



Modelo Integrado de Planificación Multicriterio de la Utilización del Excedente de Hidroelectricidad del Paraguay basado en el Modelo Analítico en Red (ANP)

Raúl Amarilla*; Arturo González*; Gerardo Blanco*; Cecilia Llamosas*; Felix Fernandez*

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

Campus Universitario, San Lorenzo, Paraguay

RESUMEN

La abundancia de energía eléctrica, generada principalmente por las represas hidroeléctricas binacionales de Itaipú y Yacyretá, constituye un activo estratégico para el desarrollo de Paraguay que genera un gran impacto en el crecimiento económico y el progreso social del país, a través del crecimiento planificado de la infraestructura y el desarrollo de sector, principalmente industria, basado en una mayor participación de la electricidad en la matriz energética. Sin embargo, dentro de la matriz energética del país, todavía hay una participación significativa de la biomasa, las fuentes de energía basadas en el petróleo y la penetración limitada de la electricidad. De hecho, se puede decir que Paraguay, desde diferentes perspectivas, necesita urgentemente aprovechar los altos niveles de energía limpia disponible, fomentando la penetración de la energía hidroeléctrica en la matriz de demanda de energía, reemplazando la biomasa y el petróleo. En este contexto, ha habido, durante muchos años, un amplio debate público sobre el uso del excedente de energía hidroeléctrica. Las diferentes alternativas para su implementación a menudo se caracterizan por el conflicto entre diferentes objetivos, como puntos de vista políticos, sociales, económicos, técnicos y ambientales. Debido a la complejidad de las negociaciones entre los diferentes agentes involucrados, es difícil llegar a una idea única sobre la mejor alternativa. Sin embargo, la percepción general de la sociedad paraguaya está unificada en el sentido de que los que formulan las políticas públicas deben tomar decisiones que brinden los mayores beneficios para el país. Esta propuesta promueve el uso del Proceso Analítico en Red (ANP siglas en inglés), que es una generalización del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), con el fin de proporcionar una herramienta de toma de decisiones sobre el uso de los excedentes hidroeléctricos de Paraguay en el marco de una política sostenible, considerando aspectos cuantitativos y cualitativos que generalmente son difíciles de considerar a través de los enfoques de evaluación habituales. Esta herramienta tiene un alto componente científico y de vanguardia para tomar decisiones esenciales que producirían los mayores beneficios para el desarrollo integral del país ya que no solo sobrelleva muy bien la consideración de aspectos cualitativos y cuantitativos, sino que toma en consideración todas las posibles relaciones entre los diferentes aspectos que se involucran a la hora de tomar decisiones, entrelazándolas y formando una red. Entonces se aplicó una metodología que consta de dos partes, en primer lugar, la estructuración del problema en el que se establecen los clústeres, los elementos y las relaciones entre ellos, además de establecer los parámetros y los datos para hacer las comparaciones de acuerdo con las relaciones establecidas. En segundo lugar, se realizan cálculos de las prioridades de los elementos (en este caso, las alternativas).

PALABRAS CLAVES

ANP, Desarrollo Industrial, Política Energética 1.

INTRODUCCIÓN

La abundancia de energía eléctrica, generada principalmente por las represas hidroeléctricas binacionales de Itaipu y Yacyretá, constituye un bien estratégico para el desarrollo del Paraguay [1] lo que genera un gran impacto en el crecimiento económico y progreso social del país, a través del crecimiento planificado de la infraestructura y del desarrollo del sector productivo, principalmente de la industria, basado en una mayor participación de la electricidad en la matriz energética.

Sin embargo, dentro de la matriz energética del país, existe aún una importante participación de la biomasa, fuentes de energía en base a petróleo y una limitada penetración de electricidad [2]. De hecho, se puede decir que el Paraguay, desde las diferentes perspectivas, necesita con urgencia aprovechar los grandes niveles de energía limpia disponibles, alentando la penetración de la energía hidroeléctrica en la matriz de la demanda energética, en sustitución de la biomasa y del petróleo.

En este contexto, en el país se desató desde hace ya muchos años, un amplio debate público sobre el uso del excedente de energía hidroeléctrica. Las diferentes alternativas para su implementación a menudo se caracterizan por el conflicto entre diferentes objetivos, como ser puntos de vistas políticos, sociales, económicos, técnicos y ambientales. Debido a la complejidad de las negociaciones entre diferentes agentes implicados, una idea única sobre cuál es la mejor alternativa, es difícil de alcanzar. No obstante, la percepción general de la sociedad paraguaya está unificada en el sentido de que los responsables políticos deben tomar decisiones que reditúen los mayores beneficios para el país.

Bajo estas circunstancias, se requiere un enfoque basado en modelos de decisión de análisis multicriterio (MCDA). En estudios recientes se llevó a cabo un análisis de la problemática con el proceso analítico jerárquico (AHP), que es quizás el método más popular para dar prioridad a las alternativas. Esto puede ser debido a la capacidad de convertir un problema complejo en una jerarquía simple, flexible, con capacidad de mezclar tanto atributos cualitativos como cuantitativos en el mismo enfoque de decisión [3]. Teniendo en cuenta lo mencionado, [4] propone, basado en la metodología AHP, que para el análisis de las estrategias de eficiencia energética del Paraguay en cuanto la utilización de la energía hidroeléctrica, considerando criterios económicos, técnicos, sociales, ambientales y de factibilidad de implementación, que la mejor estrategia para el uso del excedente de la energía eléctrica disponible en el Paraguay es el desarrollo de su sector industrial, lo que traería grandes beneficios en muchos aspectos en comparación con otros escenarios.

Con esta propuesta se plantea la utilización del Analytic Network Process (ANP), el cual es una generalización del AHP, con el objeto de brindar una herramienta de toma de decisiones con respecto al uso de los excedentes hidroeléctricos del Paraguay en el marco de una política sustentable, considerando variables cuantitativas y cualitativas que generalmente son difíciles de considerar mediante enfoques usuales de evaluación. Esta herramienta permite analizar estructuras en forma de redes, de tal manera a considerar retroalimentaciones y dependencias entre criterios y alternativas además de otros elementos que pueda influir en la toma de decisiones. Con esto, se pretende proporcionar a los tomadores de decisiones una herramienta con rigor científico, con temas de interés contemporáneo, de manera a tomar decisiones fundamentadas que producirán los mayores beneficios para el desarrollo integral del país. Su aplicación a la selección de las mejores alternativas permite a los que toman las decisiones contar con una herramienta de soporte de decisiones científica. No sólo admite y califica las decisiones, también nos brinda la posibilidad de justificar las decisiones tomadas, así como simular posibles resultados. Además supone la utilización de una aplicación de software diseñada específicamente para realizar los cálculos matemáticos. [5]

Este artículo se distribuye como sigue: en la sección 2, se presenta brevemente los antecedentes de este trabajo, seguidamente, en la sección 3, se detallan los aspectos teóricos del ANP. Posteriormente en la sección 4, se presenta todo lo referente a la metodología empleada para el caso de estudio, por otra parte, en la sección 5, se exponen los resultados y finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones.

2. PANORAMA ENERGÉTICO DEL PARAGUAY: ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICAS

El Paraguay posee características muy particulares con respecto a la energía, se puede resaltar la gran capacidad de producción de energía hidroeléctrica ya que cuenta con tres grandes centrales: Itaipu (Paraguay- Brasil), con una potencia instalada de 14000 MW, de las cuales el 50 % corresponde a Paraguay, y el restante 50% le pertenece al Brasil; Yacyretá (Paraguay - Argentina), con una potencia instalada de 3200 MW, de las cuales 1600 MW pertenecen a Paraguay y la otra mitad a Argentina, y Acaray-propiedad exclusiva de Paraguay- con una potencia instalada de 210 MW[6].

Según datos del Balance Energético Nacional [7] del año 2014, la producción primaria de energía se distribuye en hidroenergía con un 67 % y biomasa con un 33 %. De este 67 % de hidroenergía producida, el 80,7 % es exportado a Brasil y Argentina.

La energía eléctrica ocupa solo un 17,9 % dentro del consumo final de energía, lo que representa una paradoja, ya que se cuenta con una gran producción de energía eléctrica limpia y renovable pero un bajo consumo de energía eléctrica. La configuración restante en cuanto al consumo final de energía se complementa con los derivados del petróleo en un 37,7 % y la biomasa un 44,4 % [1].

Itaipu Binacional es la principal fuente productora de electricidad en el Paraguay, dicha central fue concebida a partir de un tratado binacional, el cual fue firmado en el año 1976 entre Paraguay y Brasil para el desarrollo y explotación del potencial hidroeléctrico del Río Paraná. Itaipu produce cerca de 90.000 GWh/año [8]. Dado que Paraguay sólo consume alrededor del 10% de su cuota total [1], la energía eléctrica no utilizada es cedida al Brasil a cambio de una compensación económica establecida en el tratado de 1976, el cual estipula que el excedente no consumido por una de las partes, será transferida a la otra parte contratante, restringiendo la posibilidad de vender la energía a terceros.[8] A pesar de que el Paraguay es el mayor exportador neto de energía hidroeléctrica en el mundo, casi la mitad de su consumo de energía doméstica se compone de biomasa, por lo que el país tiene una de las tasas de deforestación más altas del mundo [9].

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

Teniendo en cuenta el gran superávit de energía eléctrica renovable y limpia, se puede decir que el Paraguay, desde las diferentes perspectivas, necesita aprovechar los grandes niveles de energía eléctrica limpia disponibles, alentando la penetración de la energía hidroeléctrica en la matriz de la demanda energética, en sustitución de la biomasa y del petróleo. [4]

3. PROCESO ANALITICO EN RED (ANP)

¿Qué es el ANP?

El Proceso Analítico en Red o Analytic Network Process (ANP) en inglés, es un método de toma de decisiones propuesta por Saty ([6], [11], [12]) el cual generaliza una herramienta de toma de decisiones multi-criterios ampliamente utilizada, el AHP [13] (Proceso Analítico Jerárquico), reemplazando jerarquías por redes.

El AHP es una técnica bien conocida que descompone un problema en varios niveles de tal manera que forman una jerarquía. Pero muchos problemas de decisión no pueden estructurarse jerárquicamente porque implican la interacción y la dependencia de elementos de nivel superior en una jerarquía en elementos de nivel inferior. Por lo tanto, el ANP está representado por una red, en lugar de una jerarquía.

La estructura de retroalimentación del ANP, como se mencionó recientemente, no tiene la forma de una jerarquía (de arriba abajo) sino de una red, con ciclos que conectan los elementos (Los elementos están compuestos de nodos que a su vez se pueden agrupar en clústeres), por lo que ya no podemos llamarlos niveles, y con bucles que pueden conectar un componente a sí mismo.

También tiene fuentes y sumideros. Un nodo fuente es un origen de caminos de influencia (importancia) y nunca un destino de tales caminos. Un nodo sumidero es un destino de caminos de influencia y nunca un origen de tales caminos. [6]

Una red completa puede incluir nodos de origen; Nodos intermedios que caen en rutas desde nodos de origen, se encuentran en ciclos, o caen en las rutas de los nodos sumidero; Y finalmente nodos de fregadero. Algunas redes sólo pueden contener nodos de origen y de sumidero. Aún otros pueden incluir sólo nodos de origen y de ciclo o nodos de ciclo y de sumidero o sólo nodos de ciclo. Un problema de decisión con retroalimentación surge a menudo en la práctica, en la vida real y puede adoptar la forma de cualquiera de las redes que se acaban de describir. [6]

AHP: Jerarquías, Comparaciones pareadas, Eigenvectores y Consistencia

Como se mencionó anteriormente, el ANP, es una generalización del método AHP, por lo tanto, es necesario poseer conocimientos básicos de los conceptos y elementos básicos del AHP [13],[14] y [15].

Redes, dependencia y retroalimentación

El ANP utiliza medidas de la escala de relaciones basadas en comparaciones par a par; Sin embargo, no impone una estructura jerárquica estricta como en AHP, y se puede modelar un problema de decisión usando un enfoque de sistemas con retroalimentación. En la Figura 1 se muestra la diferencia estructural entre la jerarquía (a) y la red (b). Los nodos de la red representan componentes del sistema, y los arcos denotan interacciones entre ellos. Las direcciones de los arcos representan la dependencia, mientras que los lazos significan la dependencia interna de los elementos en un clúster. Como se puede observar en la Figura 1 (a), una jerarquía es un caso simple y especial de una red. [16]

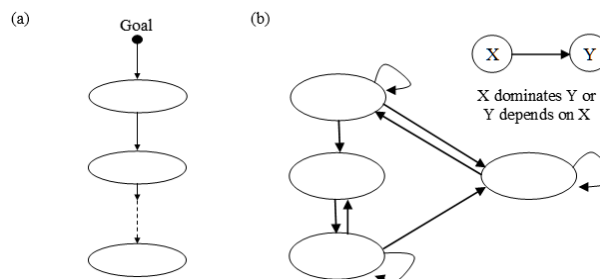


Fig. 1. (a) Estructura Jerárquica; (b) Estructura No lineal [14]

A. Estructuración del Problema y Priorización de los Elementos

El ANP, desde un punto de vista general, se puede decir que consta de dos etapas fundamentales: la primera es la estructuración del problema (construcción de la red) y la segunda es el cálculo de las prioridades de los elementos.

Para construir la estructura del problema, deben considerarse todas las interacciones entre los elementos. Cuando los elementos de un componente Y dependen de otro componente X, representamos esta relación con una flecha del componente X a Y. [16]

Todas estas relaciones se evalúan mediante comparaciones por pares y una supermatriz, que es una matriz de influencia entre todos los elementos, y que se obtiene mediante los vectores de prioridad. La supermatriz se eleva a potencias limitantes para calcular las prioridades globales y, por lo tanto, se obtiene la influencia acumulativa de cada elemento en cada otro elemento con el que interactúa [16]. Una supermatriz de una jerarquía simple (AHP) de tres niveles se puede representar como sigue:

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} G & C & A \end{matrix} \\ \begin{matrix} Goal (G) \\ Criterion (C) \\ Alternatives (A) \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ W_{21} & 0 & 0 \\ 0 & W_{31} & I \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Fig. 2. Súper matriz de una jerarquía de tres niveles. [16]

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

Donde “W₂₁” es un vector que representa el impacto de la meta en los criterios, “W₃₂” es una matriz que representa el impacto de los criterios en cada una de las alternativas, e “I” es la matriz de identidad. La forma general de una supermatriz para “N” clústeres es:

$$\begin{matrix}
 & & C_1 & & C_2 & & \dots & & C_m & & \\
 & e_{11} & \dots & e_{1n_1} & e_{21} & \dots & e_{2n_2} & e_{m1} & \dots & e_{mn_{m-1}} & e_{m2} & \dots & e_{mn_m} \\
 C_1 & \vdots & & & & & & & & & & & \\
 & e_{1n_1} & & & & & & & & & & & \\
 & e_{21} & & & & & & & & & & & \\
 C_2 & \vdots & & & & & & & & & & & \\
 & e_{2n_2} & & & & & & & & & & & \\
 & e_{m1} & & & & & & & & & & & \\
 \vdots & \vdots & & & & & & & & & & & \\
 & e_{mn_{m-1}} & & & & & & & & & & & \\
 & e_{m2} & & & & & & & & & & & \\
 C_m & \vdots & & & & & & & & & & & \\
 & e_{mn_m} & & & & & & & & & & &
 \end{matrix}
 \begin{pmatrix}
 W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1m} \\
 W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2m} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 W_{m1} & W_{m2} & \dots & W_{mm}
 \end{pmatrix}
 = \mathbf{W}$$

Fig. 3. Súper matriz de una red de "N" clústeres [17]

Donde C_m denota el m-ésimo clúster, e_{mn} denota el n-ésimo elemento en el clúster m y W_{ij} es el eigenvector principal de la influencia de los elementos comparados en el clúster de orden j al clúster i-ésimo. Además, si el j-ésimo clúster no tiene influencia en el i-ésimo clúster, entonces W_{ij}=0.

Por lo tanto, la forma de la supermatriz depende mucho de la variedad de la estructura. Hay varias estructuras que fueron propuestas por Saty [14] incluyendo la jerarquía simple, la holarquía, intarquía, etc.

Para demostrar cómo es afectada la supermatriz por las diferentes estructuras, se presenta dos casos simples, con tres clústeres, y se utilizan para mostrar cómo formar la supermatriz basada en las estructuras:

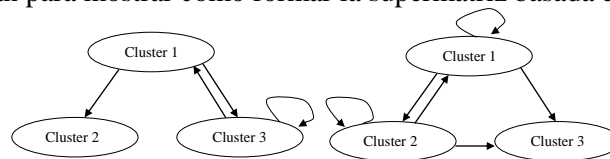


Fig. 4. (a) Caso estructura 1; (b) Caso estructura 2 [17]

$$W_a = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 \\ C_1 & 0 & W_{12} & W_{13} \\ C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_3 & W_{31} & 0 & W_{33} \end{matrix}
 W_b = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 \\ C_1 & W_{11} & W_{12} & W_{13} \\ C_2 & W_{21} & W_{22} & W_{23} \\ C_3 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Fig. 5. (W_a) Caso estructura 1; (W_b) Caso estructura 2 [16]

Una vez establecida la supermatriz, el siguiente paso es la elaboración de la supermatriz ponderada. Esta se obtiene transformando todas las columnas que sumen uno (1) exactamente. Este paso es muy similar al concepto de cadena de Markov para asegurar que la suma de estas probabilidades de todos los estados sea igual a 1. Seguidamente, se eleva la supermatriz ponderada a potencias límite tal como se observa en la Ec. (1) para obtener los vectores de prioridad global o pesos.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{W}^k \tag{1}$$

Además, si la supermatriz tiene un efecto de ciclicidad, la supermatriz límite no es la única, hay dos o más supermatrices límite en esta situación, y para obtener la prioridad se debe calcular la sumatoria de Cesàro. Esta sumatoria se formula en el Ec. (2)

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{k=1}^N \mathbf{W}^k \tag{2}$$

Para calcular el efecto promedio de la supermatriz limitante (es decir, los pesos de prioridad medios). De lo contrario, la supermatriz se elevaría a grandes potencias para obtener los pesos prioritarios tal cómo se menciona en [11] y [18].

4. METODOLOGÍA: EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS PARA LA UTILIZACIÓN DE LOS EXCEDENTES DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA EN EL PARAGUAY BASADO EN UN MODELO ANP

En esta investigación se utiliza la metodología del ANP para estructurar el problema y medir (con la intención de refinar las métricas utilizadas por [4] y [5] mediante el AHP para la toma de decisiones) el razonamiento analógico involucrado en la toma de decisiones óptimas para utilizar el excedente de energía hidroeléctrica en el Paraguay. Se aplica una metodología realizada en dos partes, primeramente la estructuración del problema en donde se establecen los clústeres, los elementos y las relaciones entre ellos, además de establecer los parámetros y los datos para realizar las comparaciones de acuerdo a las relaciones establecidas; seguidamente, en la segunda parte, se realizan los cálculos de las prioridades de los elementos (en este caso las alternativas).

B. Clústeres, elementos

Los clústeres en los cuales se agrupan los elementos estudiados en este artículo se detallan a continuación.

Clúster 1- Objetivo(O): Con la implementación del ANP para este caso de estudio se pretende responder a la pregunta de ¿Qué es lo más conveniente para el país en cuanto al excedente de energía hidroeléctrica en el Paraguay?

Clúster 2 - Criterio Ambiental (C1): el indicador de este criterio es la tasa de crecimiento promedio de la emisión de gases de efecto invernadero, que se estima por una proyección que incluye el consumo de energía como variable exógena. El análisis de series de tiempo se realiza con base en los datos históricos de las emisiones de CO₂ en Paraguay.

Clúster 3 - Criterio Económico (C2): el indicador de este criterio es la tasa media anual de crecimiento del PIB del país en el horizonte analizado. Se estima la proyección del PIB por medio de series de tiempo histórica. Cada alternativa tiene un tratamiento especial en cuanto a su contribución marginal al PIB.

Clúster 4 - Criterio Social (C3): el indicador de este criterio es el número de empleos que se generaría por cada estrategia. Se calcula mediante las proyecciones basadas en datos históricos o estudios adicionales específicos en función de la estrategia que se está analizando.

Clúster 5 - Criterio Técnico (C4): el indicador de este criterio es el Costo Esperado de Energía No Suministrada (CEENS). Dentro de este análisis, la tasa de crecimiento de la demanda eléctrica se considera incierta y su evolución se replica mediante simulaciones de Monte Carlo a través de un Movimiento Browniano (BM). Además, análisis de contingencia de líneas de transmisión son llevados a cabo en cada realización. Finalmente, Flujos Óptimo de Potencia (OPF) son calculados en el sistema de potencia de Paraguay con el fin de determinar el ECENS mínimo de cada hora, realización y contingencia a lo largo del horizonte de análisis.

Clúster 6 - Criterio de Factibilidad (C5): aquí se establece una clasificación basada en el conocimiento experto de la probabilidad de una efectiva implementación de las alternativas analizadas.

Clúster 7 – Alternativas(A): Son las diferentes estrategias asumidas y analizadas en este caso de estudio. Sus elementos son:

A1 - Escenario tendencial: Paraguay sigue cediendo su excedente de energía eléctrica a Brasil.

A2 - Alto nivel de exportación de energía hidroeléctrica: la energía de Paraguay se vende en el mercado mayorista de energía de Brasil a 50 USD/MWh.

A3 - Alto nivel de penetración de la industria electro-intensiva: una fábrica de aluminio de 1.100 MW se instala en Paraguay en el año 2017.

A4 - Alto desarrollo de las pequeñas industrias: Parques industriales de 180 MW por año se estableció en Paraguay desde el año 2017 hasta el año 2021.

Clúster 8 – Consumo de Energía: Este artículo propone la consideración del consumo de energía eléctrica teniendo como los siguientes elementos:

E1 - Consumo total de energía eléctrica en el Paraguay: Se utiliza con un factor de comparación entre los elementos de los clústeres, que están relacionados entre sí, teniendo como indicador el consumo total de electricidad en el Paraguay.

E2 - Consumo total de energía del sector industrial en el Paraguay: Al igual que el elemento anterior, es un factor que sirve para comparar otros elementos entre sí, tomando como indicador el consumo de energía del sector industrial en el Paraguay.

C. Relaciones entre los clústeres y elementos de la red

Teniendo en cuenta la metodología del ANP, se presenta la estructura en red que se pueden observar en la Figura 7. Las relaciones o lazos representan las diferentes interacciones entre los clústeres, la cual parte de la jerarquía simple objetivos-criterios-Alternativas pero con la variante de considerar el factor de consumo energético con los criterios y también con las alternativas.

La estructura establecida para el análisis (Figura 7), se muestra de forma detallada, c en la Figura 8, la cual representa la estructura del problema. Para relacionar los clústeres y elementos, se deben realizar los procedimientos de comparaciones pareadas al igual que en el AHP.

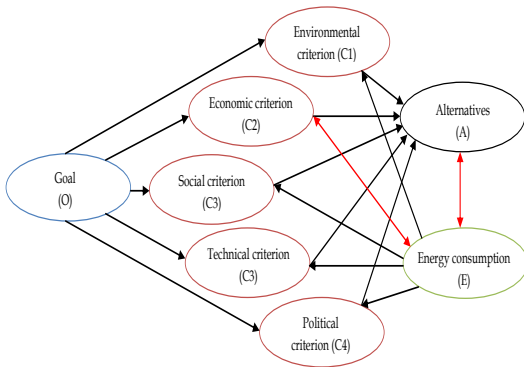


Fig. 6. Estructura en red de las relaciones entre los clústeres

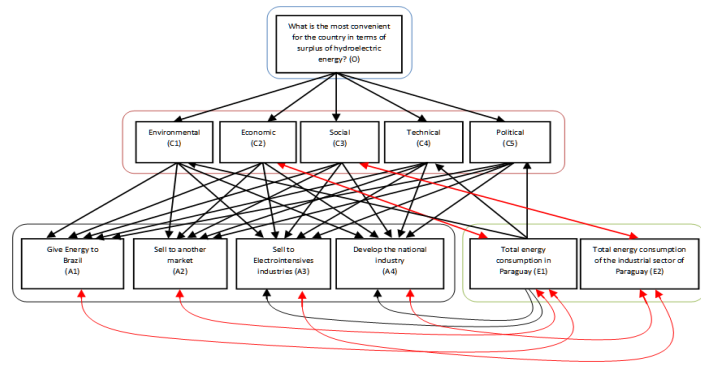


Fig. 7. Estructura en red del modelo ANP

D. Cálculos de las Prioridades

Todos los cálculos de las prioridades para el modelo utilizado en este artículo, dependen de las comparaciones par a par citadas en el apartado anterior, por lo que debe seguir los procedimientos utilizados en el AHP [8] para obtener los pesos relativos de los elementos comparados con respecto los clústeres y/o otros elementos. Estos cálculos nos arrojan los siguientes resultados en base a la metodología del ANP.

- Matriz de Clústeres (En base a la estructura de la Figura 6)
- Una Supermatriz no Ponderada (Obtenida de las comparaciones pareadas realizadas en base a la Figura 7)
- Una Supermatriz Ponderada (Obtenida realizando la multiplicación de elementos de la Matriz de Clústeres y la Supermatriz no Ponderada)
- Una Supermatriz Limite (Obtenida realizando las potencias de la Supermatriz Ponderada como se detalla en el apartado III)
- La prioridad general de las Alternativas basadas en ANP.

5. RESULTADOS

Como resultado final muestra que el elemento **A4 – Fomentar la Industria Nacional obtuvo** una prioridad del 70,79% sobre los demás elementos, lo que indica que la mejor estrategia para la utilización del excedente de energía eléctrica en el Paraguay es el desarrollo de la industria en el país.

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

Clúster		Resultado supermatriz límite	Normalización	Prioridad (%)
A - Alternativas	A1 - Ceder energía a Brasil	0,0131	0,0302	3,02%
	A2 - Vender a otro mercado	0,0122	0,0281	2,81%
	A3 - Vender a Industrias Electro intensivas	0,1015	0,2338	23,38%
	A4 - Fomentar la Industria Nacional	0,3072	0,7079	70,79%
Totales		0,4249	0,4340	1

Fig. 8. Prioridad General de las Alternativas

6. CONCLUSIONES

El debate público acerca del uso de los excedentes de la energía eléctrica en el Paraguay ha sido uno de los temas más recurrentes en los últimos años, debido a los conflictos entre los objetivos y las diferentes alternativas existentes con respecto al uso de este recurso tan importante. Esto genera conflictos y dificultades para los tomadores de decisiones ya que existen múltiples puntos de vistas. Bajo estas circunstancias, en este artículo se propuso un enfoque basado en modelos de decisión de análisis multicriterio (MCDA) para salvar la brecha que implica la existencia de múltiples factores a la hora de tomar una decisión. Particularmente, se utilizó un modelo basado en el Analytic Network Process (ANP) para desarrollar una herramienta de toma de decisiones con relación al uso de los excedentes hidroeléctricos del Paraguay en el marco de una política energética sustentable.

Este modelo propuesto proporciona a los tomadores de decisiones una herramienta con rigor científico con la capacidad de considerar aspectos cuantitativos y cualitativos, además de permitir seleccionar la mejor estrategia para el aprovechamiento del excedente hidroenergético del Paraguay. En el presente trabajo, el resultado de la utilización del modelo integral ANP, teniendo en cuenta la interacción entre criterios ambientales, económicos, sociales, técnicos y políticos, además del consumo de energía en el Paraguay (total y del sector industrial) y las posibles estrategias, para este caso de estudio arrojó que lo más conveniente para el Paraguay es desarrollar e implementar la estrategia A4-Fomentar el desarrollo de la industria nacional con un 70,79% de prioridad, presentando una amplia superioridad con respecto a las otras alternativas (A3 - Vender a Industrias Electro intensivas (23,38%), A1 - Ceder energía a Brasil (3,02%) y A2 - Vender a otro mercado (2,81%)

Estos resultados del modelo ANP refuerzan los resultados obtenidos de la aplicación del modelo AHP. Estos sugieren que la estrategia más adecuada para Paraguay es el desarrollo de su sector industrial a través del uso de la energía eléctrica disponible, lo que traería grandes beneficios en muchos aspectos en comparación con otras alternativas, es decir ambos demuestran de una manera robusta que la política óptima para el mejor aprovechamiento de los excedentes es la industrialización. A la luz de esos hallazgos, es pertinente realizar un análisis de la evolución temporal futura de esos excedentes en función del crecimiento vegetativo y políticas energéticas que podrían aplicarse de manera a estimar el número y tipo de industria que se podrían instalar y la consecuente creación de mano de obra. Así mismo, atendiendo a la gran importancia de los aspectos políticos en la toma de decisiones, reflejada en la alta relevancia del criterio factibilidad política, se hace necesario mirar con más detenimiento las dinámicas políticas subyacentes en los procesos de tomas de decisiones públicas, en particular en el sector energético, atendiendo a la complejidad del mismo y a su carácter socio-técnico que hace que la importancia del factor político o “politics of policy” ([22], [23] y [24]) sea determinante como pudo verse en los resultados. Esto permitirá poder tener un entendimiento más

acabado de las implicancias potenciales de la adopción de determinadas estrategias y jugará un papel preponderante en la implementación de políticas públicas.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) de la República del Paraguay, al Programa PROCENCIA por el financiamiento de los proyectos 14-INV-290 y 15-INV-531.

REFERENCIAS

- [1] Amarilla, R., Buzarquis, E., Domaniczky, J., Barán, B., & Blanco, G. (2015, November). Analysis of the energy sector of Paraguay. Energy balance in terms of useful energy in 2011. In Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV), 2015 IEEE Thirty Fifth (pp. 1-7). IEEE.
- [2] Toledano, P., & Maennling, N. W. (2013). Report on Leveraging Paraguay's Hydropower for Sustainable Economic Development.
- [3] Pohekar, S. D. & Ramachandran, M. "Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 8, no. 4, 2004, p. 365-381.
- [4] Ojeda, H., Garcia, M., & Blanco, G. (2014, June). Modelo de planificación energética multicriterio: Caso de estudio de la utilización de los excedentes hidroeléctricos del Paraguay. In Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), 2014 IEEE (pp. 663-668). IEEE.
- [5] Blanco, G., Amarilla, R., Martinez, A., Llamosas C. and Oxilia, V. (2016). Energy transitions and emerging economies: a multi-criteria decision analysis of policy options for hydropower surplus utilization in Paraguay. *Energy Policy*, in review.
- [6] Saaty, T. L. (2013). Analytic network process. *Encyclopedia of operations research and management science*, 64-72.
- [7] Coronel, T. (2016). Estado del arte de generación distribuida energía solar fotovoltaica en Paraguay. II Seminario del Sector Eléctrico Paraguayo. Paraguay.
- [8] MOPC, 2015. Balance Energético Nacional 2014 en términos de Energía Final, Asunción. <http://www.ssme.gov.py/vmme/pdf/balance2014/Balance%20Energetico%20Nacional%202014-Final-3.pdf> [Accessed 24/01/ 2016]
- [9] Itaipu Binacional. (2017). Tratado de Itaipu. Hernandarias, Paraguay. Disponible en línea: www.itaipu.gov.py/es/institucional/documentos-oficiales
- [10] Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., & Kommareddy, A. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850-853.
- [11] Saaty, T. L. (1996). *The analytical network process*. Pittsburgh: RWS Publication.
- [12] Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1998). Diagnosis with dependent symptoms: Bayes theorem and the analytic hierarchy process. *Operations Research*, 46(4), 491-502.
- [13] Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation.
- [14] Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.
- [15] Karsak, E. E., Sozer, S., & Alptekin, S. E. (2003). Product planning in quality function deployment using a combined analytic network process and goal programming approach. *Computers & industrial engineering*, 44(1), 171-190.
- [16] Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2013). *Decision making with the analytic network process: economic, political, social and technological applications with benefits, opportunities, costs and risks* (Vol. 195). Springer Science & Business Media.
- [17] Huang, J. J., Tzeng, G. H., & Ong, C. S. (2005). Multidimensional data in multidimensional scaling using the analytic network process. *Pattern Recognition Letters*, 26(6), 755-767.
- [18] Sekitani, K., & Takahashi, I. (2001). A unified model and analysis for AHP and ANP. *Journal of the operations research society of Japan*, 44(1), 67-89.
- [19] CRU Strategies. *Energía y aluminio en Paraguay*. 2011. Informe final preparado para Itaipu Binacional.
- [20] Banco Central del Paraguay. *Incorporación de las Binacionales a las Cuentas Nacionales y a la Balanza de Pagos de Paraguay*. 2011. Disponible en: <http://tinyurl.com/qa7wq69>
- [21] Dirección de Recursos Energéticos, Vice Ministerio de Minas y Energía Paraguay (2005 - 2010) *Balance Energético Nacional*. Disponible en: <http://tinyurl.com/mj3ecjr>.
- [22] Meadowcroft, J. (2009). What about the politics? Sustainable development, transition management, and long term energy transitions. *Policy sciences*, 42(4), 323.
- [23] Meadowcroft, J. (2011). Engaging with the politics of sustainability transitions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 70-75.
- [24] Normann, H. E. (2015). The role of politics in sustainable transitions: The rise and decline of offshore wind in Norway. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 15, 180-193.