



## Valoración multicriterio de la energía eléctrica de Itaipu Binacional en el mercado eléctrico brasileño

Félix Fernández, Raúl Amarilla, Gerardo Blanco, Victorio Oxilia

Grupo de Investigación en Sistemas Energéticos, 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 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.

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 serán valoradas mediante un *benchmarking* con el valor de centrales de generación eléctrica que comercializan en el mercado mayorista brasileño.

### PALABRAS CLAVES

Energía, centrales eléctricas, Itaipu, mercado, valoración multi-criterio, AHP, *benchmarking*.



XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
25 y 26 de Agosto de 2016

---

## 1. INTRODUCCION

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 a 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, sean éstas térmicas o hidroeléctricas. 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 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, 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  $A = (a_{ij})$ ,  $a_{ij} = \frac{W_i}{W_j}$ ,  $i, j, k =$

$1, \dots, n$  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

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
25 y 26 de Agosto de 2016

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]. Igualmente, así como fue mencionado, la técnica del AHP se ha aplicado como enfoque en la estimación de un valor, en la valoración de bienes o activos financieros, en la valoración de riesgos de un proyecto, y en la valoración económica de activos ambientales [3], [4]. Por lo tanto, se puede observar que el AHP es un método 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 [13].

## 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 y Usinas Termoeléctricas del mercado eléctrico brasileño. A continuación se describen los criterios mencionados.

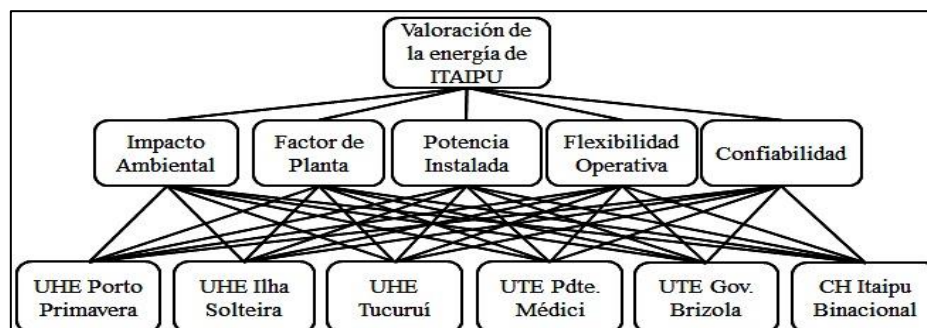


Fig. 1. Árbol jerárquico

*Impacto ambiental:* el indicador considerado es la emisión de gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ) de cada central eléctrica, este indicador ha sido ponderado considerando los rangos de emisiones de  $\text{CO}_2$  según [28],

y el tamaño del embalse de cada central hidroeléctrica, estos datos técnicos se han obtenido de [18], [19], [20], [21], [22] y [23]. Finalmente, estos datos son procesados y normalizados para hallar el vector propio de este criterio.

*Factor de planta:* el indicador de este criterio nos muestra la capacidad de generación de energía 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. Para el cálculo de este criterio, los datos de generación de energía se obtuvieron de [14], [15], [16] y [17]; y la potencia instalada de [18], [19], [20], [21], [22] y [23]. Finalmente, estos resultados son normalizados de manera a determinar su vector propio.

*Flexibilidad operativa:* el indicador de este criterio nos 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 en el análisis. Para este criterio, la ponderación fue realizada en forma cualitativa, a través de juzgamientos de expertos en el área de energía. 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 [24], 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 [25]. 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:* 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 [26]. Por lo tanto, las alternativas fueron comparadas bajo ésta condición, además de considerar el número de unidades generadoras en operación de cada central, en el momento de efectuar las ponderaciones respectivas. Los datos se obtuvieron de [18], [19], [20], [21], [22] y [23].

*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 nominales. Para el análisis de este criterio de evaluación, los datos de potencia instalada fueron obtenidos de [18], [19], [20], [21], [22] y [23]. Esta información fue procesada para su normalización y así, posteriormente hallar el vector propio correspondiente.

### 3.2 Alternativas analizadas

Las alternativas consideradas comparables se pueden observar en la Fig. 1, dichas alternativas son Usinas tanto Hidroeléctricas como Termoeléctricas que se encuentran en operación en el mercado eléctrico brasileño. Fueron seleccionadas de acuerdo a su importancia en la operación del sistema interconectado del vecino país. Las alternativas son las siguientes centrales: 1.- UHE Porto Primavera, 2.- UHE Ilha Solteira, 3.-

UHE Tucuruí, 4.- UTE Presidente Médici, 5.- UTE Gobernador Brizola, y por último, la alternativa analizada como objeto de valoración es la 6.- CH Itaipu Binacional.

#### 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 ponderación de los criterios de evaluación, donde se analiza el caso donde las comparaciones por pares son equilibradas con relación al objetivo principal (ponderaciones de 1), que para el caso de estudio es el “valor de la energía de Itaipu en el mercado eléctrico brasileño”, lo cual implica que cada criterio afecta de igual manera al valor de la energía comercializada en el mercado mayorista brasileño. El resultado de dicha comparación nos determina una matriz de ponderación de todos los criterios (Tabla I).

**Tabla I. Ponderación de criterios de evaluación**

Objetivo: Valoración de energía de la CH Itaipu	Ponderaciones	Normalización	Pesos
Impacto Ambiental	1	1/5	0,2000
Factor de Planta	1	1/5	0,2000
Flexibilidad Operativa	1	1/5	0,2000
Confiabilidad	1	1/5	0,2000
Potencia Instalada	1	1/5	0,2000
$\sum$ Columna	5	1	1,0000

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.

##### 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<sup>1</sup>. 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. 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. 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 [13].

<sup>1</sup> La ventaja comparativa que ofrece este método es la introducción de ambas variables, lo que no es tan trivial conseguirlo con otros métodos.

**XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
25 y 26 de Agosto de 2016

**Tabla II. Ponderación de centrales eléctricas con respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub>**

Impacto Ambiental	UHE Porto Primavera	UHE Ilha Solteira	UHE Tucuruí	UTE Pte. Médici	UTE Gov. Leonel Brizola	CH Itaipu	Pesos
UHE Porto Primavera	1	1/3	2	4	3	1/2	0,1657
UHE Ilha Solteira	3	1	4	6	5	2	0,3873
UHE Tucuruí	1/2	1/4	1	3	2	1/3	0,1064
UTE Pte. Médici	1/4	1/6	1/3	1	1/2	1/5	0,0448
UTE Gov. Leonel Brizola	1/3	1/5	1/2	2	1	1/4	0,0681
CH Itaipu	2	1/2	3	2	4	1	0,2277
$\Sigma$ Columna	7,08	2,45	10,83	18,00	15,50	4,28	1,0000
Razón de consistencia: 0,0182							

En la Tabla III, se muestran los resultados de los pesos obtenidos para el criterio de Factor de Planta.

**Tabla III. Ponderación de centrales eléctricas con respecto al Factor de Planta (FP)**

Factor de Planta	FP	Normalización	Pesos
UHE Porto Primavera	0,7792	1/4	0,2340
UHE Ilha Solteira	0,6678	1/5	0,2006
UHE Tucuruí	0,5651	1/6	0,1697
UTE Presidente Médici	0,3790	1/9	0,1138
UTE Gov. Leonel Brizola	0,1341	0	0,0403
CH Itaipu	0,8042	1/4	0,2415
$\Sigma$ Columna	3	1	1,0000

Los resultados de los pesos obtenidos para el criterio de evaluación correspondiente a la Potencia Instalada se muestran en la Tabla IV.

**XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
25 y 26 de Agosto de 2016

**Tabla IV. Ponderación de centrales eléctricas con respecto a la Potencia Instalada (PI)**

Potencia Instalada	PI	Normalización	Pesos
UHE Porto Primavera	1.540	0	0,0534
UHE Ilha Solteira	3.444	1/8	0,1193
UHE Tucuruí	8.370	2/7	0,2900
UTE Presidente Médici	446	0	0,0155
UTE Gov. Leonel Brizola	1.058	0	0,0367
CH Itaipu	14.000	1/2	0,4851
$\Sigma$ Columna	28.858	1	1,0000

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	UHE Ilha Solteira	UHE Tucuruí	UTE Pte. Médici	UTE Gov. Leonel Brizola	CH Itaipu	Pesos
UHE Porto Primavera	1	3	3/4	3/5	1/2	1 1/2	0,1414
UHE Ilha Solteira	1/3	1	1/4	1/5	1/6	1/2	0,0471
UHE Tucuruí	1 1/3	4	1	4/5	2/3	2	0,1886
UTE Pte. Médici	1 2/3	5	1 1/4	1	5/6	2 1/2	0,2357
UTE Gov. L. Brizola	2	6	1 1/2	1 1/5	1	3	0,2829
CH Itaipu	2/3	2	1/2	2/3	1/3	1	0,1042
$\Sigma$ Columna	7,00	21,00	5,25	4,47	3,50	10,50	1,0000
Razón de consistencia: 0,0174							

Por último, en la Tabla VI mostrada a continuación, se exponen los resultados de los pesos correspondientes a las ponderaciones de las centrales eléctricas con respecto al criterio de Confiabilidad.



**XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
25 y 26 de Agosto de 2016

**Tabla VI. Ponderación de centrales eléctricas con respecto a la Confiabilidad**

Confiabilidad	UHE Porto Primavera	UHE Ilha Solteira	UHE Tucuruí	UTE Pte. Médici	UTE Gov. L. Brizola	CH Itaipu	Pesos
UHE Porto Primavera	1	1/2	1/4	2	3	1/3	0,1039
UHE Ilha Solteira	2	1	1/3	3	4	1/2	0,1627
UHE Tucuruí	4	3	1	5	6	2	0,3831
UTE Pte. Médici	1/2	1/3	1/5	1	2	1/4	0,0662
UTE Gov. Leonel Brizola	1/3	1/4	1/6	1/2	1	1/5	0,0438
CH Itaipu	3	2	1/2	3	5	1	0,2403
$\Sigma$ Columna	10,83	7,08	2,45	14,50	21,00	4,28	1,0000
Razón de consistencia: 0,0204							

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.

$$\begin{bmatrix} 0,1657 & 0,2340 & 0,0534 & 0,1414 & 0,1039 \\ 0,3873 & 0,2006 & 0,1193 & 0,0471 & 0,1627 \\ 0,1064 & 0,1697 & 0,2900 & 0,1886 & 0,3831 \\ 0,0448 & 0,1138 & 0,0155 & 0,2357 & 0,0662 \\ 0,0681 & 0,0403 & 0,0367 & 0,2829 & 0,0438 \\ 0,2277 & 0,2415 & 0,4851 & 0,1042 & 0,2403 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,2000 \\ 0,2000 \\ 0,2000 \\ 0,2000 \\ 0,2000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1397 \\ 0,1834 \\ 0,2276 \\ 0,0952 \\ 0,0943 \\ 0,2598 \end{bmatrix}$$

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 es conocida la ponderación de las alternativas consideradas comparables. Asimismo, los valores de precios de venta de energía de las centrales eléctricas brasileñas consideradas comparables son observables [27], a través de publicaciones mensuales 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 y la ponderación global que se había determinado para la CH Itaipu Binacional. Este proceso de valoración se detalla en la siguiente Tabla VII.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
25 y 26 de Agosto de 2016

Tabla VII. Proceso de valoración

Alternativas comparables	Precio de venta de energía (R\$/MWh)	Ponderación global de centrales
UHE Porto Primavera	198,43	0,1398
UHE Ilha Solteira	217,8	0,1834
UHE Tucuruí	170,51	0,2276
UTE Pte. Médici	213,26	0,0952
UTE Gov. Brizola	289,55	0,0943
SUMA	1089,55	0,7403
Ratio	1471,7	
Valor de energía de ITAIPU	$1471,7 \times 0,2598 =$	382,3 R\$/MWh
Tasa de cambio: 1 R\$ = 0.295937 USD		113,16 USD/MWh

Por lo tanto, considerando la tasa de cambio considerada, 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 análisis realizado sería de 113,16 USD/MWh.



XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
25 y 26 de Agosto de 2016

---

## 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 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, UTE Presidente Médici, UTE Governador Brizola, y como objeto de valoración la CH Itaipu Binacional. El resultado muestra que el valor de la energía de Itaipu en el mercado eléctrico brasileño estaría en torno a 113,16 USD/MWh bajo las hipótesis asumidas en el análisis. Este valor debería servir de referencia para los tomadores de decisión paraguayos durante las futuras negociaciones de comercialización de energía paraguaya en el mercado eléctrico de Brasil.

---

**BIBLIOGRAFIA**

- [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] 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.
- [14] Rafael Santos Rocha. “Ferramenta para Avaliação da Energia Firme Baseada em Técnica de Pontos Interiores”, p. 45-47.
- [15] Eletronorte em Números 2010. Eletrobrás. Ministério de Minas e Energia.
- [16] Relatório de Administração e Demonstrações Financeiras 2012.
- [17] Plano da Operação elétrica 2014/2015. PEL 2013. Relatório Executivo.
- [18] Datos técnicos de UTE Presidente Médici. Disponible en: <http://tinyurl.com/gnyz6ve>
- [19] Datos técnicos de UHE Porto Primavera. Disponible en: <http://tinyurl.com/hy76mk4>
- [20] Datos técnicos de UHE Ilha Solteira. Disponible en: <http://tinyurl.com/z78q7du>
- [21] Datos técnicos de UHE Tucuruí. Disponible en: <http://tinyurl.com/grnuwpg>
- [22] Datos técnicos de UTE Governador Brizola. Disponible en: <http://tinyurl.com/gsey9x9>
- [23] Datos técnicos de CH Itaipu Binacional. Disponible en: <http://tinyurl.com/z5dat7r>
- [24] S. P. Arango, F. M. Sánchez, G. V. Sánchez and E. de Ciencias, “Metodología para la valoración de proyectos de generación eléctrica en Colombia vía opciones reales”, 2015, p. 10.



**XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
**25 y 26 de Agosto de 2016**

---

- [25] Alberto Carbajo Josa. “La integración de las energías renovables en el sistema eléctrico”. Documento de trabajo 176/2012. Fundación Alternativas. ISBN: 978-84-92957-82-8, p. 5-20. Disponible en: <http://tinyurl.com/jn2u86b>
- [26] G. Michael Curley. “Reliability Analysis of Power Plant Unit Outage Problems”. Generation Consulting Service, LLC, 2013, p. 1-42. Disponible en: <http://tinyurl.com/jtnrore>
- [27] Câmara de Comercialização de Energia. Disponible en: <http://tinyurl.com/j3c4y6w>
- [28] F. Koch, “Externalities and Energy Policy: The Life Cycle Analysis Approach”. Workshop Proceedings, Paris, France, 2001, p. 132-135.