la UHE Tucuruí (en línea). Disponible en: <http://tinyurl.com/grnuwvk>
- [22] Datos técnicos de la CH Itaipu Binacional (en línea). Disponible en: <http://tinyurl.com/z5dat7r>
- [23] Santos Rocha, R. (2008). Ferramenta para avaliação da energia firme baseada em técnica de pontos interiores.
- [24] Eletronorte em Números 2010. Eletrobrás. Ministério de Minas e Energia.

- [25] Relatório de Administração e Demonstrações Financeiras 2012.
- [26] Plano da Operação elétrica 2014/2015. PEL 2013. Relatório Executivo.
- [27] MOTIVOS PARA PROMOVER LA HIDROELECTRICIDAD (en línea). Disponible en: <https://tinyurl.com/z92cejd>
- [28] Riera Romero, R. S., & Espinoza Bustos, M. A. (2013). Evaluación de confiabilidad en las unidades generadoras de CELEC EP-Hidropaute (Mazar & Molino) utilizando el método de simulación de Montecarlo (Bachelor's thesis). P. 31.
- [29] Câmara de Comercialização de Energia (en línea). Disponible en: <http://tinyurl.com/j3c4y6w>



Conseil International des Grands Réseaux Electriques  
Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas  
Comité Nacional Paraguayo

## XVII ENCUENTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DEL CIGRE



Paraguay - Ciudad del Este  
21 al 25 de mayo del 2017

# El Comité Nacional Paraguayo del CIGRE, certifica que :

FÉLIX FENANDO FERNÁNDEZ BALBUENA

Ha participado del Encuentro Regional Iberoamericano del CIGRE – XVII  
ERIAc, en carácter de:

AUTOR Y EXPOSITOR

Ing. Hugo O. Zarate  
PRESIDENTE ORGANIZACIÓN XVII ERIAC

Ing. Helio Pereira  
PRESIDENTE CIGRE PARAGUAY

PATROCINADORES:



Categoría	Grupo de Estudio	Título del Trabajo
AUTOR	C1	ANÁLISIS DE INTERACCIONES ENTRE PROCESOS DE EXPANSIÓN DE GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON DINÁMICA DE SISTEMAS
EXPOSITOR	C5	ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE AHORRO EN EL CONSUMO DE ELECTRICIDAD DEL SECTOR RESIDENCIAL DEL PARAGUAY, IMPLEMENTANDO MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA
AUTOR Y EXPOSITOR	C5	VALORACIÓN MULTICRITERIO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE ITAIPU BINACIONAL EN EL MERCADO ELÉCTRICO BRASILEÑO



Conseil Internationale des Grands Réseaux Electriques  
 Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas  
 Comité Nacional Paraguayo