



Priorización multi-criterio de tecnologías de generación de energía eléctrica en el Paraguay

Diego Martínez, José Saldaña, Félix Fernández, Gerardo Blanco, Victorio Oxilia

Grupo de Investigación en Sistemas Energéticos, Facultad Politécnica - UNA

Paraguay

RESUMEN

Hoy en día, el Paraguay cuenta con un importante excedente de energía eléctrica. No obstante, la demanda crece a pasos acelerados debida principalmente al crecimiento económico acelerado del país. Con esta tendencia, se necesitaría desarrollar nuevas fuentes de generación eléctrica en el mediano plazo, de forma a evitar un posible déficit de energía eléctrica alrededor del año 2030. La selección de las fuentes de energía a ser aprovechadas podría ser analizada desde diversos puntos de vista, muchas veces incluso contrapuestos, p.e. criterios técnicos y ambientales. En este contexto, de manera a tomar una decisión consistente e integral se requiere el abordaje del problema desde una perspectiva multi-criterio que incorpore los puntos de vista de todos los sectores afectados por la decisión. Así, este trabajo presenta una propuesta metodológica para la aplicación del método de decisión multi-criterio, denominado Proceso Analítico Jerárquico (AHP), en la priorización del aprovechamiento de las futuras fuentes de generación de energía eléctrica en el Paraguay. Con tal finalidad, se ha definido el objetivo y se ha realizado una revisión de la literatura con respecto a los métodos multi-criterio y su aplicación a problemas de selección de alternativas de generación de energía eléctrica. Se ha expuesto los fundamentos del AHP y definido las fuentes de generación de energía eléctrica de aprovechamiento factible en el país. A partir del estudio y revisión mencionados anteriormente, se ha identificado un conjunto de criterios y sub-criterios a tener en cuenta en la selección de las fuentes de generación. El conjunto de criterios, sub-criterios y alternativas no cuantificables, luego de ser evaluados, se someten a valoraciones o juicios emitidos por un grupo de expertos. Estos juicios, una vez procesados, se incluyen a la metodología de análisis jerárquico con el objeto de priorizar las alternativas más convenientes para el Paraguay. Posteriormente, se efectúa un análisis de sensibilidad para determinar si la valoración efectuada por el grupo de expertos es consistente y se establece cual es la alternativa más adecuada para resolver el problema de selección.

PALABRAS CLAVES

Demanda de energía, alternativas de generación de energía, análisis multi-criterio, AHP.



1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el Paraguay cuenta con un gran excedente de energía eléctrica. No obstante, la demanda crece aceleradamente debido al crecimiento económico impulsado por el sector inmobiliario, agro-ganadero y en menor escala del desarrollo industrial del país. Con esta tendencia, se estima que existiría la necesidad crear nuevas fuentes de generación, de lo contrario, tendríamos un déficit de energía en el mediano plazo [1].

Elegir la fuente de generación que se ajuste a requerimientos de distintos sectores no es una tarea trivial. Quizás años anteriores, solo criterios técnicos y económicos eran considerados a la hora de construir una nueva central eléctrica. Hoy en día, la situación se torna diferente debido a los varios criterios existentes al momento de realizar un análisis para la elección de qué tipo de central debe ser construida, debido principalmente a la heterogeneidad de los puntos de vista de diversos sectores de la sociedad. Un ejemplo de esto, sería considerar el impacto ambiental, económico, social y técnico, donde bajo estos criterios una fuente de generación ideal es la que menos impacto ambiental ocasiona invirtiendo el menor capital posible, generando un alto beneficio socio económico y, con la mejor característica técnica posible. Este tipo de central es casi imposible de obtener, existiendo normalmente una relación de compromiso entre los criterios para las diversas alternativas analizadas. En este contexto, es necesaria una metodología que permita la toma de decisiones sean analizando distintos puntos de vista en función de una ponderación consistente de los criterios. Para contribuir a la solución de este problema, la presente investigación tiene por objetivo principal proponer el método de toma de decisiones denominado Proceso de Análisis Jerárquico, de manera a clasificar o realizar un *ranking* de diferentes tipos de fuentes de generación de energía eléctrica basada en priorizaciones de criterios y sub-criterios, a fin de identificar la opción más conveniente para el Paraguay.

En este trabajo se presentan las siguientes alternativas de centrales de generación: hidroeléctrica, térmica de ciclo combinado a gas natural importado de Bolivia, térmica de ciclo combinado a gas natural utilizando los recursos propios del Paraguay, nuclear, solar fotovoltaica, eólica, y térmica por medio de biomasa forestal. Tales alternativas fueron evaluadas teniendo en cuenta los siguientes indicadores para los criterios: Técnico (Potencia típica, Madurez tecnológica, Disponibilidad de Combustible, Factor de capacidad y Eficiencia); Financiero (Costo de instalación, Costo de operación y mantenimiento, Costo de combustible); Ambiental (Superficie ocupada, Emisión de CO₂); y por último el criterio Socio-político económico (Aceptación social, Interés del gobierno y Creación de fuentes de trabajo).

Finalmente, se pretende sintetizar toda la información recabada a través de encuestas a expertos del área energética y transformarla en forma numérica y adimensional. Así, esta información es insumo de la herramienta del AHP para obtener una clasificación de las fuentes de generación analizadas, con el objetivo de seleccionar la opción más conveniente para el Paraguay.

2 PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO

El método del AHP se desarrolló durante los años setenta por el matemático Thomas Saaty, buscando el desarrollo de una herramienta sistemática para la evaluación y selección de alternativas que tengan un marco bien fundado, sólido en su fundamento matemático y simple en su aplicación [2].

2.1 AHP EN 4 ETAPAS

ETAPA A

En la etapa A se construye una jerarquía básica, conformada por el objetivo general, los criterios y sub-criterios que, a su vez, pueden estar constituidos por diversos niveles jerárquicos. La jerarquía se construye de modo tal que los elementos de un mismo nivel sean del mismo orden de magnitud y puedan relacionarse con algunos o todos los elementos del siguiente nivel.

En una jerarquía típica, en el nivel más alto se localiza el problema de decisión (objetivo). Los elementos que afectan a la decisión son representados en los niveles inmediatos inferiores, de forma que los criterios ocupan los niveles intermedios. Por último, suele representarse en el nivel más bajo, las opciones de decisión o alternativas,



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

aunque estas más que conformar la estructura jerárquica constituyen las distintas respuestas posibles al problema o las posibilidades diferentes de satisfacer en algún grado el objetivo general.

Su construcción es la parte más creativa del proceso y requiere de un consenso entre todas las partes implicadas en el proceso de decisión. Esto es particularmente válido en el caso de proyectos complejos abordados por equipos multidisciplinarios.

ETAPA B

Una vez construida la estructura jerárquica del problema se da paso a la etapa B del proceso del AHP: la valoración de los elementos, es decir, el decisor debe emitir sus juicios de valor o preferencias en cada uno de los niveles jerárquicos establecidos.

Esta tarea consiste en una comparación de valores subjetivos “por pares” (comparaciones binarias). Estas comparaciones se basan tanto en factores cuantitativos como cualitativos.

Dicha comparación puede realizarse por medio de una escala de medidas. La propuesta de Saaty se basa en realizar las ponderaciones según el siguiente rango: 1 (corresponde a la igualdad de importancia con respecto a la comparación), 3 (moderadamente importante), 5 (importante), 7 (muy importante) y 9 (extremada importancia con respecto a su comparación).

ETAPA C

El paso siguiente, etapa C, comprende el análisis de las distintas opciones (alternativas) propuestas para valorar en qué medida éstas satisfacen cada uno de los sub-criterios.

ETAPA D

Finalmente, en esta etapa se sintetiza el resultado a partir del aporte relativo de cada alternativa a cada uno de los criterios y sub-criterios y del nivel de preferencia relativo atribuido a éstos, de tal manera a alcanzar el objetivo general.

Como etapa final de este proceso, puede elaborarse un análisis de sensibilidad dado que el resultado logrado es dependiente, en buen grado, de los niveles jerárquicos establecidos por el decisor y de los juicios de valor de los elementos constitutivos de la estructura jerárquica.

El análisis de sensibilidad consiste en variar los pesos de los criterios y evaluar qué alternativas se obtienen con mayor frecuencia como resultado. Para el caso de estudio, el análisis de sensibilidad consiste en hacernos la siguiente pregunta: ¿qué pasa si se varía el peso para un determinado criterio? Para este trabajo se evalúa un total de 10 análisis de sensibilidad, realizando priorizaciones de un solo criterio y además, priorizaciones de a dos criterios; la mejor alternativa de cada caso se introduce en una tabla de comparaciones pareadas de criterios como se muestra en la Tabla VI. La consistencia de las priorizaciones realizadas es posible evaluar mediante el Ratio de Consistencia (CR), que al ser menor que 10%, indica que las ponderaciones emitidas son consistentes. Por último, la alternativa que se da como resultado con mayor frecuencia es seleccionada como la mejor alternativa para el caso de estudio de esta investigación.

3 RANKING DE ALTERNATIVAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA EL PARAGUAY APLICANDO LA METODOLOGÍA DEL AHP

3.1 Utilización del AHP para la selección de fuentes de generación de energía eléctrica

Los enfoques multi-criterio se han utilizado en los últimos años para la clasificación de diversas tecnologías de producción de energía eléctrica [3], así como en la clasificación estratégica de un plan óptimo integral de los

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

recursos [4]. Además, se ha aplicado como enfoque para la evaluación de la seguridad energética de los países que son dependientes de combustibles fósiles [5]. Evaluar la mencionada problemática para el caso particular del Paraguay, es una tarea pendiente hoy en día. Por lo tanto, se ha propuesto el AHP, con el fin de brindar una herramienta de toma de decisión para el caso de estudio analizado.

3.2 Criterios, Sub-Criterios y Alternativas

Las alternativas son analizadas en base a los siguientes criterios: Técnico, Ambiental, Socio-político-económico y Financiero, en la Figura 1 se muestra los niveles de jerarquía considerados.

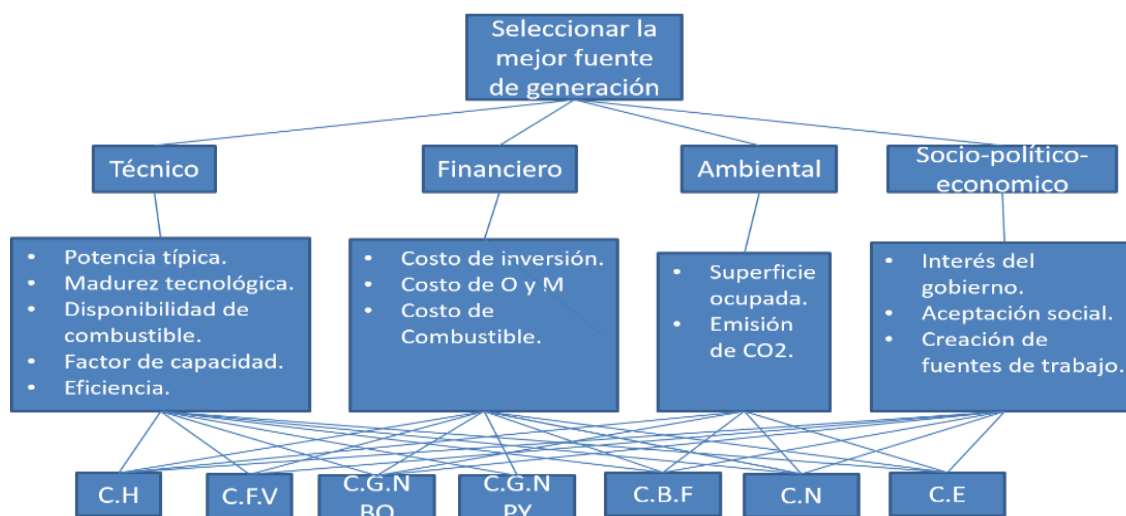


Fig. 1. Árbol jerárquico del proceso de toma de decisión

3.3 Indicadores de los criterios de evaluación

El presente estudio examina diversos criterios cualitativos para la selección de las opciones de generación de energía eléctrica, estos son priorizados en base a dichos criterios. Igualmente, sobre la base de los criterios cuantitativos es realizado el proceso de priorización [6]. Cabe destacar que la metodología del AHP permite introducir tanto variables cuantitativas como cualitativas. A continuación se describen los criterios considerados para este trabajo:

Criterio Técnico:

- **Potencia típica:** Se basa en tamaños aproximados para cada central eléctrica. Todas las centrales para el caso de estudio son de escala utilitaria y mayores a 5 MW. La alternativa hidroeléctrica lidera con 4.600 MW, mientras que la alternativa con menor valor es la central a biomasa, con 50 MW, los datos fueron obtenidos de [7], [11], y pueden observarse en la Tabla I.
- **Madurez tecnológica:** Está relacionada con fallas iniciales reducidas y con la tecnología comercialmente disponible. Es un sub-criterio analizado mediante los juicios emitidos por el panel de expertos. Al ser un país poseedor de varias centrales hidroeléctricas, los expertos consideran a la alternativa hidroeléctrica con mayor valor, y ante la ausencia total de una fuente de energía nuclear, sería ésta la menos favorable para este sub-criterio (Tabla IV).
- **Disponibilidad de combustible:** Indica cuán fácil es obtener la fuente de alimentación de cada central dependiendo de su tipo. Ante la abundancia de ríos, los expertos calificaron a las hidroeléctricas como la alternativa más valorada para este sub-criterio, y a la central nuclear la menos valorada, ya que implica importación de la materia prima (Tabla IV).

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

- Factor de capacidad: Indica el cociente entre la energía real generada por la central eléctrica durante un período (generalmente anual), y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante ese mismo período, conforme a los valores nominales de las placas de identificación de los equipos, la Tabla I indica que el gas natural posee un mayor factor de capacidad, mientras que la solar posee la menor, debido a que las variaciones climáticas diarias afectan la energía solar irradiada a la tierra. Para este indicador los datos fueron obtenidos de [8].
- Eficiencia: La eficiencia de una planta varía extensamente, desde un 90% para las hidroeléctricas hasta un 25,3% para las turbinas en una central térmica de biomasa. La eficiencia de las fuentes no renovables fueron calculadas mediante el *heat rate*. El *heat rate* está dada por la siguiente ecuación (Ec. 1):

$$\phi_{hr} = H / E \quad (1)$$

Donde ϕ_{hr} es el *heat rate* (BTU/kWh, kJ/kWh), H es el calor suministrado a la planta durante un periodo de tiempo (BTU, kJ), E es la producción de energía de la planta en el periodo (kWh). Para calcular la eficiencia de una planta de energía expresado en porcentaje, se divide la cantidad de BTU contenido en 1 kWh (cuyo valor es 3412 BTU/kWh), por el *heat rate*. Por otro lado, la eficiencia de las fuentes de energías renovables no se puede calcular mediante el *heat rate*, debido a que no requieren calor para producir electricidad. Las eficiencias de las fuentes de generación solar, eólica, biomasa e hidroeléctrica fueron obtenidas haciendo un promedio entre la eficiencia mínima y máxima de cada tipo de fuente. Considerando estos datos, la central hidroeléctrica posee la mayor eficiencia con un 90%, siendo la central fotovoltaica la fuente menos eficiente con tan sólo un 20% (Tabla I). Para este indicador los datos fueron obtenidos de [8].

Criterio Financiero

- Costo de instalación: Es el costo en dólares por kW instalado que se requiere invertir para la construcción de una central sin contar con los intereses generados por préstamos y bonos. La alternativa más costosa es la central nuclear, con 3.000 USD/kW, mientras que las más económicas son las dos opciones de central a gas natural, con 500 USD/kW (Tabla 1). Para este indicador los datos fueron obtenidos de [10], [12], [16].
- Costo de operación y mantenimiento: Se refiere a los costos fijos y variables por kWh suministrados que se requieren para operar y mantener la central. Las alternativas más económicas son las centrales a gas con un costo de O&M de 0,0095 USD/kWh, mientras la más costosa es la central nuclear, con un costo de 0,0862 USD/kWh. Los datos para este indicador fueron obtenidos de [12], [13], [14], [17].
- Costo de combustible: Para facilitar la comparación, todos los combustibles son convertidos a USD/kWh. Como se observa en la Tabla I, las fuentes de energía renovable a excepción de biomasa, el costo de combustible es cero. Los más costosos son las dos alternativas a gas natural, cuyos valores equivalen a las centrales a gas natural, con un costo de 0,0095 USD/kWh. Para este indicador los datos fueron obtenidos de [12], [15], [18].

Criterio Ambiental

- La superficie ocupada: Se basa en la cantidad de metros cuadrados ocupado por kW instalado de cada central. Debido a la superficie inundada, la alternativa hidroeléctrica es la menos beneficiada en este sub-criterio, con 61.739 m²/kW ocupados. La alternativa que ocupa menos superficie es central nuclear, con 471 m²/kW (Tabla I). Los datos de este indicador fueron obtenidos de [10], [11], [12], [15].
- La emisión de CO₂. Se basa en la cantidad de gramos de CO₂ que emite una central por kWh generado. La central a biomasa es la que más gases emite por energía generada, y las centrales nuclear, solar, fotovoltaica e hidroeléctrica poseen emisión igual a cero (Tabla I). Para este indicador los datos fueron obtenidos de [9].

Criterio Socio-político económico

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

- Aceptación social: Este sub-criterio indica la aceptación de la sociedad afectada en el área de influencia de la central a instalar. Los expertos consideraron que las centrales fotovoltaicas y eólicas poseen mayor aceptación social, y que la central nuclear es la menos favorable desde este punto de vista (Tabla IV).
- Interés del gobierno: Se refiere al interés de las autoridades gubernamentales en apoyar, financiar, y/o facilitar relaciones diplomáticas para la ejecución de las centrales generadoras. Los expertos calificaron a la central fotovoltaica con la mayor valoración y a la central nuclear con el menor valor (Tabla IV).
- Creación de fuentes de trabajo: Este sub-criterio indica cuántos puestos de trabajo son creados a lo largo del ciclo de vida de cada central incluyendo el diseño, construcción, operación, mantenimiento, etc. El estudio hecho por WEI realiza el cociente entre los años de trabajo promedio de un empleado (*job-years*) por unidad de energía generada (GWh) a lo largo del ciclo de vida de la central. Considerando estos datos, las dos opciones a gas natural poseen el menor valor, mientras que el mayor valor posee la alternativa fotovoltaica (Tabla I). Para este indicador, los datos se obtuvieron de [8].

TABLA I
MATRIZ DE CRITERIOS CUANTITATIVOS

	Potencia Típica	Factor de capacidad	Eficiencia	Costos de instalación	Costos de O&M	Costo de combustible	Superf. Ocupada	Emisión de CO ₂	Creación de fuentes de trabajo
	MW	(%)	(%)	USD/kW	USD/kWh	USD/kWh	m ² /MW	(g-CO ₂ /kWh)	(job-years/GWh)
Central nuclear	2200	90	32,6	1.847	0,0862	0,016	471	0	0,14
Biomasa	50	83	25,3	3.050	0,0406	0,0087	78073	950	0,21
Gas natural importado de Bolivia	85	92	31,8	500	0,0095	0,0095	533,049	370	0,11
Gas natural explotando recursos propios del Paraguay	85	92	31,8	500	0,0095	0,0095	533,049	370	0,11
Central eólica	100	44	35	1.200	0,0109	0	3000	0	0,17
Central fotovoltaica	150	22	20	4.000	0,0674	0	20000	0	0,87
Central hidroeléctrica	4600	57	90	3000	0,0106	0	61739,1	0	0,27

4 CASO DE ESTUDIO

Este trabajo analiza un caso de estudio que asume las posibles alternativas de generación de energía eléctrica en el Paraguay, indicando sus características más importantes:

- Alternativa 1 – Central nuclear: para los cálculos de costos y superficie ocupada, se toma como modelo la Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, ubicada en Brasil. Esta central posee dos unidades generadoras Angra 1 y 2 que se encuentran operativas, y Angra 3 en fase de construcción. Para el cálculo de costo de combustible no se consideran los costos de traslado del producto energético final (pastillas de uranio) hasta el Paraguay.
- Alternativa 2 – Central a biomasa: central de combustión directa con cogeneración, del tipo forestal a partir de la plantación de eucalipto. Esta fuente de energía se considera como renovable. Se considera la superficie ocupada para la reforestación de la biomasa.

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

- Alternativa 3 – Central a gas natural: En este caso estudio no se considera el costo de instalación del gasoducto, obtenido mediante la explotación de los recursos propios del Paraguay.
- Alternativa 4 – Central a gas natural: En este caso estudio no se considera el costo de instalación del gasoducto, obtenido mediante la importación de gas de Bolivia.
- Alternativa 5 – Central fotovoltaica: Se utiliza un tipo de panel fotovoltaico del tipo silicio policristalino debido a su menor costo, es libre de emisiones de CO₂ y de rápida implementación.
- Alternativa 6 – Central eólica: Las características se obtuvieron de valores promedios obtenidos de las fuentes bibliográficas [3], [7], [9], [10], [13].
- Alternativa 7 – Central hidroeléctrica: en un análisis independiente, se ha utilizado el AHP para la evaluación de los distintos proyectos hidroeléctricos del Paraguay, ya sean centrales de gran envergadura o pequeñas centrales. Debido a la gran cantidad de proyectos se torna difícil su inclusión en el total de las alternativas disponibles para el análisis global. En esta parte del estudio se obtuvo que la mejor alternativa fue la central hidroeléctrica Itacua, quedando como única alternativa hidroeléctrica para el Paraguay.

5 RESULTADOS DEL AHP**5.1 Priorización de criterios con respecto al objetivo general**

Una vez creado el árbol jerárquico, se realizan las comparaciones entre componentes de distintos niveles. Para la asignación de prioridades se consideran los criterios incluidos en el nivel II del árbol jerárquico del problema de decisión, mostrado en la Figura 1. Como punto de partida del análisis según opiniones de profesionales de distintos sectores, los tomadores de decisiones consideran que todos los criterios tienen la misma ponderación, que según la escala verbal de Saaty, los elementos de la matriz son igual a 1. Por lo tanto, el vector propio de los criterios con respecto al objetivo se puede observar en la Tabla II. Por otro lado, el test de consistencia de la matriz arroja una razón de consistencia perfecta, lo que indica que los valores ingresados en la matriz, producto de juicios emitidos por el equipo decisor, guardan una coherencia adecuada (inferior al 10%).

5.2 Priorización de sub-criterios con respecto a los criterios

En este apartado, se presenta el análisis de las valoraciones de los sub-criterios que componen el nivel III de la estructura jerárquica definida. Los tomadores de decisiones emiten sus juicios e introducen sus ponderaciones en una matriz de comparaciones pareadas, como se muestra en la Tabla II, considerando asimismo la escala fundamental de Saaty. El vector propio de la matriz se observa en la columna peso individual (Tabla III). Para obtener el peso general de la matriz se realiza el producto del valor del peso individual de un sub-criterio por el peso que posee su criterio correspondiente (columna peso general, Tabla III).

5.3 Priorización de las alternativas respecto a los sub-criterios

En esta parte del proceso, se evalúan las alternativas del nivel IV con respecto a todos los sub-criterios del árbol jerárquico. Los valores normalizados de la Tabla IV, fueron obtenidos en base a indicadores cualitativos y cuantitativos, mediante juicios emitidos por el panel de expertos y un análisis realizado a través de una recopilación bibliográfica.

TABLA II

Pesos de los criterios con respecto al objetivo.

Objetivo/Criterio	Técnico	Financiero	Ambiental	Socio-Político-Económico	Peso
Técnico	1	1	1	1	0,25

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

Financiero	1	1	1	1	0,25
Ambiental	1	1	1	1	0,25
Socio-Político-Económico	1	1	1	1	0,25
CR 0,00 < 10%					1

TABLA III

Pesos generales de los sub-criterios con respecto a los criterios

Criterio	Peso	Sub-criterio	Peso individual	Peso general relativo
TECNICO	0,25	Potencia Típica	0,1747	0,0437
		Madurez tecnológica	0,1899	0,0475
		Disponibilidad del combustible	0,2211	0,0553
		Factor de capacidad	0,2310	0,0577
		Eficiencia	0,1834	0,0459
FINANCIERO	0,25	Costos de instalación	0,3430	0,0858
		Costos de O y M	0,3238	0,0809
		Costo de combustible	0,3332	0,0833
AMBIENTAL	0,25	Superficie Ocupada	0,6066	0,1517
		Emisión de CO2	0,3934	0,0983
SOCIO-POLITICO-ECONOMICO	0,25	Aceptación social	0,3388	0,0847
		Interés del gobierno	0,3429	0,0857
		Creación de fuentes de trabajo	0,3182	0,0796

TABLA IV

Matriz de prioridad de alternativas vs criterios de evaluación (normalizada)

ALTER/ CRIT	Potencia Típica	Madurez tecnológica	Disponibilidad del combustible	Factor de capacidad	Eficiencia	Costos de instalación	Costos de O y M	Costo de combustible	Superficie Ocupada	Emisión de CO2	Aceptación social	Interés del gobierno	Creación de fuentes de trabajo
Central nuclear	0,303	0,035	0,024	0,188	0,122	0,086	0,026	0,025	0,338	0,191	0,026	0,022	0,074
Biomasa	0,007	0,115	0,086	0,173	0,095	0,052	0,055	0,036	0,002	0,191	0,162	0,386	0,112
Gas natural importado de Bolivia	0,012	0,147	0,034	0,192	0,119	0,318	0,235	0,036	0,298	0,021	0,080	0,083	0,059
Gas natural explotando nuestros recursos	0,012	0,147	0,054	0,192	0,119	0,318	0,235	0,036	0,298	0,021	0,111	0,133	0,059
Central eólica	0,014	0,056	0,133	0,092	0,131	0,133	0,205	0,289	0,053	0,191	0,283	0,039	0,090
Central fotovoltaica	0,021	0,072	0,250	0,046	0,075	0,040	0,033	0,289	0,008	0,191	0,283	0,192	0,463
Central hidroeléctrica	0,633	0,426	0,418	0,119	0,338	0,053	0,211	0,289	0,003	0,191	0,055	0,145	0,144

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

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Como puede ser observado en la Tabla anterior, el índice de consistencia de los pesos de todas las matrices se encuentran por debajo del 10%, esto indica la certeza de que las ponderaciones realizadas son consistentes. Así, se puede decir que según los criterios y sub-criterios evaluados la mejor alternativa es la A7, es decir, la construcción de la Central Hidroeléctrica Itacua, seguido por la alternativa A6, la cual se refiere a la Central Fotovoltaica, luego sigue la A4, que corresponde a la Central a Gas Natural explotando recursos propios del Paraguay, y así sucesivamente en orden decreciente según la Tabla V.

TABLA V

Vector prioridad de las alternativas

		RESULTADO	
A1	Central nuclear	0,124	12,42%
A2	Biomasa	0,112	11,15%
A3	Gas natural importado de Bolivia	0,141	14,11%
A4	Gas natural explotando recursos propios del Paraguay	0,149	14,92%
A5	Central eólica	0,135	13,54%
A6	Central fotovoltaica	0,152	15,17%
A7	Central hidroeléctrica	0,187	18,68%

6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Este análisis se realiza para examinar el grado de sensibilidad del resultado obtenido en una decisión al realizar cambios en las prioridades de un determinado criterio, manteniendo las ponderaciones de los demás criterios.

El análisis de sensibilidad consiste en variar los pesos de los criterios y evaluar qué alternativas se obtienen con mayor frecuencia como resultado. Para este caso de estudio, el análisis de sensibilidad consiste en hacernos la siguiente pregunta: ¿qué pasa si se varía el peso para un determinado criterio?.

En este trabajo se realizan un total de 10 análisis de sensibilidad. En los elementos de Tabla VI se observa la mejor alternativa para cada análisis de sensibilidad, siendo la diagonal principal priorizaciones de a un solo criterio, y los demás componentes son el resultado de las mejores alternativas haciendo priorizaciones de a dos criterios. Se puede observar que la alternativa que más redonda se trata de la alternativa central hidroeléctrica. Comparando este valor con el resultado del caso de estudio previamente analizado, donde no se prioriza ningún criterio en particular, se nota que no se altera el resultado de la mejor alternativa.

TABLA VI

Matriz de análisis de sensibilidad – Priorizaciones de a uno y a dos criterios

	TECNICO	FINANCIERO	AMBIENTAL	SOCIO-POLITICO ECONOMICO
TECNICO	A7	A7	A7	A7
FINANCIERO	X	A4	A4	A4
AMBIENTAL	X	X	A1	A1
SOCIO-POLITICO ECONOMICO	X	X	X	A6

7 CONCLUSIONES

La situación del Paraguay se diferencia de otros países debido a la gran disponibilidad de energía eléctrica. En este sentido, las políticas en cuanto a estudios de nuevas fuentes de generación de energía eléctrica aún son escasas, sin embargo, la tasa de crecimiento de la demanda energética obliga a implementar políticas para la aplicación del estudio de nuevas fuentes de generación de energía eléctrica para el país. Esta elección se torna compleja debido a los diversos factores implicados para la realización de un análisis integral. Bajo este contexto, este trabajo ha presentado el AHP como una metodología de evaluación para el análisis de toma de decisiones multi-criterio. Se ha planteado un modelo integral de AHP para clasificar los métodos de generación de energía eléctrica, con el objetivo de seleccionar la mejor alternativa para el país. El modelo AHP es un marco de toma de decisiones mediante una relación jerárquica entre los criterios y las alternativas. El AHP es capaz de evaluar múltiples criterios y permite incorporar criterios tanto cualitativos como cuantitativos, en la evaluación de los subsectores. Por lo tanto, esta metodología sirve de apoyo a los tomadores de decisiones en aplicaciones reales, el AHP es una herramienta que permite visualizar de forma gráfica y matemática todo el proceso de toma de decisión.

En este contexto, el presente trabajo plantea un enfoque basado en la metodología del AHP para la elección de la mejor alternativa de generación de energía eléctrica para el Paraguay. El análisis fue realizado considerando los siguientes criterios: Técnico, Financiero, Ambiental y Socio-político económico, teniendo en cuenta que cada uno de estos criterios considera varios sub-criterios para cada uno de ellos: Técnico (Potencia típica, Eficiencia, Factor de Planta, Disponibilidad de combustible); Financiero (Costo de instalación, Costo de O&M, Costo de combustible); Ambiental (Superficie ocupada, Emisión de CO₂); Socio-político económico (Aceptación social, Interés del gobierno, Creación de fuentes de trabajo), los cuales fueron priorizados de acuerdo a su nivel de importancia.

El caso de estudio analizado consideró siete alternativas en cuanto a generación de energía eléctrica, teniendo en cuenta la instalación de: A1 (Central nuclear), A2 (Central térmica a Biomasa forestal), A3 (Central térmica a gas natural importado de Bolivia), A4 (Central térmica a gas natural explotando recursos propios del Paraguay), A5 (Central eólica), A6 (Central fotovoltaica) y A7 (Central hidroeléctrica).

Los resultados concluyen que la mejor alternativa es la A7 (Central hidroeléctrica), teniendo en cuenta principalmente el criterio técnico con respecto a los demás criterios, seguido por la A4 (Central térmica a gas natural explotando recursos propios del Paraguay), teniendo en cuenta principalmente el criterio financiero con respecto a los demás criterios, A1 (Central nuclear) teniendo en cuenta principalmente el criterio ambiental con respecto a los demás criterios, y por último, tenemos a la alternativa A6 (Central fotovoltaica) considerando principalmente el criterio socio-político económico con respecto a los demás criterios.

8 BIBLIOGRAFIA

- [1] Plan Maestro ANDE 2014.
- [2] Saaty, T. L. "How to make a decision: the analytic hierarchy process", Interfaces, vol. 24, no. 6, 1994, p. 19-43.
- [3] E. W. Stein. (2013). A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies. Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22 (2013), 640–654.
- [4] J. Ren, B.K. Sovacool. (2015). Prioritizing low-carbon energy sources to enhance China's energy security. Journal of Energy Conversion and Management, 92 (2015), 129–136.
- [5] S. Ahmad, R.M. Tahar. (2014). 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), 458–466.
- [6] Yedla S, Shreshtha RM. "Multicriteria approach for selection of alternative option for environmentally sustainable transport system in Delhi", Transportation Research part A, vol. 37, no. 8, 2003, p. 717-29.
- [7] Comparison of lifecycle of various electricity generation sources - World Nuclear Association, July 2011.
- [8] Stein, E. W. (2013). A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22, 640-654.
- [9] Emisión de CO₂ del sistema eléctrico español.pdf.



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

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

- [10] XVI Seminario Departamental de Energías Renovables, OER. Desarrollo de las Fuentes Renovables de Energía, Dr. Victorio Oxilia, Setiembre 2014.pdf.
- [11] Proyectos Binacionales CH Corpus Itacora e Itati, Ing. Leopoldo Lamas.pdf.
- [12] Carvalho, J. F. D. (2008). Prioridades para investimentos em usinas elétricas. *Estudos Avançados*, 22(64), 215-225.
- [13] Los costes de operación y mantenimiento de los diferentes tipos de energía, Eugenio Rodríguez, Diciembre 2014.
- [14] Centro de energía renovable, Ministerio de Energía, CHILE, Energía Biomasa. p. 10.
- [15] Unique ,Oferta y Demanda de Biomasa sólida en el Paraguay. Setiembre 2012. p. 25.
- [16] Garrón, M., & Cisneros, P. (2007). Metodologías para la determinación de precios de gas en la región. Artículos técnicos. Quito: OLADE.
- [17] Sieminski, A. (2014). International energy outlook. *Energy Information Administration (EIA)*.
- [18] Tapia Herbas, M. (2013). Determinación de un adecuado precio del gas natural para el sector eléctrico boliviano. *Revista Latinoamericana de Desarrollo Económico*, (19), 99-123.