

ANÁLISIS DEL PROCESO DE TOMA DE DECISIONES

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

Paraguay posee actualmente un gran excedente de energía eléctrica, debido a las centrales hidroeléctricas que posee, cuya generación de energía eléctrica supera ampliamente la demanda del país. Este excedente es una de las razones principales por la cual inversores extranjeros están interesados en establecerse en el país.

En base a análisis desde diferentes puntos de vista podemos decir que el Paraguay necesita aprovechar este gran excedente de energía con el fin de lograr los mayores beneficios para el país y para ello se cuenta con diferentes alternativas.

Alternativas para darle un uso al excedente:

- 1- Seguir cediendo la energía al Brasil
- 2- Fomentar la venta de energía en el mercado internacional
- 3- Vender un gran bloque de energía a IEI (Industrias Electro-intensivas)
- 4- Incentivar la venta de energía a industrias nacionales

En este trabajo -como caso de estudio- se consideran cuatro políticas energéticas, A1- un escenario tendencial, A2- un escenario de alto nivel de penetración de las industrias electro-intensivas, A3- un escenario de alta exportación de energía hidroeléctrica y A4- un escenario de alto desarrollo de las industrias nacionales.

Resulta fundamental realizar un análisis desde todos los puntos de vista, es por ello que este estudio pretende evaluar las estrategias en base a criterios económicos, técnicos, ambientales, sociales y factibilidad de implementación.

Para ello, se pretende implementar la metodología del Proceso Analítico en Red (ANP por sus siglas en inglés), que es una generalización del proceso analítico jerárquico (AHP por sus siglas en inglés). Esta herramienta es ampliamente utilizada en el análisis de decisiones multicriterio, el cual es una teoría de las mediciones relativas en escalas absolutas donde se comparan criterios tangibles e intangibles, realizando comparaciones de a pares basados en el juzgamiento de conocimientos de expertos. La ventaja consiste en que, además de incorporar aspectos cuantitativos, permite introducir aspectos cualitativos que, a menudo, suelen quedarse fuera de los análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero que pueden ser relevantes para algunos actores involucrados en la toma de decisión, como es el caso de los riesgos, la equidad, la participación, etc.

Para valorar los criterios y cada una de las alternativas posibles de manera a incrementar el uso de los excedentes de energía hidroeléctrica, se realiza una selección de criterios y sub-criterios, que se evalúan utilizando el ANP. Esta técnica permite conocer y ponderar de manera sencilla las variables prioritarias, a través de un método que maneja inconsistencias en los juicios.

La información es sintetizada para determinar una jerarquía de las alternativas, donde la información es descompuesta en una jerarquía de criterios. En vez de prescribir la decisión “correcta”, ayuda a los decisores a encontrar la solución que mejor se ajusta a sus necesidades y a la comprensión del problema.

En esta propuesta de investigación se plantea utilizar el AHP y ANP para desarrollar una herramienta de toma de decisiones con relación al uso de los excedentes de energía hidroeléctrica disponibles en el Paraguay, en el marco de una política sustentable de desarrollo que considere factores técnicos, económicos, ambientales, sociales y de factibilidad, los cuales son difíciles de identificar y cuantificar mediante enfoques usuales de evaluación.

El planeamiento energético de una región, estado o país, es uno de los componentes importantes del desarrollo sustentable. Debido a los grandes excedentes de energía hidroeléctrica que dispone el Paraguay es de suma importancia desarrollar una política estratégica que posibilite tener un punto de equilibrio entre todos los criterios. Con el ANP se desarrollará un modelo para predecir el impacto de la aplicación de la mejor alternativa para el uso del excedente hidroenergético del Paraguay con más precisión que cualquier otra técnica. Esta propuesta nos muestra que la consideración de los diversos criterios, así como la interacción entre estos, es una cuestión clave en la formulación de políticas energéticas eficientes e integradas. En este sentido, el ANP parece ser una herramienta prometedora para la determinación de un conjunto de medidas para promover el uso eficiente de los excedentes de energía eléctrica en Paraguay.

Este trabajo de investigación requerirá de un estudio Experimental-Descriptivo. La metodología adoptada consistirá principalmente en la

elaboración de un diagnóstico, relevamientos de datos, búsqueda de antecedentes de la aplicación del ANP y mediante ello se definirán los criterios a través de la información obtenida. La necesidad de cumplir simultáneamente múltiples objetivos es un desafío actual para los responsables de las políticas energéticas, que tienen que articular planes de acuerdo a varias funciones objetivo que incorporan todas las posibles compensaciones y conflictos entre varios criterios. Bajo este contexto, el presente trabajo presentará un enfoque basado en el Proceso Analítico en Red (ANP), con el fin de establecer políticas energéticas, basadas en un análisis de múltiples criterios.

Para el desarrollo del modelo se utilizará el software SUPER DECISIONS, que es una herramienta ampliamente utilizada para evaluar múltiples criterios¹.

1.2 Estado del Arte

La toma de decisiones siempre ha sido un tema de amplio debate. Es por ello que surge la necesidad de abarcar la mayor cantidad de enfoques posibles, con vistas a resolver problemas complejos que requieren de metodologías basadas en análisis multi-criterios que permiten escoger la mejor opción o alternativa de solución ante un abanico de posibilidades para el problema en particular que se desea resolver.

Las personas que trabajan en la toma de decisiones se han preocupado en la medición de los acontecimientos en los ámbitos físicos y psicológicos. Por física nos referimos a lo tangible, a la realidad objetiva fuera de la persona que realiza la medición. Por el contrario, el ámbito psicológico se refiere a los

¹ Saaty, R. W. (2003). Decision making in complex environments. Super Decisions.

juicios de toma de decisiones con medidas intangibles basadas en ponderaciones subjetivas. La cuestión es, si hay una teoría que pueda hacer frente a estos dos ámbitos². Las técnicas de Análisis de Decisión Multicriterio (Multiple Criteria Decision Analysis, MCDA) se han aplicado en áreas diversas evaluando los ámbitos mencionados. Estos enfoques son capaces de ofrecer respuestas a los problemas de toma de decisión. Sus evaluaciones permiten una mejor comprensión de las características intrínsecas del problema y fomentan la participación de los agentes en los procesos de decisión, además, permiten lograr decisiones consensuadas y comprender la visión de los modelos.

Los enfoques multicriterio sirven de apoyo a la toma de decisiones para mejorar la calidad de la decisión; son más explícito, racional y eficiente³. Existen varios métodos aplicados de MCDA, algunos más utilizados son: ELECTRE⁴, PROMETHEE⁵, MAUT⁶, los métodos difusos y los sistemas de soporte de decisiones (DSS)⁷. Sin embargo, la técnica del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), es quizás el más popular para jerarquizar las alternativas de decisión, esto es debido a la capacidad del AHP en convertir un problema

² Ozdemir, M. S., & Saaty, T. L. (2006). The unknown in decision making: What to do about it. *European Journal of Operational Research*, 174(1), 349-359.

³ Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 8(4), 365-381.

⁴ Becalli, M., Cellura, M., & Mistretta, M. (2003). Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy*, 28(13), 2063-2087.

⁵ Goumas, M., & Lygerou, V. (2000). An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects. *European Journal of Operational Research*, 123(3), 606-613.

⁶ Voropai, N. I., & Ivanova, E. Y. (2002). Multi-criteria decision analysis techniques in electric power system expansion planning. *International journal of electrical power & energy systems*, 24(1), 71-78.

⁷ Skikios, G. D., & Machias, A. V. (1992). Fuzzy multicriteria decision making for the evaluation of wind sites.

complejo en una jerarquía simple, flexible, e intuitiva, así como mezclar atributos cualitativos y cuantitativos en el mismo enfoque.

Se pueden citar algunos ejemplos, como son:

- La selección de las fuentes de energía renovable para el desarrollo sostenible del sistema de generación de Malasia⁸.
- La mejor localización de plantas de tratamiento de residuo sólido urbano^{9 10};
- Del mismo modo para establecer el pronóstico del desarrollo de generación de energía renovable en China¹¹ y su influencia en la estrategia de control de gases de efecto invernadero¹², así como el simple caso de escoger cual es el mejor celular teniendo en cuenta múltiples criterios y varias alternativas¹³.

⁸ Ahmad, S., & Tahar, R. M. (2014). Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia. *Renewable Energy*, 63, 458-466.

⁹ Aznar Bellver, J. (2011). Localización de plantas de tratamiento de residuos sólidos urbanos.

¹⁰ Casaña Pérez, Almudena. (2013). La decisión multicriterio: aplicación en la selección de ofertas competitivas en edificación, 9-11.

¹¹ Chung, Y., Hong, S., & Kim, J. (2014). Which of the technologies for producing hydrogen is the most prospective in Korea?: Evaluating the competitive priority of those in near-, mid-, and long-term. *Energy Policy*, 65, 115-125.

¹² Liu, T., Xu, G., Cai, P., Tian, L., & Huang, Q. (2011). Development forecast of renewable energy power generation in China and its influence on the GHG control strategy of the country. *Renewable Energy*, 36(4), 1284-1292.

¹³ Medel-González, F., García-Ávila, L., Hernández, C., & Medel-González, M. (2015). Environmental performance evaluation procedure: application in the Cuban energy sector. *Gestão & Produção*, 22(3), 463-479.

Se puede observar que el Analytic Hierarchy Process (AHP) es uno de los métodos más utilizados para dar prioridad a las alternativas^{14 15}.

Del mismo modo, en el análisis del estado del arte, podemos ver que se ha utilizado también una generalización del AHP, el Analytic Network Process (ANP)¹⁶. Dicha herramienta permite la interacción efectiva entre criterios que son considerados para el análisis, así como también una interacción entre las alternativas.

El ANP es utilizado en diversas áreas que requieren un análisis integral entre todos los componentes del sistema. Algunos ejemplos son: la utilización del ANP para la clasificación de tecnologías de producción de energía eléctrica¹⁷ y estudios sobre improvisar la innovación en la calefacción urbana en el Reino Unido¹⁸, entre otros.

1.3 Formulación del Problema

1.3.1 Análisis del Proceso de Toma de Decisiones

Actualmente, el proceso de toma de decisiones comprende las cinco primeras fases de cualquier proceso de resolución de problemas, el cual está compuesto por siete etapas: definición del problema, identificación de las alternativas, determinación de los criterios, evaluación de las alternativas,

¹⁴ 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.

¹⁵ Ren, J., & Sovacool, B. K. (2015). Prioritizing low-carbon energy sources to enhance China's energy security. *Energy Conversion and Management*, 92, 129-136.

¹⁶ Saaty, T. L. (1999, August). Fundamentals of the analytic network process. In *Proceedings of the 5th international symposium on the analytic hierarchy process* (pp. 12-14).

¹⁷ Stein, E. W. (2013). A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 640-654.

¹⁸ Webb, J. (2015). Improvising innovation in UK urban district heating: The convergence of social and environmental agendas in Aberdeen. *Energy Policy*, 78, 265-272.

elección de una opción, implementación de la decisión y evaluación de los resultados. Las cinco etapas que componen el proceso de toma de decisiones, a su vez se agrupan en dos subprocesos: la estructuración y el análisis del problema. En la fase de estructuración se define el problema a abordar, se indican las posibles alternativas y se determina el criterio o criterios a tener en cuenta estableciendo de esa forma si el problema a abordar va a evaluar un único criterio o múltiples criterios.

Una vez concluida la fase de estructuración se pasa a la fase de análisis y estudio, trabajo necesario para la toma de las decisiones. En esta fase se evalúan las alternativas para posteriormente elegir la mejor opción¹⁹.

El análisis puede realizarse de forma cualitativa o cuantitativa. Se considera que el análisis es cualitativo cuando este se basa fundamentalmente en la intuición, experiencia y razonamiento de aquellos que participan en el proceso de elección, debido a que los datos con los que se disponen son confusos e incompletos. Se realiza un análisis cuantitativo cuando las decisiones se basan en hechos y datos cuantitativos relacionados con el problema, a partir de los cuales se establecen relaciones matemáticas en las que se describen los objetivos, restricciones y relaciones existentes en el problema. Tras llevar a cabo el análisis se procede a la elección de la mejor alternativa disponible, que no por ser la mejor del conjunto de alternativas evaluadas implica que sea la solución óptima al problema. La bondad de la alternativa seleccionada dependerá de los datos empleados durante todo el proceso de toma de decisión.

¹⁹ Casaña Pérez, Almudena. (2013). La decisión multicriterio: aplicación en la selección de ofertas competitivas en edificación, 9-11.

Por tanto, en una decisión se deben tener en cuenta todos los factores que pueden influir en el problema, establecer comparaciones entre las distintas alternativas que se presentan y plantear los posibles escenarios que se pueden dar, para que de esta forma, sea posible tener una previsión de los efectos que la decisión que se va a tomar ocasionará en el futuro. Una vez considerados todos estos aspectos se decidirá la mejor opción para el problema analizado.

1.4 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), desarrollado por Thomas L. Saaty (*The Analytic Hierarchy Process*) está diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples. El proceso requiere que quien toma las decisiones proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que, después, especifique su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio. El resultado del AHP es una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada una de las alternativas de decisión.

En un ambiente de certidumbre, el AHP proporciona la posibilidad de incluir datos cuantitativos relativos a las alternativas de decisión. La ventaja del AHP respecto a otras metodologías consiste en que permite incorporar aspectos cualitativos que suelen quedarse fuera del análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero que pueden ser relevantes en algunos casos²⁰.

En el AHP se trata de disgregar un problema y luego unir todas las soluciones de los subproblemas en una solución.

²⁰ Toskano G. (2005). El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de decisiones en la selección de Proveedores. P.36.

1.4.1 Estructuración del Modelo²¹

La representación jerárquica, ayuda a comprender y visualizar todos los elementos de un problema, agruparlos según su importancia e influencia en conjuntos a distintos niveles, comprender las relaciones que existe entre ellos y como cada elemento afectó a la totalidad del problema.

Las jerarquías se dividen en dos grupos, estructurales y funcionales. Las estructurales organizan las partes constitutivas del problema en orden descendente de acuerdo con sus características estructurales, analizan la complejidad descomponiendo un elemento en grupos estos en subgrupos y así sucesivamente. Las jerarquías funcionales descomponen un elemento en sus partes constituyentes, de acuerdo con sus relaciones esenciales. Las jerarquías funcionales lineales, son las empleadas en el Proceso de Análisis Jerárquico, en las que se puede descender o ascender de forma lineal de un nivel a otro.

Para poder organizar un problema de decisión en una jerarquía, hay que conocer a fondo el problema que se está tratando, las posibles opciones existentes, los elementos que afectan en la decisión y el fin al cual se desea llegar. Es positivo que en la realización de la jerarquía participen diversas personas, conocedoras del problema a tratar, ya que pueden aportar consideraciones y puntos de vista diferentes, según como considere cada persona el problema.

²¹ Almudena C. (2013). La Decisión Multicriterio; Aplicación en la Selección de Ofertas Competitivas en Edificación. P.27.

Los niveles mínimos que presentará una jerarquía son 3: el objetivo o meta del global, los criterios y las alternativas. En la Figura 1 se puede observar la relación jerárquica que existe entre estos tres niveles.

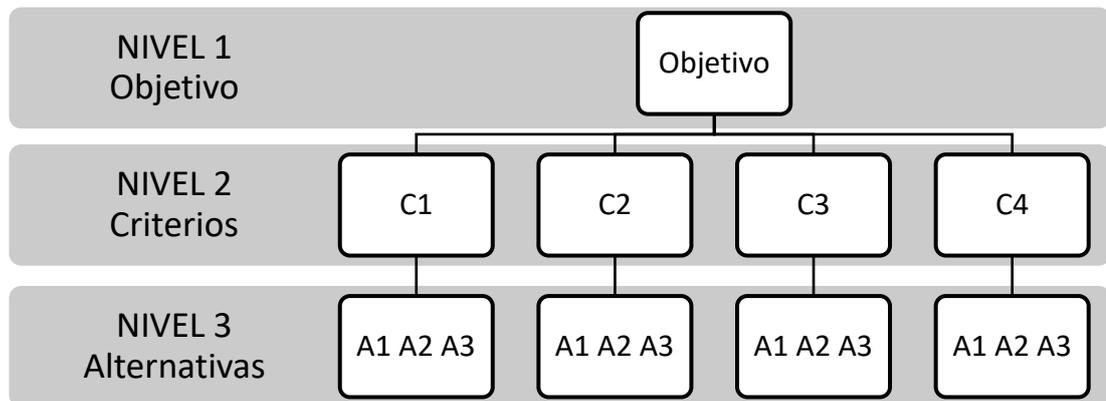


Figura 1: Árbol Jerárquico de Decisiones, Niveles de Jerarquía.

1.4.2 Definición del Objetivo

Un objetivo es una dirección identificada para mejorar una situación existente. El objetivo está en un nivel independiente y los otros elementos de la jerarquía que serán los sub-objetivos o criterios, y alternativas apuntan en conjunto a la consecución del mismo.

El objetivo u objetivos serán establecidos por el grupo decisor involucrado. Vale la pena tener en cuenta que la definición de objetivos puede ser una tarea difícil porque algunas veces serán contrapuestos entre las personas. No obstante, los objetivos determinados finalmente deben representar las necesidades e intereses generales.

1.4.3 Determinación de los Criterios

Son las dimensiones relevantes que afectan significativamente a los objetivos y deben expresar la preferencia de los implicados en la toma de decisión.

Se deben incluir aspectos vitales cuantitativos y cualitativos a tener en cuenta en la toma de decisión. Normalmente hay aspectos cualitativos que pueden incidir fuertemente en la decisión, pero que no son incorporados debido a su complejidad para definirles algún esquema de medición que revele su grado de aporte en el proceso de toma de decisión.

1.4.4 Identificación de las Alternativas

Las alternativas son las posibles soluciones al problema que se está tratando. Dicho de otra forma, son las alternativas consideradas comparables con respecto al elemento u alternativa que se compara.

Se sitúan en el nivel inferior de la jerarquía (árbol jerárquico), bajo los niveles del o los criterios evaluados tal como se puede apreciar en la figura 1.

1.4.5 Base Matemática del AHP

El AHP trata directamente con pares ordenados de prioridades de importancia, preferencia o probabilidad de pares de elementos en función de un atributo o criterio común representado en la jerarquía de decisión.²²

El AHP hace posible la toma de decisiones grupales mediante el agregado de opiniones, de tal manera que satisfaga la relación recíproca al comparar dos elementos. Luego toma el promedio geométrico de las opiniones. Cuando el grupo consiste en expertos, cada uno elabora su propia jerarquía, y el AHP combina los resultados por el promedio geométrico.

²² Saaty T. (1990). How to Make a Decision, European Journal of Operational Research. P.10.

1.4.6 Prioridades

El AHP trata directamente con pares ordenados de prioridades de importancia, preferencia o probabilidad de pares de elementos en función de un atributo o criterio común representado en la jerarquía de decisión.²³

El AHP pide a quien toma las decisiones señalar una preferencia o prioridad con respecto a cada alternativa de decisión en términos de la medida en la que contribuya a cada criterio. Teniendo la información sobre la importancia relativa y las preferencias, se utiliza el proceso matemático denominado síntesis, para resumir la información y para proporcionar una jerarquización de prioridades de las alternativas, en términos de la preferencia global²⁴.

1.4.7 Comparaciones²⁵

La preferencia de los elementos, se determina basándonos en juicios sobre la importancia relativa que tiene un elemento sobre otro, al compararlo con un elemento del nivel superior. Al realizar las comparaciones, dependiendo de la experiencia de la persona que emite el juicio, de los datos que dispone, del conocimiento que tiene del problema y de su intuición, se obtendrán valoraciones distintas.

Por este motivo, es importante que el establecimiento de los juicios se haga considerando la opinión de diversas personas, que representen puntos

²³ Saaty T. (1990). How to Make a Decision, European Journal of Operational Research. P.10.

²⁴ Hurtado, T., & Bruno, G. (2005). El Proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. Trabajo de grado (Licenciado en Investigación Operativa), Universidad Nacional de San Marcos. Facultad de Ciencias Matemáticas. EAP de Investigación Operativa., Lima.

²⁵ Almudena C. (2013). La decisión multicriterio: aplicación en la selección de ofertas competitivas en edificación. Máster en Edificación. P.30-31.

de vista distintos, pero no totalmente extremos ya que sería muy complicado llegar a un acuerdo. Las opiniones se pueden debatir en una sesión en la que todos los integrantes del grupo de decisión estén presentes y participen dando su valoración, obteniendo resultados fruto de un consenso total o mayoría tras una votación. Otra forma, en la que se elimina el debate, es expresar las opiniones individuales en un cuestionario. Se obtienen los valores finales agregando todas las opiniones individuales, a través de la realización de una media geométrica.

Para comparar la importancia relativa de un elemento sobre otro, respecto de la propiedad, se emiten juicios de valor que se expresan de forma numérica. Estas equivalencias (juicio de valor - número), se determinan en la escala fundamental del AHP, propuesta por Saaty que se puede apreciar en la Tabla 1.

Planteamiento Verbal de la Preferencia	Calificación Numérica
Extremadamente Preferible	9
Entre muy fuertemente y Extremadamente Preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente Preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

Tabla 1: Escala Fundamental para comparaciones por pares de Saaty.

1.4.8 Matriz de comparaciones pareadas

Es una matriz cuadrada que contiene comparaciones pareadas de alternativas o criterios.

Sea A una matriz $n \times n$, donde $n \in \mathbb{Z}^+$. Sea a_{ij} el elemento (i,j) de A , para $i= 1, 2, \dots, n$, y, $j= 1, 2, \dots, n$. Decimos que A es una matriz de comparaciones pareadas de n alternativas, si a_{ij} es la medida de la preferencia de la alternativa en el renglón i cuando se le compara con la alternativa de la columna j . Cuando $i = j$, el valor de a_{ij} será igual a 1, pues se está comparando la alternativa consigo misma.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Además se cumple que: $a_{ij} \cdot a_{ji} = 1$; es decir:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

El AHP sustenta esto con los siguientes axiomas:

- Axioma No. 1 Referido: a la condición de juicios recíprocos. Si A es una matriz de comparaciones pareadas se cumple que $a_{ij} = 1/a_{ji}$

- Axioma No. 2 Referido: a la condición de homogeneidad de los elementos. Los elementos que se comparan son del mismo orden de magnitud, o jerarquía.
- Axioma No. 3 Referido: a la condición de estructura jerárquica o estructura dependiente. Existe dependencia jerárquica en los elementos de dos niveles consecutivos.
- Axioma No.4 Referido: a la condición de expectativas de orden de rango. Las expectativas deben estar representadas en la estructura en términos de criterios y alternativas.

Para rellenar la matriz, primero se completa la diagonal, con números 1, ya que se está comparando cada elemento consigo mismo. Posteriormente se rellenarán los huecos que quedan por encima de la diagonal con los valores de la escala de Saaty.

El número de comparaciones a realizar para rellenar estos huecos se obtiene de la siguiente fórmula:

$$\frac{((n \times n) - n)}{2} \quad (3)$$

Donde n es el número de elementos comparados. Las casillas que quedan por debajo de la diagonal son los recíprocos de los valores simétricos con respecto a la diagonal de la matriz.

Una vez completada la matriz de comparaciones pareadas, se procede a sintetizar los juicios reflejados en ella, para de esa forma obtener un único valor numérico que determine la prioridad de cada elemento comparado.

1.4.9 Sintetización de resultados²⁶

Una vez que se elabora la matriz de comparaciones pareadas se puede calcular lo que se denomina prioridad de cada uno de los elementos que se comparan. A esta parte del AHP se lo conoce como sintetización.

Para obtener las prioridades a partir de los juicios dados en la matriz de comparaciones mxm, se emplea un método de aproximación. El primer paso es obtener la matriz normalizada, para ello se suman los valores de cada columna y se divide cada casillero de la columna por el sumatorio de esta.

Matriz normalizada A, Obteniéndose A'.

$$A' = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum a_{i2}} & \dots & \frac{a_{1n}}{\sum a_{in}} \\ \frac{a_{21}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{22}}{\sum a_{i2}} & \dots & \frac{a_{2n}}{\sum a_{in}} \\ \frac{a_{n1}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{n2}}{\sum a_{i2}} & \dots & \frac{a_{nn}}{\sum a_{in}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

A continuación se calcula el promedio de cada término de la matriz A', del término 1 al término n. De esta forma se obtiene la matriz W de los pesos relativos, que con frecuencia se coloca al lado derecho de la matriz A.

Tras obtener la matriz normalizada, se obtiene la prioridad relativa de cada uno de los elementos comparados, promediando cada una de las filas de la matriz normalizada.

²⁶Amarilla, R.; Ojeda, H. (2014). Modelo de planificación multicriterio integrada: Caso de estudio de la utilización de los excedentes de energía hidroeléctrica del Paraguay. P. 49

$$W = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum a_{i1}} + \frac{a_{12}}{\sum a_{i2}} + \dots + \frac{a_{1n}}{\sum a_{in}} \\ \frac{a_{21}}{\sum a_{i1}} + \frac{a_{22}}{\sum a_{i2}} + \dots + \frac{a_{2n}}{\sum a_{in}} \\ \frac{a_{n1}}{\sum a_{i1}} + \frac{a_{n2}}{\sum a_{i2}} + \dots + \frac{a_{nn}}{\sum a_{in}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde W_1, W_2 y W_3 son las prioridades.

1.4.10 Indicadores de consistencia²⁷

Una consideración importante en términos de la calidad de la decisión final se refiere a la consistencia de los juicios que muestra el tomador de decisiones en el transcurso de la serie de comparaciones pareadas. Se debe tener presente que la consistencia perfecta es muy difícil de lograr y que es de esperar cierta inconsistencia en casi cualquier conjunto de comparaciones pareadas, después de todo son juicios establecidos por seres humanos.

Para determinar si un nivel de consistencia es o no razonable, necesitamos desarrollar una medida cuantificable para la matriz de comparación A $n \times n$ (donde n es el número de alternativas a comparadas). Si la matriz A es perfectamente consistente produce una matriz N ($n \times n$) normalizada, de elementos w_{ij} (para $i, j = 1, 2, \dots, n$), tal que todas las columnas son idénticas, es decir, $w_{12} = w_{13} = \dots = w_{1n} = w_1$; $w_{21} = w_{23} = \dots = w_{2n} = w_2$; $w_{n1} = w_{n2} = \dots = w_{nn} = w_n$

²⁷ Toskano, H. (2005). El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores. P.27

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} w_1 & w_1 & \dots & w_1 \\ w_2 & w_2 & \dots & w_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n & w_n & \dots & w_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

Por medio de la matriz de comparación correspondiente \mathbf{A} , se puede determinar a partir de \mathbf{N} , dividiendo los elementos de la columna i entre w_i . Entonces tenemos:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

De la definición de \mathbf{A} , tenemos:

$$\begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nw_1 \\ nw_2 \\ \vdots \\ nw_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

De forma más compacta, decimos que \mathbf{A} es consistente si y sólo si,

$$\mathbf{A}\mathbf{W} = n\mathbf{W} \quad (9)$$

Donde \mathbf{W} es un vector columna de pesos relativos w_i , ($j = 1, 2, \dots, n$), se aproxima con el promedio de los n elementos de la fila en la matriz normalizada \mathbf{N} .

Por otro lado, se puede definir una variable llamada razón de consistencia RC, que indicará cuán consistente es el análisis y se calcula empleando la siguiente expresión:

$$RC = IC/CA \quad (10)$$

Donde:

IC es el índice de consistencia y CA es la consistencia aleatoria.

El cálculo del índice de consistencia IC se obtiene como sigue:

$$IC = (\lambda_{\text{máx}} - n) / (n - 1) \quad (11)$$

Donde:

$\lambda_{\text{máx}}$: Es el valor característico promedio

n: Es el tamaño de la matriz

Para calcular $\lambda_{\text{máx}}$ se multiplica $A*W$, obteniéndose una estimación de $\lambda_{\text{máx}}*W$ esto es, $A*W = \lambda_{\text{máx}}*W$

Posteriormente se divide cada componente de $\lambda_{\text{máx}}*W$ por la componente correspondiente de W , obteniéndose $\lambda_{\text{máx}}*A$, a continuación se promedian las estimaciones de $\lambda_{\text{máx}}$ para encontrar una estimación promedio total de $\lambda_{\text{máx}}$. Teniendo esta estimación se procede al cálculo del IC de acuerdo a la expresión anterior.

Este índice se divide entre el valor de la consistencia aleatoria CA (Tabla 2). Saaty propone obtener este valor mediante la siguiente tabla. De acuerdo al tamaño n de la matriz, que son el número de criterios o alternativas analizadas, se tiene una estimación del mismo.

Número de elementos que se comparan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de consistencia aleatorio	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,5

Tabla 2: Índice de consistencia aleatorio.

Por último, se calcula la razón de consistencia RC dividiendo el índice de consistencia IC entre la consistencia aleatoria CA. Cuando el RC es bajo (menor al 10%) implica que los resultados son consistentes, en caso contrario, el error en el resultado es mayor.

1.4.11 Resultados y como analizar²⁸

El Análisis Jerárquico busca mejorar la calidad del proceso de toma de decisiones, dotando de rigor científico cada fase del proceso. Incorpora aspectos del pensamiento humano cualitativos (definir el problema y establecer la jerarquía) y cuantitativos (expresar juicios y preferencias de manera concisa).

Emplea escalas numéricas para reflejar pensamientos, juicios e intuiciones, así como para medir con el mismo criterio cualidades tangibles e intangibles. Las escalas numéricas ayudan a reflejar valoraciones o juicios que debido a su complejidad no se pueden expresar correctamente con palabras.

Los resultados numéricos permiten reflejar matices muy sutiles entre las distintas soluciones posibles, aportando racionalidad y lógica al proceso de

²⁸ Amarilla, R.; Ojeda, H. (2014). Modelo de planificación multicriterio integrada: Caso de estudio de la utilización de los excedentes de energía hidroeléctrica del Paraguay. P. 52.

decisión. La elección tomada queda completamente justificada al basarse en los resultados numéricos, favoreciendo la objetividad y la transparencia del proceso. Por ejemplo si se analizan tres alternativas, se obtienen tres pesos diferentes de acuerdo al modelo adoptado (Ejemplo A1: 0,7, A2: 0,2 y A3: 0,1). Esto refleja que la A1 (Alternativa 1) analizada es la que posee mayor peso con 0.7 o 70%, por lo que resulta en la mejor alternativa de acuerdo al análisis llevado a cabo.

La objetividad de la decisión tomada se ve reforzada debido a que en el método analítico jerárquico se tienen en cuenta las opiniones de todas las personas que intervienen en la decisión, tanto al definir el problema y establecer la jerarquía, como en la emisión de juicios y valoraciones.

Una vez realizada la totalidad de comparaciones se obtiene el resultado final consensuado: ordenamiento de las alternativas. Este ordenamiento de las alternativas se obtiene o se establece de acuerdo al peso obtenido para cada una de ellas tal como el ejemplo mencionado recientemente.

Este resultado está basado entonces, en las prioridades, en la emisión de juicios y evaluación hecha a través de las comparaciones de los componentes del modelo jerárquico, llevada a cabo por los decisores.

1.4.12 Análisis de Sensibilidad²⁹

El AHP, es una herramienta muy versátil que proporciona muchas ventajas. Entre ellas, se encuentra el análisis de sensibilidad, el cual permite

²⁹ Toskano, H. (2005). El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores. P.27

visualizar y analizar la sensibilidad del resultado (orden de las prioridades de las alternativas) respecto a posibles variaciones en la importancia (preferencia) de los criterios (supuestos asumidos en el estudio). El análisis de Sensibilidad responde a la pregunta de ¿Qué ocurre en el caso de...?; Esto facilita en gran medida el análisis de ciertos procesos de toma de decisiones en los que se debe reaplicar el AHP en un periodo pequeño o mediano de tiempo debido a que están supeditados a proceso dinámicos que requieren ser reconsiderados y ajustados en el transcurso del tiempo debido a la alta variación del entorno.

Esto permite tener una visión general de los posibles escenarios que afrontan las diferentes alternativas teniendo en cuenta los criterios seleccionados para la toma de decisiones, por lo que representa un importante aporte agregado por la utilización del AHP.

1.5 Proceso Analítico en Red (ANP) ³⁰

El Proceso Analítico en Red o Analytic Network Process (ANP) en inglés, es un método de toma de decisiones propuesta por Saaty ^{31 32}, el cual generaliza una herramienta de toma de decisiones multi-criterios ampliamente utilizada, el AHP (Proceso Analítico Jerárquico), reemplazando jerarquías por redes.

El AHP es una técnica 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

³⁰ Saaty, T. L. (2013). Analytic network process. *Encyclopedia of operations research and management science*, 64-72.

³¹ Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1998). Diagnosis with dependent symptoms: Bayes theorem and the analytic hierarchy process. *Operations Research*, 46(4), 491-502.

³² Saaty, T. L. (1996). *The analytical network process*. Pittsburgh: RWS Publication.

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, es una red, con ciclos que conectan los elementos (los elementos son nodos que se pueden agrupar en clústeres), por lo que ya no podemos llamarlos niveles, cómo se hace con el AHP. El ANP permite además generar bucles que pueden conectar a un componente consigo mismo (en el caso que dentro de un clúster se tenga más de un elemento, por ejemplo si se tienen dos elementos y ambos tienen una relación bidireccional -que un elemento le afecte al otro y viceversa- entonces se dice que dicho clúster está conectado consigo 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.

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 sumideros. 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.

1.5.1 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. Todo lo referente al mismo, se detalla en el Capítulo 1. Todos los procedimientos del AHP son la base fundamental del análisis del ANP.

1.5.2 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 el AHP, y se puede modelar un problema de decisión usando un enfoque de sistemas con retroalimentación. En la Figura 2 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 (conjunto o grupo de los criterios, sub criterios, alternativas y el objetivo). Como se puede observar en la Figura 2 (a), una jerarquía es un caso simple y especial de una red.³³

³³ 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.

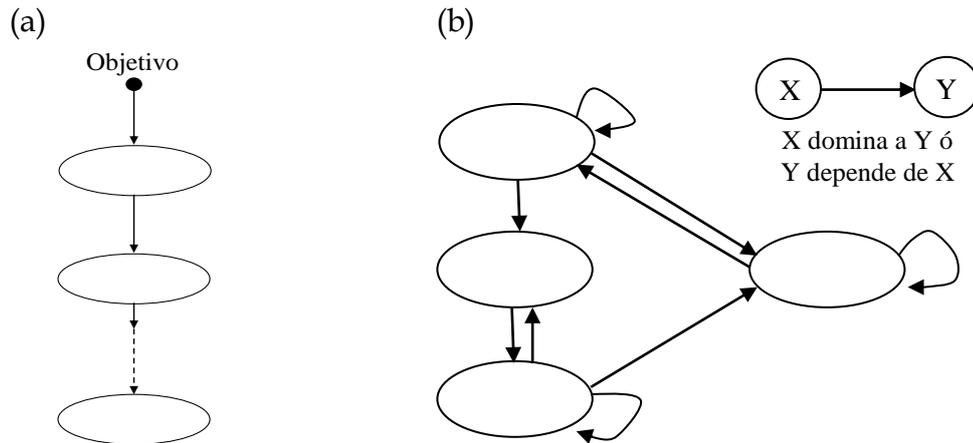


Figura 2: (a) Estructura Jerárquica. (b) Estructura no Lineal²⁶

1.5.3 Estructuración del Problema y Priorización

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 tal como se observa en la Figura 2(b). Cuando los elementos de un componente Y dependen de otro componente X, representamos esta relación con una flecha del componente X a Y.³⁴

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

³⁴ 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.

obtiene la influencia acumulativa de cada elemento en cada otro elemento con el que interactúa³⁵. Una supermatriz de una jerarquía simple (AHP) de tres niveles se puede representar como sigue:

$$W = \begin{matrix} & & O & C & A \\ \text{Objetivo (O)} & & 0 & 0 & 0 \\ \text{Criterios (C)} & & W_{21} & 0 & 0 \\ \text{Alternativas (A)} & & 0 & W_{31} & I \end{matrix}$$

Figura 3: Supermatriz de tres niveles de jerarquía.³⁵

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:

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

Figura 4: Supermatriz de n-clústeres³⁶

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

³⁵ Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. European journal of operational research, 48(1), 9-26.

³⁶ 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.

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 estructuras³⁷ que fueron propuestas por Saaty³⁸ 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:

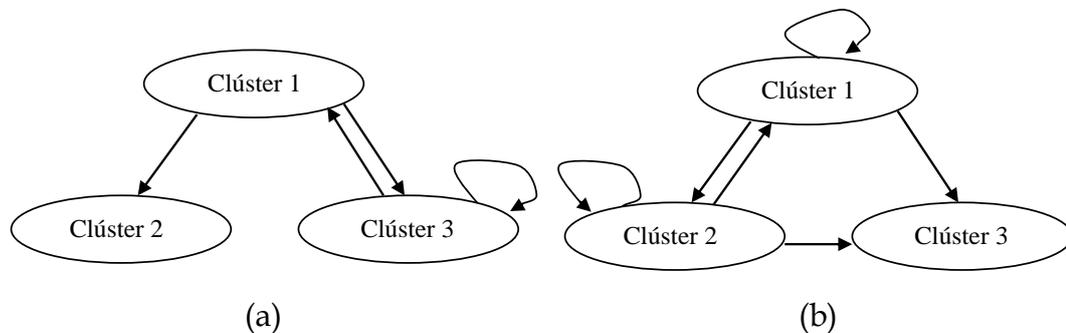


Figura 5: (a) Estructura del Caso 1. (b) Estructura del Caso 2.

³⁷ Saaty introdujo la siguiente terminología para algunos tipos de jerarquías especiales y para las variaciones de sistemas con retroalimentación. Una *Jerarquía* es una estructura con un objetivo en la parte superior de la estructura. Una *Suparquía* es una estructura similar a una jerarquía excepto que no tiene objetivo, pero que tiene un ciclo de retroalimentación entre los dos niveles superiores. Una *Intarquía* es una jerarquía con un ciclo de retroalimentación entre dos niveles intermedios consecutivos.

³⁸ Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. European journal of operational research, 48(1), 9-26.

$$W_a = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & W_{12} & W_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ W_{31} & 0 & W_{33} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

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

Figura 6: W_a – Supermatriz de la Estructura del caso 1 y W_b – Supermatriz de la Estructura del caso 2.³⁹

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. (12) para obtener los vectores de prioridad global o pesos.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} W^k \quad (12)$$

Además, si la supermatriz tiene un efecto de ciclicidad (se refiere a los nodos, la trayectoria que une a un nodo consigo mismo, es decir que comienza y termina en el mismo nodo, esto es definido como ciclo), 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 Cesàro⁴⁰. Esta sumatoria se formula en la Ec. (13)

³⁹ 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.

⁴⁰ Barajas Moreno, J. J. (2016). Sumabilidad de Cesàro.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{k=1}^N W^k \quad (13)$$

La Ec. (13) es utilizada para calcular el efecto promedio de la supermatriz límite (es decir, los pesos de prioridad medios). De lo contrario, la supermatriz se elevaría a grandes potencias para obtener los pesos prioritarios.^{41 42}

1.5.4 Ejemplo de caso de estudio con el ANP⁴³

Para el análisis de una problemática en particular la metodología del ANP propone seguir seis pasos básicos para el proceso del modelo los cuales se detallan a continuación.

1. Identificación de los elementos de la red. Alternativas y Criterios.
2. Agrupación de los elementos en componentes.
3. Análisis de la red de influencias. Matriz de dominación interfactorial.
4. Cálculo de las prioridades entre elementos. Supermatriz original o Supermatriz no ponderada.
5. Cálculo de las prioridades entre clústeres. Supermatriz Ponderada.
6. Supermatriz Límite.

⁴¹ Saaty, T. L. (1996). The analytical network process. Pittsburgh: RWS Publication.

⁴² 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.

⁴³ Saaty, T. L. (2001). Decision making with dependence and feedback. *The analytic network process*.

En base a esto primeramente iniciamos con la representación gráfica de la Red, en la cual tenemos dos componentes o clústeres, las Variables (VE) con 4 (cuatro) elementos y las Alternativas con 7 (siete) elementos, en la cual nuestro objetivo es conocer el orden de importancia de las alternativas, y para ello vamos a utilizar una serie de variables o criterios de acuerdo a nuestra red. En nuestra red ya estamos definiendo que hay una influencia de las Alternativas con respecto a las variables y de las variables con respecto a las alternativas, la cual es representada mediante la flecha de color rojo en la figura y además hay una interdependencia entre las variables (flecha negra) que significa que algunas de las variables influyen sobre las otras.

En base al análisis de la red de influencias podemos definir o establecer nuestra matriz de dominación interfactorial, que sería la representación de la red pero de manera matricial con todos los distintos componentes de la Red.

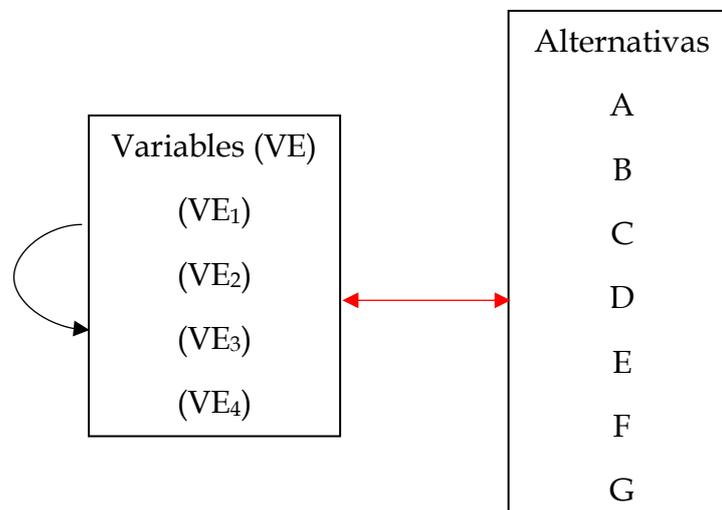


Figura 7: Representación gráfica de la red.

A continuación podemos ver la matriz de dominación interfactorial, en donde se puede observar a partir de la Columna (VE₂) que las variables

(VE₁), (VE₃) y (VE₄) influyen sobre la variable (VE₂) las cuales poseen el valor 1 (uno) en la matriz.

En el cuadrante inferior se puede observar que todas las alternativas influyen en las variables, las cuales del mismo modo se encuentran representados mediante el valor 1 (uno). Así mismo vemos en el cuadrante superior derecho también que todas las variables influyen en las alternativas y se encuentran representadas con el valor 1 (uno).

Posteriormente en el cuadrante inferior derecho podemos observar que todos los valores son 0 (cero), lo cual indica que las alternativas no se influyen entre sí.

		VE				Alternativas						
		VE ₁	VE ₂	VE ₃	VE ₄	A	B	C	D	E	F	G
VE	VE ₁	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
	VE ₂	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
	VE ₃	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
	VE ₄	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Alternativas	A	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	B	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	C	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	D	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	E	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	F	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	G	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3: Matriz interfactorial.

Ya establecida y conocida la matriz interfactorial, pasamos a determinar la matriz pareada de pesos relativos para las variables VE.

Lo que hacemos es calcular de acuerdo a la metodología propuesta por Saaty los pesos relativos de cada variable respecto a la variable VE₂.

El cálculo de los pesos relativos de cada variable se calcula sumando primeramente los valores de cada columna de la matriz (9, 1,7 y 3,33), seguidamente se divide el valor de cada fila por la sumatoria total de la columna (1/9, 0,2/1,7 y 0,33/3,33), posteriormente cada valor calculado se suma con el de la siguiente columna (1/9+ 0,2/1,7+0,33/3,33), y se divide por la cantidad de elementos que se comparan que para este caso son 3 (tres) elementos. Cálculo del peso relativo o vector de prioridad:

$$\text{Peso relativo} = \frac{\frac{1}{9} + \frac{0,2}{1,7} + \frac{0,33}{3,33}}{3} = 0,109$$

Este cálculo es realizado para cada fila de tal manera a determinar el peso relativo respecto a VE₂ de las demás variables.

VE ₂	VE ₁	VE ₃	VE ₄	Pesos
VE ₁	1	0,2	0,33	0,109
VE ₃	5	1	2	0,582
VE ₄	3	0,5	1	0,309
ΣColumnas	9	1,7	3,33	1,00

Tabla 4: Matriz de influencia de las variables sobre VE₂.

Analizando la tabla lo que se puede observar es que por ejemplo que la VE₃ influye de manera fuerte 5 (cinco), en la VE₁, respecto a la VE₂, del mismo modo podemos ver que la VE₄ influye de manera moderada 3 (tres) en la VE₁, respecto a la VE₂.

Estos pesos relativos o vectores de prioridad calculados son los que posteriormente se trasladan en la supermatriz no ponderada, tal como se puede observar en la siguiente tabla.

		VE				Alternativas						
		VE ₁	VE ₂	VE ₃	VE ₄	A	B	C	D	E	F	G
VE	VE ₁	0	0,109	0	0	1	1	1	1	1	1	1
	VE ₂	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
	VE ₃	0	0,582	0	0	1	1	1	1	1	1	1
	VE ₄	0	0,309	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Alternativas	A	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	B	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	C	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	D	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	E	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	F	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	G	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 5: Supermatriz no ponderada inicial.

Posteriormente, el mismo procedimiento debe ser realizado para calcular las ponderaciones de influencia de las Alternativas con respecto a cada una de las variables.

Primeramente realizamos el cálculo de los pesos relativos para VE₁ en donde se plantea que la influencia de las alternativas con respecto a la variable, son cuantitativas y se representan en la siguiente tabla. El valor de los pesos relativos se obtiene dividiendo el valor de cada fila sobre la sumatoria de las columnas de VE₁.

Alternativas	VE ₁	Pesos
A	17	0,160
B	15	0,142
C	16	0,151
D	9	0,085
E	12	0,113
F	20	0,189
G	17	0,160
Σ Columnas	106	1

Tabla 6: Influencia de las alternativas respecto a VE₁.

Posteriormente determinamos la matriz de influencia de las alternativas respecto a VE_2 , VE_3 y VE_4 . Los pesos relativos para cada matriz son calculados de acuerdo a la misma metodología descrita para el cálculo de la matriz de influencia de las variables sobre VE_2 (Tabla 4). La asignación de los valores numéricos otorgados en cada matriz de influencia es planteada a modo de ejemplo y se representan en las siguientes tablas.

VE_2	A	B	C	D	E	F	G	Pesos
A	1	0,2	1	3	1	3	0,33	0,096
B	5	1	5	7	5	7	3	0,409
C	1	0,2	1	3	1	3	0,33	0,096
D	0,33	0,14	0,33	1	0,33	1	0,2	0,039
E	1	0,2	1	3	1	3	0,33	0,096
F	0,33	0,14	0,33	1	0,33	1	0,2	0,039
G	3	0,33	3	5	3	5	1	0,225

Tabla 7: Matriz de influencia de las alternativas respecto a VE_2 .

VE_3	A	B	C	D	E	F	G	Pesos
A	1	1	3	3	3	1	0,33	0,151
B	1	1	3	3	3	1	0,33	0,151
C	0,33	0,33	1	1	1	0,33	0,2	0,059
D	0,33	0,33	1	1	1	0,33	0,2	0,059
E	0,33	0,33	1	1	1	0,33	0,2	0,059
F	1	1	3	3	3	1	0,33	0,151
G	3	3	5	5	5	3	1	0,370

Tabla 8: Matriz de influencia de las alternativas respecto a VE_3 .

VE_4	A	B	C	D	E	F	G	Pesos
A	1	1	1	0,33	0,2	1	1	0,077
B	1	1	1	0,33	0,2	1	1	0,077
C	1	1	1	0,33	0,2	1	1	0,077
D	3	3	3	1	0,5	3	3	0,218
E	5	5	5	2	1	5	5	0,397
F	1	1	1	0,33	0,2	1	1	0,077
G	1	1	1	0,33	0,2	1	1	0,077

Tabla 9: Matriz de influencia de las alternativas respecto a VE_4 .

Seguidamente, calculamos las matrices de influencia de las variables con respecto a cada una de las alternativas, siguiendo los mismos pasos y procedimientos descritos anteriormente.

A	VE ₁	VE ₂	VE ₃	VE ₄	Pesos
VE ₁	1	3	3	5	0,522
VE ₂	0,33	1	1	3	0,200
VE ₃	0,33	1	1	3	0,200
VE ₄	0,2	0,33	0,33	1	0,078

Tabla 10: Matriz de influencia de las variables respecto a A.

B	VE ₁	VE ₂	VE ₃	VE ₄	Pesos
VE ₁	1	0,5	1	3	0,151
VE ₂	5	1	5	7	0,635
VE ₃	1	0,2	1	3	0,151
VE ₄	0,33	0,14	0,33	1	0,063

Tabla 11: Matriz de influencia de las variables respecto a B.

C	VE ₁	VE ₂	VE ₃	VE ₄	Pesos
VE ₁	1	3	5	5	0,560
VE ₂	0,33	1	3	3	0,250
VE ₃	0,2	0,33	1	1	0,095
VE ₄	0,2	0,33	1	1	0,095

Tabla 12: Matriz de influencia de las variables respecto a C.

D	VE ₁	VE ₂	VE ₃	VE ₄	Pesos
VE ₁	1	1	1	0,33	0,167
VE ₂	1	1	1	0,33	0,167
VE ₃	1	1	1	0,33	0,167
VE ₄	3	3	3	1	0,500

Tabla 13: Matriz de influencia de las variables respecto a D.

E	VE ₁	VE ₂	VE ₃	VE ₄	Pesos
VE ₁	1	0,33	1	0,2	0,096
VE ₂	3	1	3	0,33	0,250
VE ₃	1	0,33	1	0,2	0,096
VE ₄	5	3	5	1	0,558

Tabla 14: Matriz de influencia de las variables respecto a E.

F	VE ₁	VE ₂	VE ₃	VE ₄	Pesos
VE ₁	1	3	1	3	0,375
VE ₂	0,33	1	0,33	3	0,125
VE ₃	1	3	1	3	0,375
VE ₄	0,33	1	0,33	1	0,125

Tabla 15: Matriz de influencia de las variables respecto a F.

G	VE ₁	VE ₂	VE ₃	VE ₄	Pesos
VE ₁	1	0,33	0,33	3	0,152
VE ₂	3	1	1	5	0,390
VE ₃	3	1	1	5	0,390
VE ₄	0,33	0,2	0,2	1	0,068

Tabla 16: Matriz de influencia de las variables respecto a G.

Una vez que han sido calculados todos los pesos relativos podemos proceder a cargar los pesos obtenidos en nuestra matriz no ponderada final.

		VE				Alternativas						
		VE ₁	VE ₂	VE ₃	VE ₄	A	B	C	D	E	F	G
VE	VE ₁	0	0,109	0	0	0,522	0,151	0,560	0,167	0,096	0,375	0,152
	VE ₂	0	0	0	0	0,200	0,635	0,250	0,167	0,250	0,125	0,390
	VE ₃	0	0,582	0	0	0,200	0,151	0,095	0,167	0,096	0,375	0,390
	VE ₄	0	0,309	0	0	0,078	0,063	0,095	0,500	0,558	0,125	0,068
Alternativas	A	0,160	0,096	0,151	0,077	0	0	0	0	0	0	0
	B	0,142	0,409	0,151	0,077	0	0	0	0	0	0	0
	C	0,151	0,096	0,059	0,077	0	0	0	0	0	0	0
	D	0,085	0,039	0,059	0,218	0	0	0	0	0	0	0
	E	0,113	0,096	0,059	0,397	0	0	0	0	0	0	0
	F	0,189	0,039	0,151	0,077	0	0	0	0	0	0	0
	G	0,160	0,225	0,370	0,077	0	0	0	0	0	0	0
ΣColumnas		1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 17: Supermatriz original o Supermatriz no ponderada.

Una vez que hemos determinado la Supermatriz no ponderada debemos comprobar que la misma sea estocástica (sumatoria de las columnas igual a 1). Como podemos observar en la tabla anterior, una de las columnas suma 2, por ello debemos calcular la relación entre las variables y alternativas (filas vs columnas) para que la supermatriz sea estocástica.

Para el cálculo podemos decir que las variables y las alternativas tienen una misma influencia de retroalimentación de acuerdo a la siguiente tabla.

	VE	Alternativas	Pesos
VE	1	1	0,5
Alternativas	1	1	0,5

Tabla 18: Influencia de realimentación y alternativas sobre VE.

El valor obtenido (0,5) en VE debe ser multiplicado por los valores de las filas VE₁ a VE₄. Del mismo modo, el valor obtenido (0,5) en Alternativas debe ser multiplicado por los valores de las filas A a G. Con esto convertimos

la supermatriz en una supermatriz estocástica, para lo cual obtenemos la supermatriz ponderada, que es representada a continuación.

		VE				Alternativas						
		VE ₁	VE ₂	VE ₃	VE ₄	A	B	C	D	E	F	G
VE	VE ₁	0	0,055	0	0	0,522	0,151	0,560	0,167	0,096	0,375	0,152
	VE ₂	0	0	0	0	0,200	0,635	0,250	0,167	0,250	0,125	0,390
	VE ₃	0	0,291	0	0	0,200	0,151	0,095	0,167	0,096	0,375	0,390
	VE ₄	0	0,155	0	0	0,078	0,063	0,095	0,500	0,558	0,125	0,068
Alternativas	A	0,160	0,048	0,151	0,077	0	0	0	0	0	0	0
	B	0,142	0,205	0,151	0,077	0	0	0	0	0	0	0
	C	0,151	0,048	0,059	0,077	0	0	0	0	0	0	0
	D	0,085	0,020	0,059	0,218	0	0	0	0	0	0	0
	E	0,113	0,048	0,059	0,397	0	0	0	0	0	0	0
	F	0,189	0,020	0,151	0,077	0	0	0	0	0	0	0
	G	0,160	0,113	0,370	0,077	0	0	0	0	0	0	0
ΣColumnas		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 19: Supermatriz ponderada.

Posteriormente debemos hallar la Supermatriz límite, para lo cual multiplicamos la Supermatriz ponderada por sí misma las veces que sea necesaria, la Supermatriz límite es aquella en donde todas las columnas son iguales. La supermatriz límite nos dice tanto la ponderación de las Alternativas analizadas como la de las Variables.

		VE				Alternativas						
		VE ₁	VE ₂	VE ₃	VE ₄	A	B	C	D	E	F	G
VE	VE ₁	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127
	VE ₂	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146
	VE ₃	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146
	VE ₄	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117
Alternativas	A	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059
	B	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079
	C	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
	D	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048
	E	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076
	F	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058
	G	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Σ Columnas		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 20: Supermatriz límite.

A partir de la Supermatriz límite podemos ver la ponderación final obtenida de las Alternativas en función de las Variables. En la misma se puede observar que la Alternativa con mayor peso es la G con 0,100, seguida de la B con 0,079, luego viene la E, A, F, D y finalmente la alternativa con menor peso es la C con 0,044. Con esto determinamos los niveles de importancia mediante los pesos obtenidos para cada alternativa en función de las variables (criterios) establecidos.

METODOLOGÍA

CAPÍTULO 2

2.1 Modelo de Análisis de Toma de Decisiones Basado en AHP

2.1.1 Formulación del Modelo AHP

El sector energético paraguayo tiene características particulares en relación con el excedente de energía eléctrica. La principal fuente de sus excedentes provienen de las centrales hidroeléctricas, entre ellas se encuentra la central hidroeléctrica ITAIPU Binacional, creada en virtud de un tratado binacional entre Paraguay y Brasil, con el fin de establecer el aprovechamiento de los recursos energéticos del río Paraná. El tratado de Itaipu establece que cada país es propietario del 50% de la energía producida por la central, siendo reconocido a cada parte el derecho a comprar la energía que no se utiliza por el otro país para su propio consumo. Hoy en día, Paraguay consume sólo alrededor del 26,2% de su cuota de energía⁴⁴. Por lo tanto, el excedente de la energía paraguaya es aprovechado por Brasil, y Paraguay recibe una remuneración fija por la cesión de esta energía, establecida a partir del Anexo C del tratado⁴⁵.

⁴⁴ Viceministerio de Minas y Energía, Balance Energético Nacional, 2017, Pág. 41 de 55.
<https://www.ssme.gov.py/vmme/pdf/balance2017/BEN2017.pdf>

⁴⁵ Arce, L. (2011). En la búsqueda de una estrategia global: La Política Externa del Paraguay. Cuadernos sobre Relaciones Internacionales, Regionalismo y Desarrollo, 6 (11), 105-127.

2.1.1.1 Definición de Alternativas

En el modelo estudiado, las alternativas son las posibles soluciones al problema tratado. Entre ellas se debe escoger aquella que permita cumplir el objetivo de lograr el mejor aprovechamiento del excedente hidroenergético del Paraguay o acercarse lo máximo posible a él. La elección no implica que la alternativa elegida sea la óptima para resolver el problema, pero si la mejor de entre todas las que se dispone para satisfacer el objetivo.

Se define el conjunto de alternativas como el conjunto finito de soluciones, estrategias, acciones, decisiones, etc. posibles que hay que analizar durante el proceso de resolución del problema de decisión que se considere. Constituye conjunto de posibles opciones definidas sobre las que la unidad decisora realiza una decisión. El conjunto de alternativas se designa por $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ donde A_i ($i=1, \dots, m$) son cada una de las alternativas posibles. En este trabajo se propone un enfoque basado en AHP y ANP para el análisis de las estrategias del Paraguay con el fin de tomar ventaja de su excedente de energía eléctrica que buscan fomentar el desarrollo del país. Es importante tener en cuenta que estas estrategias podrían definir la política energética paraguaya y que debe evaluarse desde varias perspectivas, debido al hecho de que, como es bien sabido, la energía es uno de los pilares fundamentales que propician el desarrollo y progreso humano.

2.1.1.2 Definición de Criterios

Los criterios representan los factores que el decisor o grupo de decisores, consideran que son esenciales para analizar el problema. Se pueden representar los criterios en un único nivel de la jerarquía, pero si es necesario detallarlos mejor, se pueden insertar tantos niveles como sean necesarios, de criterios subalternos (subcriterios) entre las alternativas y la fila superior de criterios.

Los criterios o subcriterios se comparan entre sí, mediante comparaciones pareadas (dos a dos), para determinar cómo influyen en el elemento superior (criterio-objetivo; subcriterio-criterio). Hay que tener en cuenta que el número de elementos para los que se realiza la comparación relativa no debe superar el valor 7 ± 2 , el “número mágico” ya que la memoria a corto plazo (donde se encuentra nuestra capacidad para procesar información), tiene una capacidad de almacenamiento, que está entre 5 y 9⁴⁶.

El conjunto de criterios a considerar difieren según sea el agente decisor y el tipo de problema que se analice, por eso no se puede proponer un conjunto de criterios fijo que sirva para cualquier situación. No obstante, si se pueden sugerir algunas recomendaciones para la selección de los criterios.

Como se ha mencionado, los criterios de decisión corresponden a aspectos tales como atributos, objetivos o parámetros que constituyen los ejes fundamentales a partir de los cuales el decisor justifica, transforma y argumenta sus preferencias. La selección adecuada de los criterios constituye una etapa fundamental en cualquier proceso de toma de decisión, ya que un planteamiento inadecuado de los mismos puede llevar a resultados poco satisfactorios o incluso a invalidar todo el proceso.

En primer lugar los criterios deben ser comprensibles y medibles, es decir, el valor del atributo ha de ser el adecuado para expresar o medir el grado de cumplimiento del objetivo asociado y debe ser posible asociarle una escala

⁴⁶ Miller, G. (1956). El mágico número siete, más o menos dos: Algunas limitaciones en nuestra capacidad para el procesamiento de información. *MV Sebastián (compiladora), Lecturas en psicología de la memoria. Madrid, Alianza, 131-153.*

conocida, bien mediante la obtención de una distribución de probabilidad sobre los distintos niveles del atributo para cada alternativa, o bien mediante la asignación de un orden a las preferencias del decisor para los diferentes niveles del atributo.

Es importante mencionar que para este trabajo se consultó a diversos grupos de expertos de instituciones públicas y privadas que tienen relación con el sector energético nacional. Mediante dichas encuestas llevadas a cabo (ver Apéndice 1) se consultó sobre cuál o cuáles criterios consideran importantes, qué peso consideran pertinente asignarles, y así también se consultó respecto a si consideran que los criterios establecidos son los más representativos. Del mismo modo se consideró como otro apartado elevar algún otro criterio además de los establecidos en la encuesta de tal manera a evaluarlo y considerarlo en el análisis.

2.1.1.3 Definición de Métricas de Criterios

En el Paraguay se propicia un amplio debate público sobre el uso de su excedente de energía hidroeléctrica el cual ha estado sucediendo desde hace ya algunos años. Las diferentes alternativas para su implementación a menudo se caracterizan por el conflicto entre los criterios sociales, económicos, técnicos, ambientales y de factibilidad. Debido a la complejidad de las negociaciones y de los diferentes agentes implicados, una idea única sobre lo cual es la mejor alternativa, no se encuentra disponible. Sin embargo, la percepción general de la sociedad paraguaya es uniforme en el sentido de que los responsables políticos deben tomar decisiones que reditúen en los mayores beneficios para el país. Por ello, resulta fundamental definir adecuadamente los indicadores de desempeño para cada criterio. El desarrollo del producto interno Bruto (PIB) se evalúa en el criterio económico, la Energía No Suministrada (ENS) en el análisis técnico, la cantidad de empleos generados en el estudio referente a

lo social, los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el punto de vista del medio ambiente y, por último, el riesgo de implementación bajo el criterio de viabilidad (político).

2.1.2 Formulación de Modelos de Métricas de Criterios basados en el AHP

En general, la construcción de modelos se ve influenciada por el ambiente y por el observador que determina su estructura. Por ello, frente a un mismo problema es posible llegar a resultados similares a partir de distintas configuraciones de modelos, donde cada conformación particular dependerá de cómo el tomador de decisiones enfrenta el problema. Durante el proceso de desarrollo del modelo presentado en este trabajo, fue posible identificar formas generales de estructurar el modelo, que se diferencian por el grado de especificidad o generalidad asignado a cada nivel estructural del modelo. En general, el AHP propone para la construcción de los modelos la comprensión intuitiva del problema enfrentado, que luego es jerarquizado siguiendo una estructura de redes de comparación más o menos definida. Todos los modelos generados a partir de esta metodología deben poseer al menos tres niveles: primero, un propósito global o meta, que se ubica en la parte superior; segundo, uno o más criterios que permitan apoyar la toma de decisiones respecto a la meta y que definan las alternativas en el medio; y por último, varias alternativas concurrentes en la parte inferior del diagrama.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un ejemplo que ilustre el uso de una metodología que sirva como alternativa para la toma de decisiones en el área de planificación energética. Se desarrolló una aplicación del AHP y ANP para comparar los escenarios de alternativas establecidos. Antes de construir el modelo fue necesario establecer claramente cuáles son las alternativas consideradas en el proceso de decisión y sus principales

características. Luego, se debe establecer un sistema de criterios que permita comparar las alternativas propuestas. El sistema de criterios supone la construcción de redes de relaciones entre los aspectos fundamentales de análisis del problema: actores involucrados, actividades, posibles resultados y características de las alternativas, expresadas en función de variables cuantitativas y/o cualitativas.

Una vez que se han establecido las alternativas, los criterios de comparación y los méritos, se deben realizar las comparaciones de las alternativas de acuerdo a los méritos y criterios establecidos, mediante comparación de pares de elementos.

La comparación se realiza entre nodos y clúster, con lo cual se obtienen las prioridades de los criterios, que revelan las preferencias del decisor. El resultado global del modelo AHP se puede obtener mediante la síntesis de las prioridades de las alternativas de todas las redes del modelo.

La característica esencial de los problemas para los cuales el AHP y ANP resulta una herramienta muy útil, es la mutua influencia que se dan entre las variables del problema y la dificultad de establecer una jerarquía de estructuras de modelo que no se relacionen entre sí.

2.1.2.1 Modelo Técnico

La inclusión de incertidumbre en el análisis de riesgo del desempeño de las inversiones del sistema de transmisión cumple un protagonismo importante debido que brinda un mejor panorama sobre los escenarios que normalmente no son considerados.

La obtención de estos números aleatorios puede realizarse con las funciones del software Matlab, que tiene la capacidad de proveer números pseudoaleatorios.

El Flujo Óptimo de Potencia – Corriente Directa (DC-OPF) se calcula utilizando el paquete de simulación de sistemas de potencia basados en MATLAB Matpower 3.2⁴⁷.

De esta forma se incorpora la incertidumbre al flujo de demandas (cargas) óptimo de manera a estudiar el efecto causado en las alternativas de expansión de la transmisión que son contemplados.

Las potencias activas de déficit se modelaron como cargas despachables. Según la Sección 5.4.2 del manual de Matpower; el enfoque para cargas despachables o sensible a los precios indica modelar dichas cargas como inyecciones negativas de energía asociadas con costos negativos. Esto se hace mediante la especificación de un generador con una salida negativa, en un rango comprendido entre una inyección mínima igual a la totalidad de la carga expresada en forma negativa y a una inyección máxima equivalente a cero.

El software MATPOWER, es un paquete de archivos .m de MATLAB, para la solución de problemas de flujo de potencia, flujo de potencia óptimo, estimación de estado, etc. Está concebida como una herramienta de simulación para investigadores y educadores, fácil de utilizar y modificar.

⁴⁷ <http://www.pserc.cornell.edu/matpower>

MATPOWER, está diseñado para entregar el mejor rendimiento posible sin perder simplicidad para comprender y modificar su código. MATPOWER está disponible en <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>. MATPOWER fue desarrollado por Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sánchez and Deqiang Gan del Power Systems Engineering Research Center (PSERC) de la Universidad de Cornell <http://www.pserc.cornell.edu> bajo la dirección de Robert Thomas.

MATPOWER, puede hacer uso de varias herramientas para resolver OPF's. MATPOWER, utiliza por defecto el método del punto interior; el solver MIPS (Matlab Interior Point Solver). En las versiones anteriores MATPOWER, disponía de dos herramientas, la primera basada en la función "constr" del paquete de herramientas de Optimización de MATLAB, el cual usa una técnica de programación cuadrática sucesiva con aproximaciones de Quasi-Newton para la Matriz Hessiana. La segunda está basada en programación lineal. Pudiéndose utilizar las herramientas de programación lineal disponibles en el paquete de herramientas de optimización de MATLAB, u otras herramientas de programación lineal desarrollada por terceros.

Las herramientas mencionadas anteriormente han sido mejoradas y desplazadas por nuevas herramientas que muestran un mejor comportamiento en términos de velocidad de convergencia.⁴⁸

Algunas de las tareas que permite abordar MATPOWER, incluyen la resolución de flujos de carga y flujos de carga óptimos, tanto en la modalidad

⁴⁸ Cabrera, C. (2008). Aplicación de algoritmos genéticos al pre despacho de unidades térmicas usando flujo óptimo de potencia, P. 91-92.

DC como en AC; y con distintos algoritmos, unos implementados en lenguaje Matlab y otros precompilados, entre los que se encuentran: El Primal-Dual Interior Point Method (PDIPM), el MINOS, el BPMPD, etc.⁴⁹

Dependiendo del caso de estudio habrá que escoger el algoritmo más adecuado a través del vector de opciones `mpopt`, en este trabajo el optimizador utilizado es el `BPMPD_MEX`.

`BPMPD_MEX`, es un inteface de Matlab®MEX a BPMPD, una herramienta de punto interior para programación cuadrática desarrollado por Csaba Mészáros en el MTA SZTAKI, Computer and Automation Research Institute, Hungarian Academy of Science, Budapest, Hungría.

La versión actual de la interface de MEX, se basa en la versión 2.21 del programa de solución BPMPD.⁵⁰

Todos los modelos generados a partir de esta metodología deben poseer al menos tres niveles: primero, un propósito global o meta, que se ubica en la parte superior; segundo, uno o más criterios que permitan apoyar la toma de decisiones respecto a la meta y que definan las alternativas en el medio; y por último, varias alternativas concurrentes en la parte inferior del diagrama.

2.1.2.2 Modelos Ambiental, Económico y Social

Para estos modelos se utiliza un análisis de regresión lineal⁵¹, que es una técnica estadística que permite estudiar la relación entre variables. Esto

⁴⁹ Heras, M. (2011). Flujo de Cargas Óptimo Probabilístico, 8-9.

⁵⁰ Disponible en línea: www.pserc.cornell.edu.

⁵¹ Gujarati, D. N. D. N. (1992). *Econometría*. McGraw-Hill.

se adapta a una amplia variedad de situaciones como las que se analizan en este trabajo, como el ámbito ambiental, económico y social. En la investigación social, el análisis de regresión se utiliza para predecir la cantidad de empleos generados. En el contexto del ámbito económico se analiza el comportamiento del PIB. Para el criterio ambiental se utiliza para predecir la emisión de los gases de efecto invernadero. Todos estos cálculos se realizan en función al consumo de energía eléctrica. Para eso, se usa la herramienta Minitab 16.

El Software Minitab 16, es un programa de computadora diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas. Combina lo amigable del uso de Microsoft Excel con la capacidad de ejecución de análisis estadísticos.

En dicho análisis, resulta fundamental el uso de un paquete estadístico. Minitab es un paquete estadístico que abarca todos los aspectos necesarios para el aprendizaje y la aplicación de la Estadística en general. El programa incorpora opciones vinculadas a las principales técnicas de análisis estadístico (análisis descriptivo, contrastes de hipótesis, regresión lineal y no lineal, series temporales, análisis de tiempos de fallo, control de calidad, análisis factorial, ANOVA, análisis cluster, etc.), además de proporcionar un potente entorno gráfico y de ofrecer total compatibilidad con los editores de texto, hojas de cálculo y bases de datos más usuales. Con el software Minitab, se logran crear funciones, crear gráficas y generar estadísticas.

Para el cálculo de la regresión en el módulo económico primeramente se establece si el producto interno bruto tiene relación de causalidad con el consumo de energía del Paraguay, para poder afirmar o no esto, hallamos la Causalidad de Granger de las series estudiadas (periodo 1991-2007) a través

del software EVIEWS7 al cual se le aplico un retardo (2), el cual se traduce al 15% de la cantidad total de datos que se poseen.

obs	SER01	SER02
1991	640.0000	1.33E+10
1992	637.0000	1.36E+10
1993	725.0000	1.42E+10
1994	774.0000	1.50E+10
1995	928.0000	1.60E+10
1996	835.0000	1.63E+10
1997	844.0000	1.70E+10
1998	857.0000	1.70E+10
1999	898.0000	1.67E+10
2000	891.0000	1.63E+10
2001	920.0000	1.62E+10
2002	859.0000	1.62E+10
2003	1055.000	1.69E+10
2004	1151.000	1.76E+10
2005	1247.000	1.80E+10
2006	1370.000	1.88E+10
2007	1464.000	1.99E+10

Figura 8: Series 01 y 02 donde, SER01 es el consumo de energía en GWh, y SER02 es el PIB total en miles de guaraníes.

Pairwise Granger Causality Tests
Date: 01/22/14 Time: 15:30
Sample: 1991 2007
Lags: 2

Null Hypothesis:	Obs	F-Statistic	Prob.
SER02 does not Granger Cause SER01	15	0.87713	0.4457
SER01 does not Granger Cause SER02		9.38379	0.0051

DB = none WF = causalidad gwh vs pib total

Figura 9: Causalidad de Granger del Consumo de Electricidad en función al PIB total del Paraguay.

A partir de la figura se observa que el valor de los estadísticos muestran que existe una causalidad bidireccional o de ambos sentidos, en este caso la SER02 es causa granger de SER01 (al menos 87,7% de nivel de significación) mientras que SER01 es causa granger de SER02 (al menos 900% de nivel de significación).

El programa E-Views 7, es la versión en entorno MS-Windows del antiguo Micro -TSP (Time Series Analysis) desarrollado por primera vez en 1981. Es uno de los más utilizados dentro del campo de la econometría y su manejo permite la estimación, resolución y uso de modelos econométricos de distinta naturaleza mediante la utilización de una amplia gama de procedimientos.

Su “puesta al día” en relación con los últimos avances de la econometría aplicada es notable y, para los que conocen cada una de las técnicas, su utilización es extremadamente intuitiva. Esta adecuación a la práctica profesional de la econometría se debe sin duda a sus autores que, desde las primeras versiones del TSP, diseñaron el programa de cara a su utilización real adaptándolo a sus propias necesidades del día a día.

Aunque el programa fue desarrollado por economistas y la mayor parte de sus usos se realizan en el campo de la economía no hay nada en su diseño que limite su utilidad a las series temporales económicas.

El funcionamiento del programa E-Views, está pensado alrededor del concepto de objeto. Un objeto puede ser una serie temporal, una ecuación, un modelo (conjunto de ecuaciones), un coeficiente de una ecuación o una matriz. Cada objeto tendrá, obviamente, un nombre. De entre todos los tipos de objetos posibles, destaca en E-Views un nuevo tipo llamado grupo. El grupo

puede entenderse como un conjunto de series que permanecen unidas para realizar sobre todas ellas simultáneamente operaciones generalmente de edición o consulta de datos.

Los objetos que en cada momento se estén utilizando podrán ser visualizados en la pantalla principal del E-Views; como en cualquier otra aplicación de entorno Windows, los objetos aparecerán bien como un icono, bien como una ventana. Conviene tener en cuenta que un objeto puede presentarse de distintas formas: por ejemplo, de una serie temporal pueden aparecer sus datos, su gráfico, sus estadísticos básicos, su histograma de frecuencias etc. El usuario puede cambiar fácilmente de una forma a otra de presentación para cada objeto utilizando lo que se denominan vistas o views del objeto. Debe recordarse que sólo puede abrirse una ventana para cada objeto, y será en esa ventana en donde veamos representado el objeto de distintas formas.

Con esta herramienta podemos realizar el Test de causalidad de Granger (Granger Causality Test). El test de causalidad de Granger es ampliamente conocido en la práctica econométrica ya que permite identificar de forma rápida relaciones de causalidad 1 entre las variables explicativas y la variable a explicar. El objetivo teórico de este test es determinar si una variable X causa a otra variable Y. El procedimiento que se utiliza es sencillo, especificada la variable X y la variable Y se realiza la regresión de la variable endógena Y_t sobre su propio pasado, es decir, Y_{t-1} , Y_{t-2} , Y_{t-3} , sobre la variable X_t y una serie de valores retrasados de la misma, es decir, X_{t-1} , X_{t-2} , X_{t-3} , etc. Una vez realizada la regresión, se determina si resulta más fácil predecir el futuro de la variable Y con este instrumento de lo que resultaría estimado Y_t exclusivamente en función de su pasado sin conocer su relación con X: dicho de otro modo, se analiza si la variable X actual y pasada aporta información

valiosa para explicar el futuro de Y (se dice, en ese caso que X es causa Granger de Y).

Para realizar este test en E-Views, debe seleccionarse la opción Granger Causality del menú Views de la ventana del grupo activo. E-Views preguntará el número de retardos de la endógena y exógena que queremos incluir en la regresión. A este respecto, la elección debe realizarse atendiendo a criterios puramente conceptuales procurando, eso sí, no quedarse demasiado corto, ya que, siempre que se cuente con un número elevado de observaciones, el test de Causalidad de Granger es más robusto cuanto mayor es el número de retardos incorporados.

Una vez seleccionado el número de retardos a considerar, E-Views realiza automáticamente las distintas regresiones que completan la idea del test expuesta anteriormente y muestra el resultado. Debe observarse que E-Views muestra el test de causalidad en ambas direcciones X como causa Granger de Y e Y como causa Granger de X .

La hipótesis que se contrasta es que los coeficientes de las regresiones de Y sobre X , así como los de X sobre Y , son nulos para la variable de apoyo, es decir, que la variable X no aporta información para explicar a Y o bien que Y , no aporta información para explicar X .

Si el valor del estadístico de referencia "F" supera el valor tabulado se rechazará la hipótesis nula y por tanto se aceptará que X causa a Y o viceversa. En la ilustración que aparece en este ejemplo, X causaría a Y , según el concepto de causalidad de Granger aunque la relación inversa no se produciría.

2.1.2.3 Modelo de Factibilidad Política

En el criterio de factibilidad política, se trató de resumir la viabilidad de los escenarios, dado el panorama político e institucional. Por esta razón, se establece una clasificación basada en la probabilidad de ejecución de los escenarios energéticos analizados para tratar de medir el riesgo de una aplicación efectiva. Luego de la consulta al panel de expertos, suponemos que la (A1 - seguir cediendo la energía al Brasil) tiene el riesgo más bajo, teniendo en cuenta que este escenario ya se está ejecutando.

Bajo la (A3 - vender un gran bloque de energía a industrias electrointensivas), el riesgo es relativamente bajo porque las negociaciones se llevan a cabo sólo con un único agente, que a su vez reduce la complejidad del proceso.

Para la (A2 - fomentar la venta de energía en el mercado internacional), Paraguay debe negociar en primer lugar con el Brasil con el fin de hacer posible su inclusión en el mercado mayorista brasileño. Para este escenario, es necesaria una negociación adicional con los otros agentes del mercado con el fin de obtener un acuerdo de compra de energía en buenas condiciones. Este proceso puede ser bastante complejo; Por lo tanto, la aplicación de la (A2) es relativamente arriesgada.

Por último, la alternativa más complicada o de mayor riesgo es (A4 - incentivar la venta de energía a industrias nacionales), ya que necesita un cambio completo de los paradigmas existentes de la energía paraguaya y su sector productivo que puede ser bastante engorroso debido a las limitaciones políticas e institucionales. Bajo (A4), una instalación masiva de industrias debe ser incentivada y se requieren negociaciones con varias partes. Además, se

necesitan inversiones en infraestructuras importantes en el sistema de energía con el fin de poder acompañar adecuadamente el desarrollo industrial.

2.1.2.4 Modelo Integral para la evaluación de alternativas sobre la utilización de excedentes hidroeléctricos basados en el AHP

Al integrar todas las metodologías presentadas anteriormente, se resumen en un Análisis de Decisión Multicriterio (ADMC) basado en un Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) aplicado a opciones de políticas energéticas y consideramos criterios múltiples bajo incertidumbre. Bajo los lentes de ADMC/AHP, se analizan diferentes opciones de políticas energéticas para el uso del excedente hidroeléctrico. En el contexto de dos talleres celebrados en los años 2015 y 2016 con las partes interesadas locales, se eligió la meta del bienestar general de la sociedad y se aclararon los criterios pertinentes. Cada una de las opciones presentadas debe ser considerada como hipotética línea de acción que los tomadores de decisiones podrían o no tomar. Las opciones se generaron sobre la base de los resultados de una consulta entre las partes interesadas, al mismo tiempo que son realistas y pertinentes dado que algunas de ellas ya están incluidas en la agenda política, ya las opciones A1, A2 y A3 ya están siendo consideradas en el informe CRU⁵². Por otro lado, A4 es una opción política que hasta ahora no se ha considerado seriamente en la agenda política. Además, los cinco criterios (viabilidad económica, técnica, social, ambiental y política) se clasificaron en función de su grado de importancia, basándose en los resultados de una encuesta realizada entre 80 interesados para recoger información sobre sus preferencias cardinales de los criterios en una escala de 1 al 9 según lo establece la metodología adoptada.

⁵² CRU Strategies Ltd., 2011. Energía y Aluminio en Paraguay: Informe final preparado para ITAIPU Binacional. CRU Strategies Ltd., PP. 324. <https://elpueblodecide.files.wordpress.com/2012/08/cru-inf-final-24-10-2011.pdf>.

Teniendo en cuenta todo lo presentado anteriormente, la Figura 10 muestra la jerarquía de la decisión de política energética que se ha configurado para el problema basado en un modelo AHP. En las siguientes secciones, se presentan las alternativas y los criterios con sus indicadores.

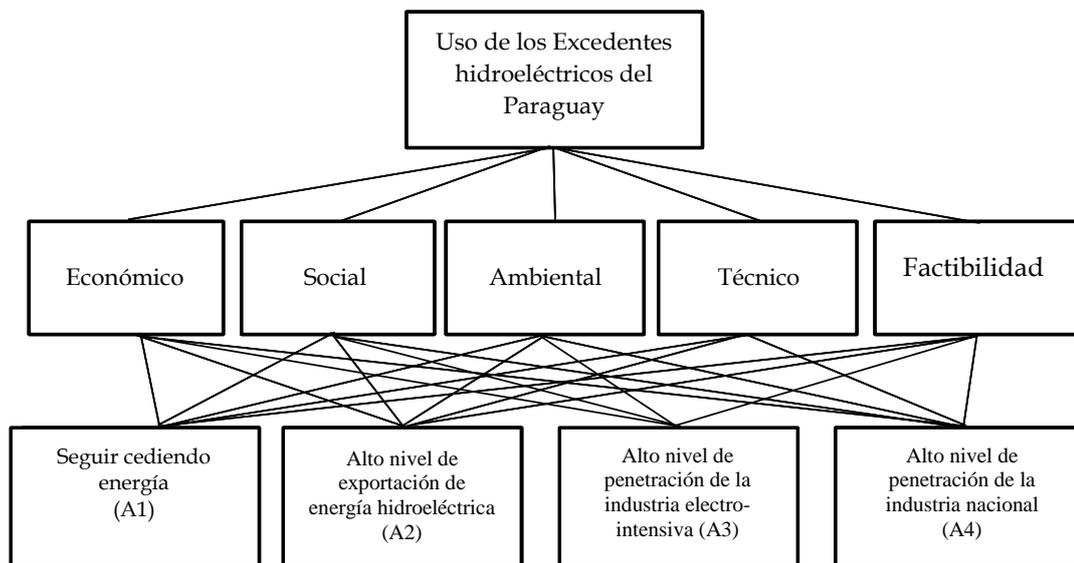


Figura 10: Árbol Jerárquico de decisiones del Modelo AHP.

2.1.2.5 Opciones de Políticas (Alternativas)

Las opciones de Políticas Consideradas son:

(A1): Continuar cediendo energía: Paraguay sigue cediendo su excedente de electricidad al Brasil (es decir, *Business as Usual* o "BaU").

(A2): Alto nivel de exportación de energía hidroeléctrica: La electricidad se vende en el mercado mayorista brasileño a precios de mercado, generando un ingreso neto de alrededor de 50 USD/MWh^{53 54}.

⁵³ Cámara de Comercialización de Energía Eléctrica, 2015.

⁵⁴ Sachs, J., Sachs, L., Toledano, P., & Maennling, N. (2013). Leveraging Paraguays Hydropower for Sustainable Economic Development. *Vale Columbia Center, a joint center of Columbia Law School and the Earth Institute at Columbia University*.

(A3): Alto nivel de penetración de la industria electro-intensiva: se instala en el país una fábrica similar a la fundidora de aluminio RTA de 1100 MW.

(A4): Alto desarrollo de la pequeña industria: Se instalan muchas pequeñas industrias. Los parques industriales de 180 MW se establecen en el escenario base y alcanzan una demanda acumulada de 1100 MW.

Las opciones de políticas A1 y A2 podrían potencialmente exhortar y mantener de forma perpetua el comportamiento de búsqueda de rentas, ya que algunos poderosos actores en Paraguay pueden utilizar los recursos en actividades políticas para aumentar su participación en la riqueza existente derivada de la venta o cesión de excedentes hidroeléctricos. En cuanto a la opción A3, optamos particularmente por considerar la fundición de aluminio como una opción de política, como ha sido en la agenda pública y considerando que el gobierno ha mostrado interés en ella. Además, se consideró basado en el hecho de que hay estudios actualizados y bien respaldados sobre su potencial con información actualizada sobre el proyecto. En el Informe Sachs⁵⁵ ya se señalaron algunas advertencias, como por ejemplo que en todo el mundo sólo un tercio de las grandes fundiciones de aluminio procesan el 50% o más en el mercado nacional.⁵⁶ En este caso, las fundiciones se benefician de una fuerte intervención gubernamental y los países de acogida son relativamente ricos como Arabia Saudita, Omán, Brasil y Canadá.³⁸ La alternativa A4 tiene el potencial de desencadenar las transformaciones

⁵⁵ Sachs, J., Sachs, L., Toledano, P., & Maennling, N. (2013). Leveraging Paraguays Hydropower for Sustainable Economic Development. *Vale Columbia Center, a joint center of Columbia Law School and the Earth Institute at Columbia University*.

⁵⁶ Toledano, P., & Maennling, N. W. (2013). Report on Leveraging Paraguay's Hydropower for Sustainable Economic Development.

tecnológicas y asociadas institucionales/organizacionales en el uso final de la energía que se reconocen como motores fundamentales de las transiciones históricas de la energía. Una transición uso amplio de la electricidad podría expandir la demanda de electricidad y dar lugar a una transición en los servicios de energía para que las nuevas combinaciones tecnológicas puedan permitir nuevos y/o mejorar los servicios con mayor eficiencia y disminución de los costos.⁵⁷ Aún más, la opción A4 es una opción realista en el caso de Paraguay, teniendo en cuenta especialmente que los países en desarrollo suelen experimentar transiciones relacionadas con la energía a niveles de ingresos más bajos, con tasas de cambio más rápidas y tienden a usar menos energía Per cápita que los países desarrollados con menor impacto ambiental sistemático per cápita.⁵⁸

2.1.2.6 Criterios e Indicadores de Evaluación

Criterio Económico: este criterio tiene en cuenta las dimensiones generales que contribuyen a la creación de servicios y bienes en un país. El indicador para este criterio es el promedio de la tasa de crecimiento del PIB en el horizonte analizado. En primer lugar, probamos la causalidad del consumo eléctrico industrial sobre el PIB mediante una prueba de causalidad de Granger, en la que se analizan series temporales históricas (período 1991-2011). Esto nos permite articular con precisión la evolución del PIB en términos de consumo eléctrico industrial. Así, definimos una función lineal para predecir la evolución temporal del PIB en función de la demanda industrial de

⁵⁷ Grubler, A., 2012. Energy transitions research: Insights and cautionary tales. *Energy Policy* 50, 8–16. 10.1016/j.enpol.2012.02.070.

⁵⁸ Marcotullio, P.J., Schulz, N.B., 2007. Comparison of Energy Transitions in the United States and Developing and Industrializing Economies. *World Development* 35 (10), 1650–1683. 10.1016/j.worlddev.2006.11.006.

electricidad en Paraguay (Ec. 14), en base al PIB paraguayo⁵⁹ y al consumo de energía eléctrica⁶⁰:

$$\text{PIB}(t)=558+13.5\cdot\text{ED}(t) \quad (14)$$

Donde el PIB(t) es el PIB en miles de millones de Gs. en el año t y ED(t) es el consumo industrial de electricidad paraguaya en GWh al año t. Para A1, la tendencia de estas variables se estima basándose en estas funciones para estimar el crecimiento medio del PIB. En el caso de A2, agregamos al PIB los ingresos generados por la venta de electricidad a una renta igual a 50 USD / MWh, suponiendo que Paraguay venda unos 9504 GWh cada año a partir de 2017. Asimismo, para A3 la contribución de la fundidora de aluminio de RTA se agrega al PIB. Estos valores se obtienen del análisis de la CRU.⁶¹ Por último, en el caso de A4, el crecimiento medio del PIB se estima sumando al consumo eléctrico correspondiente a la instalación de las nuevas industrias (1037 GWh al año en progresión aritmética).

Criterio Social: este criterio tiene en cuenta un aspecto fundamental que contribuye al bienestar social: la creación de empleo.⁶² Hemos optado por la creación de empleos como indicador, entre otros indicadores potenciales,

⁵⁹ Banco Central del Paraguay, 2011. Incorporación de las Binacionales a las Cuentas Nacionales y a la Balanza de Pagos de Paraguay. http://www.ssme.gov.py/vmme/images/noticias/Incorporacion_de_Ingreso_Binacionales_a_PIB%28rev%29.pdf. Accessed 10 July 2016.

⁶⁰ Amarilla, R., Buzarquis, E., Domaniczky, J., Barán, B., & Blanco, G. (2015, November). Analysis of the energy sector of Paraguay. Energy balance in terms of useful energy in 2011. In 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV) (pp. 1-7). IEEE.

⁶¹ Ministerio de Industria y Comercio, Equipo de Trabajo Institucional ETI, 2011. Proyecto de Instalación de una Planta de Aluminio en Paraguay. <http://www.ssme.gov.py/vmme/pdf/riotinto/diegozavala.pdf>. Accessed May 23, 2016.

⁶² Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., & Zhao, J. H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263-2278.

sobre todo por la relevancia de la creación de empleos de larga duración no asociados a transferencias sujetas a regalías que son transitorias, dependientes de la existencia de un superávit a corto plazo. En el caso específico de Paraguay, la importancia de la creación de empleos como criterio social es primordial, dado los altos niveles de subempleo e informalidad⁶³ y el hecho de que permitiría empoderar sectores de la población que de uno u otro modo dependen de los programas de acercamiento, dado que el sistema de bienestar social (servicios de desempleo) no es muy fuerte en Paraguay, como es el caso de los estados de bienestar avanzados (como en los países escandinavos o centroeuropeos). Estimamos el número de empleos por medio de proyecciones basadas en datos históricos o estudios adicionales específicos dependiendo de la opción que se está analizando. Considerando que para las alternativas A1 y A2 no implican nueva creación directa de empleo, los valores de generación de empleo para A3 se obtuvieron de los datos proporcionados durante las Audiencias Públicas organizadas en 2011 para discutir la posible instalación de Rio Tinto Alcan en Paraguay. Se estima que el establecimiento de la fundición de aluminio se traduciría en la creación de 7.000 oportunidades directas de empleo.⁶⁴ Para la opción A4, el valor de creación de empleo se obtiene mediante una función que vincula el número de puestos de trabajo generados y el consumo de electricidad. Esta función se basa en datos de generación de empleo por industrias en Paraguay durante el período 2007-2011 y el correspondiente consumo de electricidad de este sector (Ec. 15). La ecuación de regresión es:

⁶³ International Labour Organization -ILO, 2014. Slight decline and key challenges in informal employment in Paraguay. Notes on Formalization of the Regional Office for Latin America and the Caribbean. http://www.ilo.org/americas/sala-de-prensa/WCMS_245890/lang-en/index.htm

⁶⁴ Ministerio de Industria y Comercio, Equipo de Trabajo Institucional ETI, 2011. Proyecto de Instalación de una Planta de Aluminio en Paraguay. <http://www.ssme.gov.py/vmme/pdf/riotinto/diegozavala.pdf>.

$$EG(t)=45945+327 \cdot ED(t)-21155 \cdot t \quad (15)$$

Donde $EG(t)$ es el número total de empleos generados y $ED(t)$ la demanda de electricidad industrial (GWh) en el año t . El coeficiente de determinación, R^2 (R-cuadrado) de la regresión propuesta es 92.1%.

Adicionalmente, se estima una regresión lineal del consumo de electricidad industrial del Paraguay (Ec. 16) a partir de datos históricos y se define de la siguiente manera:

$$ED(t)=1216.36+69.7 \cdot t \quad (16)$$

En este caso, el R^2 es 95.1%, por lo que esto implica una bondad de ajuste significativa del modelo.

Criterio de Factibilidad Política: Dentro de este criterio, proponemos resumir la viabilidad de las opciones de políticas dada el panorama político e institucional a través de un ranking basado en la probabilidad de implementación de las opciones políticas analizadas, intentando medir el riesgo de una implementación efectiva en una consulta de un grupo de expertos. Suponemos que A1 tiene el riesgo más bajo ya que este escenario ya está en ejecución. Bajo A3, el nivel de riesgo es relativamente bajo, ya que las negociaciones se realizan únicamente con un solo agente, lo que a su vez reduce la complejidad del proceso. A la inversa, en el marco de A2, el Paraguay tendría que negociar primero con Brasil para poder entrar en el mercado mayorista brasileño. Para esta opción, es necesaria una etapa de negociación adicional, ya que otros agentes del mercado tienen que ser abordados para obtener un Acuerdo de Compra de Energía bajo condiciones convenientes. Este proceso puede ser bastante desafiante; Por lo tanto, la implementación de A2 es relativamente riesgosa. Finalmente, la alternativa más riesgosa bajo este

criterio es A4. Esto es así principalmente porque implica un cambio completo del paradigma en el sector energético y productivo paraguayo, que podría ser bastante engorroso, dadas las limitaciones políticas e institucionales existentes. Además, en el marco de A4, se debe incentivar una instalación masiva de industrias y se requieren negociaciones con varias partes. Además, se necesitan importantes inversiones en infraestructura, incluyendo el sistema eléctrico y otras infraestructuras básicas, tales como carreteras internas e infraestructura de abastecimiento de agua, redes de telecomunicaciones, entre otras, para seguir adecuadamente el desarrollo industrial. Por lo tanto, cuando se consideran todos estos factores relacionados con los costos de negociación de la implementación de opciones de política como los mencionados anteriormente, además de los esfuerzos necesarios para impulsar la coordinación y promoción de la inversión directa local y extranjera, A4 es el más arriesgado de todas las opciones políticas.

Criterio Técnico: Elegimos como indicador de este criterio el Costo Esperado de Energía No Suministrado - (*CENS*). Este indicador intenta medir el impacto de una alternativa dada en la seguridad de la energía eléctrica del país. Representamos el sistema de energía paraguayo en un modelo de corriente continua (DC) de 94 buses. Los parámetros de líneas de transmisión, unidades de generación y cargas se seleccionan cuidadosamente basándose en la base de datos de la eléctrica paraguaya (ANDE) para el sistema existente así como su expansión en el futuro. En este sentido, los cálculos del Optimal Power Flow (OPF) en el sistema eléctrico paraguayo se realizan para determinar el mínimo (*CENS*) bajo la ejecución de cada alternativa. Así, el problema de optimización se formula de la siguiente manera:

$$\min \left[\sum_i \sum_q \left(C_g(P_g^i) + E(\text{CENS}) \right) \right]$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_g P_g^i - \sum_d P_d^i - \sum_l F_l^i = 0 \\ P_g^{i,\min} \leq P_g^i \leq P_g^{i,\max} \\ F_l^{\min} \leq F_l \leq F_l^{\max} \end{cases} \quad (17)$$

Donde C_g es la curva de oferta del proveedor P_g^i y P_d^i son la potencia generada y demandada por la unidad g y el cliente d respectivamente en el nodo i . El flujo en todas las líneas conectadas al nodo i se denota por F_l . Los límites de operación de cada unidad generadora se indican por $P_g^{i,\min,\max}$ y las restricciones de red son fijadas por $F_l^{\min,\max}$.

Dado que la futura seguridad energética se basa principalmente en el crecimiento de la demanda eléctrica, que en Paraguay es bastante volátil, consideramos el crecimiento de la demanda como una variable incierta para cubrir todos los posibles escenarios futuros. Por lo tanto, la evolución estocástica del modelo de mercado de la energía tomado como base en este trabajo puede caracterizarse como un modelo ascendente, donde los costos de generación anuales son directamente influenciados por los movimientos estocásticos a largo plazo de la demanda eléctrica y la topología del sistema. Entonces, el modelo estocástico de la tasa de crecimiento de la demanda dR_i , a lo largo de un intervalo dt , puede ser representado por un Movimiento Browniano generalizado de acuerdo con la siguiente expresión:

$$dR(t) = \mu_{L_i} \cdot dt + \sigma_{L_i} \cdot dz \quad (18)$$

Donde μ_{L_i} es la tasa de crecimiento de la carga media incondicional estimada para el año t , $\sigma_{L_i}^2$ la varianza incondicional estimada para este intervalo de tiempo y dz el proceso de Wiener.

Bajo estas condiciones, se realiza un análisis de contingencia N-1 en cada realización. El DC-OPF se calcula utilizando el sistema MATLAB de herramientas de simulación de sistemas de energía Matpower 3.2 ©. En el caso de los escenarios A1 y A2, consideramos el sistema ANDE de referencia en el año 2017, en el cual modelamos el crecimiento de la demanda con incertidumbre de acuerdo con el proceso estocástico propuesto. El escenario A3 considera la instalación adicional de una fábrica única de 1100 MW. Asimismo, dentro del escenario A4, se considera un incremento adicional de la demanda de 180MW por año hasta 1100 MW. En todos los casos, en escenarios de déficit energético, el precio marginal se establece igual al valor de VOLL (Valor de Carga Perdida) en el bus con reducción de carga, el cual se supone es de 483 USD/MWh. 1000 Simulaciones de Monte Carlo realizan en cada escenario, año y contingencia, respectivamente, con el fin de estimar el Costo Esperado de Energía No Suministrada-E (CENS).

Criterio Ambiental: El indicador de este criterio es la tasa de crecimiento promedio de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), que se estima mediante una proyección que incluye el consumo de energía como una variable exógena. El análisis de series temporales se realiza sobre la base de datos históricos de las emisiones de CO₂. Para los escenarios A1 y A2, se obtiene la relación entre la emisión de GEI (toneladas métricas per cápita) y el consumo de energía en Paraguay (todas las fuentes de energía). La siguiente regresión (R² = 81.5%) se obtiene sobre la base de datos históricos:

$$GHG(t) = -0.92 + 0.0190 \cdot t + 0.000106 \cdot TED(t) \quad (19)$$

Donde GHG(t) son los gases de efecto invernadero emitidos en Paraguay en el año t , y TED(t) es la demanda total de energía (incluyendo todas las fuentes de energía) en el año t . La evolución del TED se estima en

base a su tasa de crecimiento histórico. A3 añade a la línea base los GEI emitidos por las emisiones de gases de efecto invernadero de la Fundición de Aluminio. Finalmente, A4 añade al escenario base la cantidad de gases de efecto invernadero causada por la instalación de Bloques de industrias de 180 MW. El TED correspondiente para este escenario se estima considerando que la demanda eléctrica es igual a aproximadamente el 23% de la energía total en Paraguay.

2.1.2.7 Análisis de Sensibilidad⁶⁵

Es conveniente y de suma importancia realizar un análisis de las implicancias de posibles perturbaciones en la priorización asumida por los tomadores de decisiones entre los diferentes criterios. Es importante mencionar que a pesar de que el criterio de clasificación implementado con respecto a las encuestas energéticas llevada a cabo por un panel de expertos, se estimaron las preferencias de los criterios sobre la base de una preferencia ponderada de las partes interesadas. La decisión final en un proceso de formulación de políticas suele ser hecha por una sola autoridad política que puede o puede no tener en cuenta la visión integral de las principales partes interesadas del sector.

En este sentido, se realizó un análisis de sensibilidad explorando sistemáticamente todas las combinaciones posibles para priorizar los criterios. De esta manera, se analizó el desempeño de las estrategias de políticas bajo escenarios donde se priorizan diferentes criterios (*Se varían las preferencias de los criterios en todas las combinaciones posibles, asignando mayor peso a cada*

⁶⁵ Blanco, G., Amarilla, R., Martinez, A., Llamosas, C., & Oxilia, V. (2017). Energy transitions and emerging economies: A multi-criteria analysis of policy options for hydropower surplus utilization in Paraguay. *Energy Policy*, 108, 312-321.

combinación de criterios), también otros análisis donde se excluye un criterio a la vez (*Se realizan 5 análisis en donde se descarta totalmente un criterio a la vez*), además de presentar también un análisis de las alternativas teniendo en cuenta un solo criterio (*Se realizó un análisis monocriterio*).

2.2 Modelo de Análisis de Toma de Decisiones Basado en ANP

El modelo de Análisis de toma de decisiones basado en el ANP fue realizado en el marco de este proyecto para estructurar el problema y medir (con la intención de refinar las métricas utilizadas bajo el modelo 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 compuesta de 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).

Cabe destacar, que como se menciona en el Capítulo 1, el ANP es una generalización del AHP, por lo tanto, todos los elementos utilizados en la estructuración del problema basado en AHP, son utilizados en la estructuración del problema basado en ANP. Los detalles de los criterios, alternativas y Clústeres considerados para el análisis se muestran con detalle a lo largo de este capítulo. Los nuevos elementos introducidos para el modelo ANP también se detallan a continuación.

2.2.1 Estructuración del Problema

2.2.1.1 Clústeres y Elementos

Los clústeres en los cuales se agrupan los elementos para el modelo basado en ANP 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 a partir de una proyección que incluye al 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 en base al consumo de energía total del Paraguay. 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 la 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 CEENS mínimo de cada 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 (E): Para la estructuración del modelo basado en ANP, se asume un Clúster denominado consumo de energía eléctrica. Este clúster consta de dos elementos que se presentan a continuación:

E1 - Consumo total de energía eléctrica en el Paraguay: Teniendo en cuenta que para los diferentes análisis llevados a cabo en base a cada criterio y su indicador asociado se asumió como otro elemento del Clúster para el análisis 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 fue utilizado para analizar otros elementos entre sí, tomando como indicador el consumo de energía del sector industrial en el Paraguay.

2.2.1.2 Relaciones entre los Clústeres y elementos de la red

Teniendo en cuenta los clústeres y elementos presentados en el inciso anterior, se propone una estructura en red que se puede observar en la Figura 10. Las relaciones o lazos representan las diferentes interacciones entre los clústeres, la cual parte de la jerarquía simple de objetivos-criterios-Alternativas pero con la variante de considerar el consumo de energía con los criterios y también con las alternativas, tomando en cuenta la relación de bidireccionalidad para el consumo de energía con respecto al criterio económico y a las alternativas, partiendo de la premisa del análisis de causalidad de granger llevado a cabo para el criterio económico, y el factor de preponderancia del consumo de energía eléctrica en las alternativas analizadas.

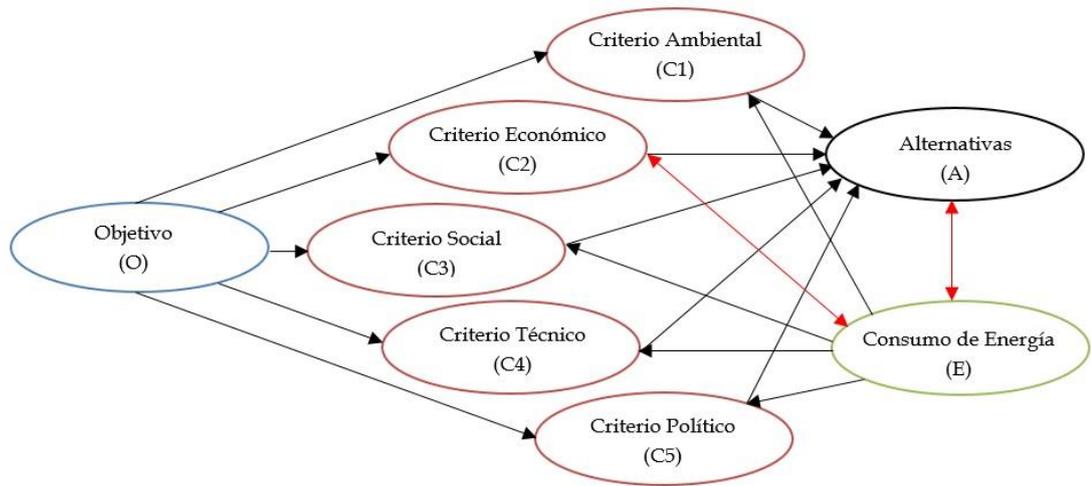


Figura 11: Estructura de Redes de las relaciones entre los clústeres.

La estructura establecida para el análisis (Figura 11), se muestra de forma detallada en la Figura 12, el 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.

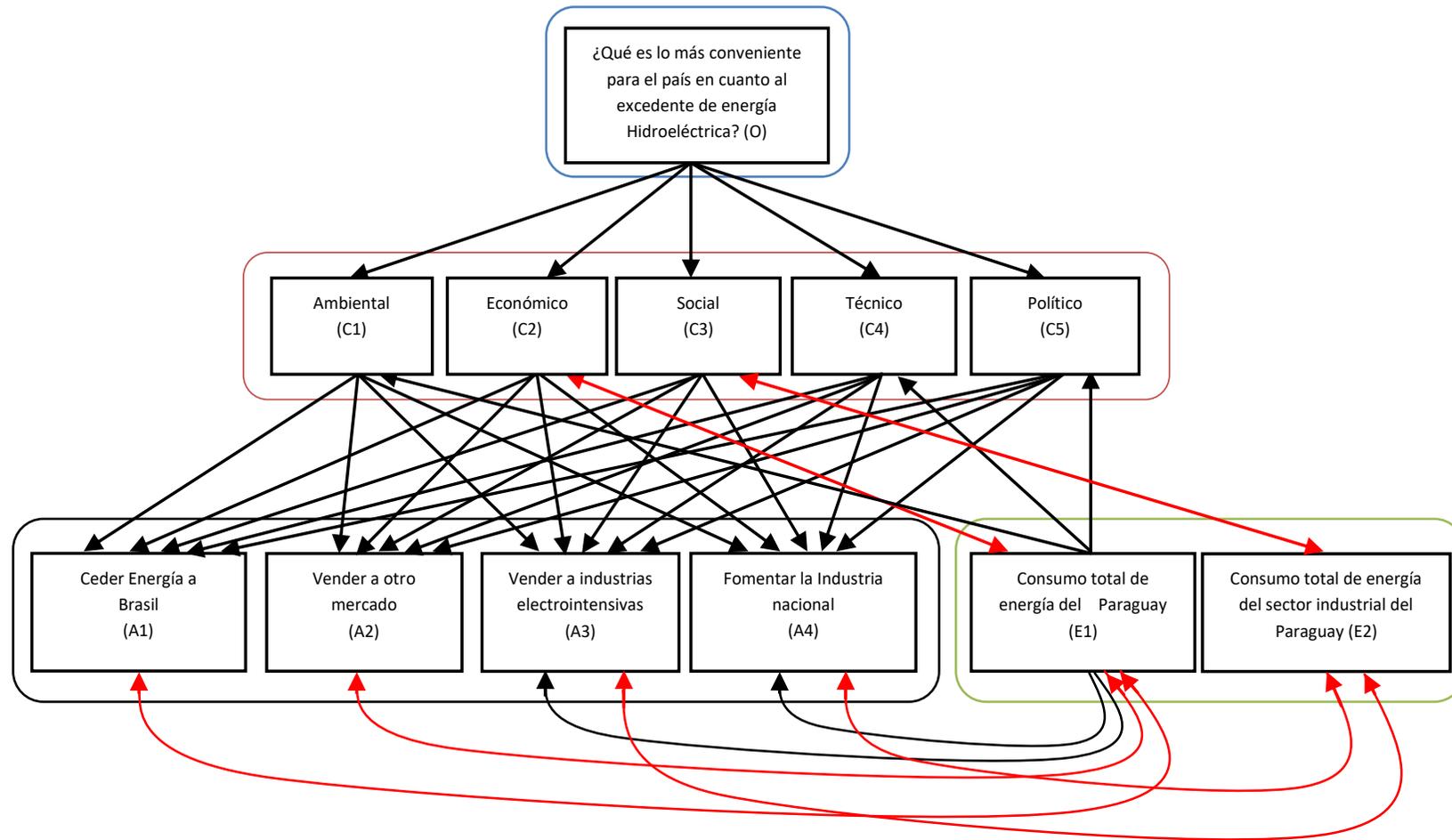


Figura 12: Estructura de Red del Modelo basado en el ANP.

Para realizar dichas comparaciones entre los clústeres relacionados se toma en cuenta lo propuesto bajo la metodología basada en el AHP, que se muestra como sigue:

1 - En primer lugar, se debe establecer la importancia relativa de cada criterio de decisión con respecto al objetivo. Lo que representa en las relaciones del Objetivo (O) hacia los clústeres de los Criterios ($C1, C2, C3, C4, C5$).

2 - Seguidamente, se establecen las importancias de cada elemento ($A1, A2, A3$ y $A4$) del clúster de las Alternativas (A) con respecto a cada Criterio. Esto refleja las relaciones entre los clústeres de los Criterios ($C1, C2, C3, C4, C5$) y el clúster de las Alternativas (A). Para estas comparaciones, se utilizan los siguientes indicadores para cada criterio:

A. Criterio Ambiental (A con respecto a C1)

Para el caso de la $A1$ y la $A2$ se procedió a obtener la relación entre las emisiones de gases de efecto invernadero GEI (en toneladas métricas per cápita) y el consumo de energía en Paraguay (todas las fuentes de energía). Por lo tanto, se obtiene la siguiente función en base a los datos históricos analizados:

$$GEI(t) = -0,92 + 0,0190 \cdot t + 0,000106 \cdot GWh(t) \quad (20)$$

Donde $GEI(t)$ son los gases de efecto invernadero emitidos en Paraguay en el año t , y $GWh(t)$ es la demanda total de energía en el año t . La evolución del GWh se estima con base en su tasa de crecimiento histórico.

La $A3$ añade a la línea base de GEI, los gases emitidos por la implantación de la industria electrointensiva. Por último, la $A4$ añade al

escenario base de la cantidad de GEI causado por la instalación de bloques de 180 MW de potencia de la industria. El GWh correspondiente para este escenario se estima teniendo en cuenta que la demanda eléctrica es igual a aproximadamente el 23,3% del total de energía en el Paraguay.

B. Criterio Económico (A con respecto a C2)

Basado en el PIB del Paraguay y el consumo eléctrico, considerando las series históricas (periodo 2005-2011), una función lineal se define a fin de pronosticar la evolución temporal del PIB en función de la demanda de electricidad industrial en Paraguay. La ecuación obtenida es la siguiente:

$$PIB(t)=558+13,5 GWh(t) \quad (21)$$

Donde el $PIB(t)$ es el PIB total del Paraguay en miles de millones de guaraníes en el año t y $GWh(t)$ es el consumo de electricidad industrial en GWh en el año t . Adicionalmente, se estima una regresión lineal del consumo de electricidad industrial de Paraguay sobre la base de los datos históricos.

$$GWh(t)= 1.216,36+69,7(t) \quad (22)$$

Para la A1 se estima la tendencia de estas variables sobre la base de estas funciones con el fin de estimar el crecimiento medio del PIB en cada alternativa. En el caso de la A2, hemos añadido al PIB los ingresos generados por la venta de electricidad a un precio igual a 50 USD/MWh, considerando que Paraguay vende alrededor de 9.504 GWh por año a partir del 2017. Del mismo modo, para la A3, se añade la contribución de la industria electrointensiva al PIB. Por último, en el caso de la A4, el crecimiento promedio del PIB se calcula añadiendo al consumo de electricidad correspondiente a la instalación de las nuevas industrias (1.037 GWh por año en una progresión aritmética).

C. Criterio Social (A con respecto a C3)

Para las A1 y A2 no se generan empleos. La generación de empleo para la alternativa 3 se obtuvo a partir del informe CRU⁶⁶. Del mismo modo, para la A4, se obtiene mediante una función que relaciona al consumo de electricidad de la industria con la cantidad de empleos generados. Esta función se ajusta sobre la base de los datos de generación de empleo por industrias en Paraguay durante el período 2007-2011 y el correspondiente consumo de electricidad de este sector. La ecuación de regresión obtenida es:

$$E(t) = 45.945 + 327.GWh(t) - 21.155.t \quad (23)$$

Donde $E(t)$ es el número de empleos generados en el año t .

D. Criterio Técnico (A con respecto a C4)

El caso de estudio se replica en un modelo de 94 buses del sistema eléctrico paraguayo. Los parámetros de las líneas de Transmisión, las unidades de generación y carga son cuidadosamente seleccionados sobre la base de datos de la Administración Nacional de Electricidad (ANDE). Además, se toman en cuenta los datos históricos de crecimiento de la carga con el fin de establecer los parámetros del proceso de Movimiento Browniano que replica la evolución incierta temporal y geográfica de la demanda. Una representación de CC de la red se considera en el modelo de OPF. El DC-OPF se calcula utilizando el paquete de simulación de sistemas de potencia basados

⁶⁶ CRU Strategies Ltd., 2011. Energía y Aluminio en Paraguay: Informe final preparado para ITAIPU Binacional. CRU Strategies Ltd., 324 pp.
<https://elpueblodecide.files.wordpress.com/2012/08/cru-inf-final-24-10-2011.pdf>.

en MATLAB Matpower 3.2 ©. En el caso de las Alternativas 1 y 2 (A1 y A2) se considera el sistema de la ANDE, donde los crecimientos de demanda con la incertidumbre siguen el proceso estocástico propuesto. La Alternativa 3 (A3) considera la instalación adicional de 1.100 MW a partir del año 2017. Del mismo modo, dentro de la Alternativa 4 (A4), se considera un incremento adicional de la demanda de 180 MW por año a partir de 2017 hasta el 2021. En

Bajo esta política, una instalación masiva de pequeñas industrias debe ser incentivada y se requieren negociaciones con varias partes. Además, se necesitan inversiones en infraestructuras importantes en el sistema de energía de Paraguay con el fin de cumplir adecuadamente con este importante desarrollo industrial.

3 - El siguiente paso consiste en realizar las comparaciones pareadas de los Criterios ($C1, C2, C3, C4, C5$) con respecto al Consumo de Energía (E). Esto representa la relación entre los clústeres mencionados las cuales se pueden observar detalladamente en la Figura 11. Cabe destacar que para algunos casos también se debe realizar la operación recíprocamente ya que existe un lazo bidireccional entre los clústeres.

4 - Por último, se realizan las comparaciones pareadas de todos los elementos del clúster de las Alternativas ($A1, A2, A3, A4$) con respecto a los elementos del clúster de Consumo de Energía ($E1, E2$) y viceversa, ya que existe una relación Bidireccional entre ambos clústeres.

2.2.1.3 Cálculos de las Prioridades

Todos los cálculos de las prioridades para el modelo ANP dependen de las comparaciones, par a par, citadas en el apartado anterior, por lo que debe seguir los procedimientos utilizados en el AHP 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 11).
- Una Supermatriz no Ponderada (Obtenida de las comparaciones pareadas realizadas en base a la Figura 12).

- Una Supermatriz Ponderada (Obtenida realizando la multiplicación de elementos de la Matriz de Clústeres y la Supermatriz no Ponderada).
- Una Supermatriz límite (Obtenida realizando las potencias de la Supermatriz Ponderada como se detalla en el Capítulo 1).
- La prioridad general de las Alternativas basadas en ANP.

Es importante remarcar que el ratio de ratio de consistencia (CR) obtenido, se encuentra dentro de los parámetros establecidos para la aplicación de la metodología, por lo que resulta en una inconsistencia de sólo el 0,3% para el análisis en particular.

3.1.2 Prioridades comparando los criterios con las alternativas

En los siguientes puntos, se detalla cada uno de los criterios tenidos en cuenta para la evaluación de las alternativas, así como los indicadores considerados para cada caso de estudio.

Para obtener la matriz de comparación de a pares, se utiliza la relación entre las estimaciones de las tasas medias de crecimiento con el fin de encontrar los pesos de los indicadores ambientales y económicos. Por otra parte, en virtud de los criterios técnicos y sociales, los pesos se calculan sobre la base de las relaciones entre los valores del costo esperado de la energía no suministrada (CEENS) y el número de empleos respectivamente. Si el valor calculado es mayor a nueve (9), entonces el peso se fija en nueve (9). Del mismo modo, si el resultado es un número decimal que esté comprendido entre uno (1) y nueve (9), el número que se toma es el número entero inmediato superior. En este contexto, se realizan los cálculos del vector de prioridad de cada alternativa en función de cada criterio.

Alternativas	Descripción
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.

Tabla 22: Descripción de Alternativas analizadas.

3.1.2.1 Criterio Técnico

Luego de las simulaciones descritas en el Capítulo 2, para cada una de las alternativas, obtuvimos valores en millones de dólares americanos (MUSD) del CEENS, como se muestra en la tabla siguiente.

CRITERIO	A1	A2	A3	A4
Técnico (MUSD)	29,47	29,47	12,81	32,27

Tabla 23: Costo Esperado de la Energía no suministrada.

Utilizando los valores de la Tabla 23, se construyó la matriz de comparaciones con los pesos dados para cada caso (ver Tabla 24).

Crit. Técnico	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	1	1	1/2	3
Alternativa 2	1	1	1/2	2
Alternativa 3	2	2	1	3
Alternativa 4	1/3	1/2	1/3	1

Tabla 24: Comparaciones Pareadas para el Criterio Técnico.

A partir de esta matriz de comparaciones se obtienen los resultados observados en la tabla 25 de priorización técnica. Podemos notar que para el criterio técnico y según las consideraciones estudiadas, la mejor alternativa es la 3 (alto nivel de penetración de la industria electrointensiva). Este hecho puede explicarse considerando que la interconexión necesaria con el fin de suministrar energía eléctrica a una fundición de aluminio ayuda a reducir la congestión en la red de transmisión y por consiguiente el CEENS. Suponemos que la inversión necesaria en las líneas de transmisión de 500 kV para alimentar esta industria, la lleva a cabo la propia compañía de Aluminio.

Alternativas	Criterio Técnico
A1	0.24969
A2	0.22259
A3	0.41809
A4	0.10962
Consistencia	0.01716

Tabla 25: Priorización Técnica.

3.1.2.2 Criterio Ambiental

A partir de lo descrito previamente en el Capítulo 2, al proyectar las tasas de crecimiento de las emisiones de CO₂ en base al consumo de energía, se obtienen los siguientes resultados.

CRITERIO	A1	A2	A3	A4
Ambiental (%)	3,95	3,95	5,85	6,03

Tabla 26: Tasa de crecimiento de Emisiones de CO₂.

Crit. Ambiental	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	1	1	2	3
Alternativa 2	1	1	2	3
Alternativa 3	1/2	1/2	1	2
Alternativa 4	1/3	1/3	1/2	1

Tabla 27: Comparaciones Pareadas para el Criterio Ambiental.

A partir de la tabla de priorización ambiental podemos avizorar que la alternativa 1 y la alternativa 2 son las que más peso poseen, por lo que se determina que para este criterio en particular, las alternativas 1 y 2 son las más convenientes para este caso. Esto se debe principalmente a que para dichas alternativas no se tendría un impacto de emisiones de CO₂ ya que al no generarse ningún valor agregado se estaría dejando de contaminar.

Alternativas	Criterio Ambiental
A1	0.35091
A2	0.35091
A3	0.18906
A4	0.10911
Consistencia	0.00388

Tabla 28: Priorización Ambiental

3.1.2.3 Criterio Económico

Con base al procedimiento descrito en la metodología se obtuvieron los siguientes resultados de las tasas de crecimiento del PIB para cada alternativa.

CRITERIO	A1	A2	A3	A4
Económico (%)	3,8	4,31	4	6,8

Tabla 29: Tasa de crecimiento del PIB.

Crit. Económico	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	1	1/2	1/2	1/3
Alternativa 2	2	1	1/2	1/2
Alternativa 3	2	2	1	1/2
Alternativa 4	3	2	2	1

Tabla 30: Comparaciones pareadas para el criterio económico.

Consecuentemente vemos que en la tabla de priorización económica la alternativa 4 es la que más peso posee sobre las demás, por lo que se puede decir que A4 es la mejor alternativa para el criterio económico, lo cual guarda mucha relación con el alto impacto que posee la implementación de industrias en el Producto Interno Bruto nacional.

Alternativas	Criterio Económico
A1	0.12050
A2	0.19063
A3	0.27071
A4	0.41816
Consistencia	0.02660

Tabla 31: Priorización Económica.

3.1.2.4 Criterio Social

De acuerdo a la metodología aplicada, se expresan los resultados obtenidos en la siguiente tabla.

CRITERIO	A1	A2	A3	A4
Social (Cant. de empleos)	0	0	6.368	152.339

Tabla 32: Cantidad de empleos generados por cada alternativa.

Crit. Social	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	1	1	5	9
Alternativa 2	1	1	5	9
Alternativa 3	1/5	1/5	1	7
Alternativa 4	1/9	1/9	1/7	1

Tabla 33: Comparaciones Pareadas para el Criterio Social.

Con base en los resultados obtenidos que se expresan en la tabla de priorización social, podemos observar que la Alternativa 4 es la que más peso

posee, por lo que para este criterio la A4 es la que se recomienda implementar. Del mismo modo como en los análisis anteriores se puede comprender que la alternativa 4 sea la de mayor peso, ya que es la que más cantidad de empleos genera con respecto a las demás alternativas.

Alternativas	Criterio Social
A1	0.05208
A2	0.05208
A3	0.19184
A4	0.70401
Consistencia	0.08947

Tabla 34: Priorización Social.

3.1.2.5 Criterio de Factibilidad de Implementación

Para este criterio en particular se tuvieron en cuenta la opinión de expertos, en donde se estableció un ranking de acuerdo a lo que se aprecia en la tabla 16, el cual nos indica que la alternativa más factible o sencilla es la A1, por ello dicha alternativa tiene el mayor peso de la tabla, la segunda alternativa considerada como la más simple de implementar es la A2, posteriormente se considera a la A3 como la siguiente más implementable, y cómo la opción más difícil de llevar a cabo, se considera a la A4, esto teniendo en cuenta el alto grado de dificultad que representa negociar con múltiples empresas para su instalación, además de las consecuentes inversiones que se deben llevar a cabo por parte del estado.

CRITERIO	A1	A2	A3	A4
Factibilidad de implementación	4	2	3	1

Tabla 35: Ranking de implementación.

Seguidamente se observa la tabla de comparaciones pareadas de las alternativas en función al criterio analizado.

Crit. Factibilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	1	2	2	4
Alternativa 2	1/2	1	1/2	2
Alternativa 3	1/2	2	1	3
Alternativa 4	1/4	1/2	1/3	1

Tabla 36: Comparaciones pareadas para el criterio de Factibilidad.

Se puede observar en la tabla de priorización de factibilidad de implementación el peso correspondiente a cada alternativa de acuerdo a la tabla de resultados.

Alternativas	Criterio Factibilidad de Implementación
A1	0.43478
A2	0.18200
A3	0.28632
A4	0.09690
Consistencia	0.01716

Tabla 37: Priorización de Factibilidad de Implementación.

A partir de la Tabla 37 podemos observar como la alternativa 1 es la que mayor peso posee, esto se debe principalmente a que dicha alternativa es considerada como la más factible de llevar a cabo, respecto a las demás.

3.1.3 Resultados Generales del Modelo AHP

Una vez procesado todos los juicios de cada experto sobre las comparaciones planteadas en el modelo AHP, se formó un solo modelo general usando toda la información entregada.

Los criterios con respecto al objetivo fueron evaluados de acuerdo a las consultas a los actores principales de los sectores económico, técnico, ambiental, social y político del Paraguay (ver Tabla 38). De esta manera

podemos observar en la Tabla 38, que la alternativa que mejor se ajusta al objetivo planteado es la alternativa 4 (A4) el cual presenta la prioridad más alta entre todas las alternativas analizadas de acuerdo a la metodología aplicada.

Alternativas	A1	A2	A3	A4
Prioridades	0.241591	0.199644	0.271204	0.287562

Tabla 38: Vector de Prioridad Compuesto.

3.1.3.1 Discusión de los resultados

Con la finalidad de establecer cuál es la alternativa más conveniente en función al objetivo y los criterios que fueron analizados para el caso de estudio, podemos observar a partir de la Tabla 38 que la mejor alternativa para el Paraguay bajo la hipótesis asumida es la de utilizar su excedente de energía hidroeléctrica para promover un desarrollo de la industria (A4), lo que genera una demanda de trabajo sumamente interesante y al mismo tiempo, un gran movimiento dentro de la economía local. Resulta interesante además mencionar que para los parámetros establecidos para la metodología sobre la razón de consistencia, ninguno de los análisis arroja una inconsistencia mayor al 8%, lo cual indica que los resultados son confiables.

3.1.4 Análisis de Sensibilidad

El resultado obtenido en el análisis de sensibilidad nos muestra un estudio de las implicancias de posibles perturbaciones en la priorización por parte de los tomadores de decisiones. Es importante tener en cuenta que a pesar que el criterio de clasificación presentado en este capítulo fue estimado sobre la base de una preferencia ponderada de las partes interesadas, la decisión final en un proceso de formulación de políticas suele ser hecha por una sola autoridad política, que puede, o no, tener en cuenta la visión integral de las principales partes interesadas del sector.

En este sentido, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad explorando sistemáticamente todas las combinaciones posibles para priorizar los criterios. De esta manera, analizamos el desempeño de las estrategias de políticas bajo escenarios donde se priorizan diferentes criterios y otros donde se excluye un criterio determinado del análisis. Asimismo, se muestran los resultados para un análisis monocriterio. La Figura 13 expone los resultados de estos análisis y puede entenderse como sigue; Por ejemplo, tomando el escenario "T-P" (criterio técnico y factibilidad política), "A3" resulta ser la mejor estrategia.

Por otro lado, si consideramos, por ejemplo, como prioridad los escenarios "En-Ec-P" (criterios ambientales, económicos y políticos), entonces "A1" resulta ser la mejor alternativa. Un análisis similar puede hacerse para cualquier combinación de criterios priorizados, dando lugar a una estrategia dada para cada caso.

Asimismo, las etiquetas, que representan los criterios de evaluación, que llevan el símbolo (**), indican que representan los resultados para las evaluaciones de 4 criterios. Esta evaluación excluye criterios que no aparecen en la etiqueta, por ejemplo "T-S-En-P **" representa una evaluación del AHP, que solo toma en cuenta los criterios Técnico, Social, Ambiental y Político pero excluyendo el criterio Económico del estudio. Finalmente, las etiquetas que contienen el símbolo (*) indican que se realizó un análisis mono-criterio. Este análisis excluye todas las otras alternativas, es decir, el rótulo "T*" indica que un análisis se hizo basándose sólo en el criterio técnico, excluyendo los demás criterios.

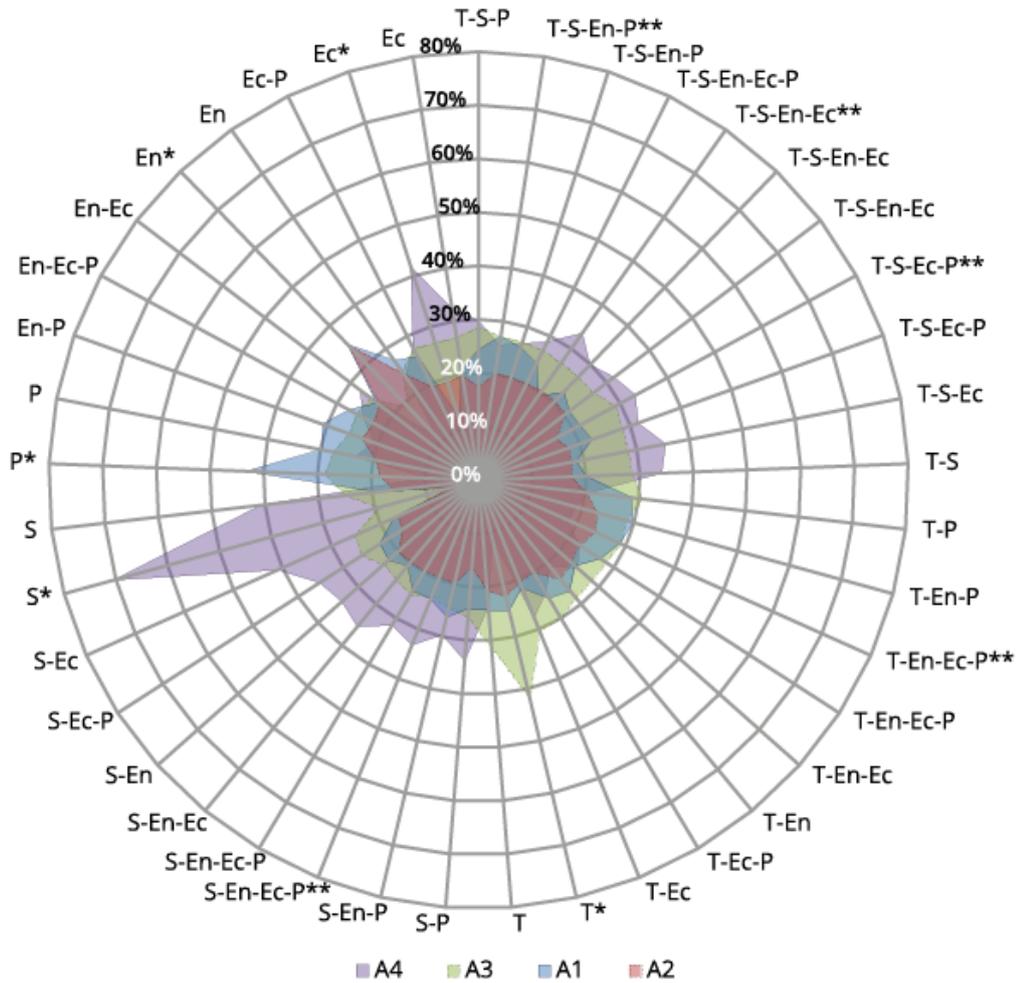
Por lo tanto, la Figura 13 presenta un mapa de políticas eficientes de acuerdo con las posibles orientaciones de visión de la autoridad encargada. Así, se puede ver, que la alternativa "A4" es la opción predominante para la

mayoría de los escenarios. En segundo lugar, “A3” es la alternativa con mejor desempeño en la mayoría de los escenarios donde se prioriza el criterio técnico.

Por último, “A1” es la estrategia predominante en pocos escenarios. Para cuantificar la magnitud entre las alternativas, también, como aporte extra se calculó el área de cada estrategia correspondiente a la Figura 13, y el resultado se presenta en la Tabla 39. Estos resultados representan el área acumulada de las alternativas en el mapa de estrategias. Se puede observar que “A4” es la mejor alternativa bajo un análisis global y acumulado.

Alternativas	(A1)	(A2)	(A3)	(A4)
Áreas del mapa de estrategias	0,23	0,16	0,28	0,33

Tabla 39: Áreas acumuladas de las alternativas.



T: Técnico, S: Social, En: Ambiental, Ec: Económico, P: Factibilidad Política

Etiquetas	Descripción
T-S-En-Ec-P T-S-En-Ec T-S-En T-S T	Las etiquetas que representan los criterios de evaluación, que no llevan los símbolos (*) o (**), indican que hay una mayor preferencia por los criterios mencionados sin excluir ninguno. Ejemplo: Si aparece T-S en la etiqueta, los criterios técnicos y sociales tienen una preferencia más alta (peso = 3) que el resto (peso = 1). Esto sucede de la misma manera para todas las otras combinaciones que no contienen (*) o (**).
T-S-En-Ec-P**	En el caso de que las etiquetas, que representan los criterios de evaluación, lleven el símbolo (**), indican que representan los resultados de las evaluaciones de 4 criterios. Esta evaluación excluye los criterios que no aparecen en la etiqueta. Ejemplo: T-S-En-Ec-P** representa una evaluación AHP, que solo toma en cuenta los criterios de Factibilidad Técnica, Social, Ambiental y Política excluyendo el criterio económico del estudio.
T*	Las etiquetas que contienen el símbolo (*) indican que se realizó un análisis de criterio único. Este análisis excluye todas las otras alternativas. Ejemplo: La etiqueta T* indica que se realizó un análisis basado únicamente en el criterio técnico, excluyendo los otros criterios.

Figura 13: Análisis de Sensibilidad - Mapa de Estrategias.

3.2 Resultados obtenidos basados en el modelo ANP

En base a la formulación del modelo ANP se llevaron a cabo las comparaciones pareadas entre los clústeres que se muestran en la matriz de clústeres y pueden visualizarse en los apartados posteriores, también se realizaron las comparaciones pareadas entre los elementos que se observan en la supermatriz no ponderada. En la Tabla 40 se muestra la codificación de los clústeres y los elementos que componen cada uno de ellos. Los cálculos detallados se presentan en el Anexo de este informe.

<i>Clústeres</i>	<i>Elementos</i>
C1 - Criterio Ambiental	c1 - Emisiones de CO2
C2 - Criterio Económico	c2 - Impacto en el PIB
C3 - Criterio Social	c3 - Empleos Generados
C4 - Criterio Técnico	c4 - Costo esperado de la Energía no suministrada
C5 - Criterio Político	c5 - Factibilidad de Implementación
E - Consumo de Energía	E1 - Consumo total de energía del Paraguay E2 - Consumo total de energía del sector industrial del Paraguay
A - Alternativas	A1 - Ceder energía a Brasil A2 - Vender a otro mercado A3 - Vender a Industrias Electrointensivas A4 - Fomentar la Industria Nacional
O - Objetivo	o1 - Que es lo más conveniente para el país en cuanto al excedente de energía hidroeléctrica

Tabla 40: Clústeres y Elementos del Modelo ANP.

3.2.1 Matriz de Clústeres

En la Tabla 41 se pueden apreciar los resultados de realizar las comparaciones pareadas entre los clústeres relacionados entre sí, basados en el modelo ANP formulado.

	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>	<i>E</i>	<i>A</i>	<i>O</i>
<i>C1</i>	0	0	0	0	0	0,129	0	0,2
<i>C2</i>	0	0	0	0	0	0,162	0	0,2
<i>C3</i>	0	0	0	0	0	0,142	0	0,2
<i>C4</i>	0	0	0	0	0	0,147	0	0,2
<i>C5</i>	0	0	0	0	0	0,135	0	0,2
<i>E</i>	0	0,25	0	0	0	0	1	0
<i>A</i>	1	0,75	1	1	1	0,285	0	0
<i>O</i>	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 41: Matriz de Clústeres del modelo ANP.

Estos resultados, obedecen a las relaciones que se establecieron entre los clústeres. Cada columna representa a un vector de prioridad que se obtiene al comparar los clústeres entre sí, que tienen relación con el clúster de referencia de cada columna. Las comparaciones realizadas se detallan mejor en los Anexos. Las referencias en colores de la tabla representan los valores de pesos obtenidos de acuerdo a los análisis desarrollados, por ejemplo, todos los valores 0,2 de la columna O, representan los pesos obtenidos de la comparación del objetivo vs cada uno de los criterios (filas C1 al C5).

3.2.2 Supermatriz no Ponderada

Los resultados obtenidos que se muestran en la supermatriz no ponderada, se muestran en la Tabla 42. En general, los resultados se obtienen en base a las comparaciones pareadas realizadas de acuerdo a las relaciones entre los elementos de cada clúster del modelo ANP (Ver Figura 12).

Los datos utilizados y las comparaciones pareadas se pueden observar en todo el desarrollo del Capítulo 3, ya que están basados en las comparaciones pareadas realizadas para el modelo AHP.

		C1	C2	C3	C4	C5	E		A				O
		c1	c2	c3	c4	c5	E1	E2	A1	A2	A3	A4	o1
C1	c1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
C2	c2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
C3	c3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
C4	c4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
C5	c5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
E	E1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
	E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
A	A1	0,3507	0,1209	0,0521	0,2502	0,4325	0,14088	0	0	0	0	0	0
	A2	0,3507	0,1928	0,0521	0,2224	0,1836	0,14088	0	0	0	0	0	0
	A3	0,1892	0,2695	0,1918	0,4170	0,2867	0,262833	0,25	0	0	0	0	0
	A4	0,1093	0,4168	0,7040	0,1105	0,0972	0,455408	0,75	0	0	0	0	0
O	o1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 42: Supermatriz no Ponderada del modelo ANP.

A partir de la Tabla 42 podemos ver que los valores obtenidos entre las columnas de los criterios (C1 a C5) son los mismos que los obtenidos para el modelo AHP. En el caso de la columna E1 (Consumo total de Energía del Paraguay) vs las Alternativas, se puede observar que la que mayor peso posee en relación a las demás es la Alternativa 4, esto se puede entender teniendo en cuenta el elevado consumo de energía que se tendría en base a la penetración de muchas industrias nacionales.

3.2.3 Supermatriz Ponderada

Para obtener la supermatriz ponderada, se llevó a cabo la multiplicación entre cada entrada de la matriz de clústeres y las sub matrices correspondientes a la intersección de los mismos clústeres en la supermatriz no ponderada, para este caso dicha operación se indica en las Tablas 41 y 42 con los colores correspondientes en cada matriz. Esta operación no arrojó una supermatriz ponderada con todas las columnas estocásticas es decir que la suma de los valores de todas las columnas sean uno (1), esta es una condición indispensable para hallar la supermatriz límite, por lo que se procedió a normalizar aquellas columnas que no cumplan dicha condición. De esta forma, se pudo obtener la supermatriz ponderada del modelo ANP y el resultado se observa en la siguiente tabla.

		C1	C2	C3	C4	C5	E		A				O
		c1	c2	c3	c4	c5	E1	E2	A1	A2	A3	A4	o1
C1	c1	0	0	0	0	0	0,1502	0	0	0	0	0	0,2
C2	c2	0	0	0	0	0	0,1885	0	0	0	0	0	0,2
C3	c3	0	0	0	0	0	0,0000	0,3316	0	0	0	0	0,2
C4	c4	0	0	0	0	0	0,1708	0	0	0	0	0	0,2
C5	c5	0	0	0	0	0	0,1578	0	0	0	0	0	0,2
E	E1	0	0,2500	0	0	0	0	0	1	1			0
	E2	0	0	0	0	0	0	0			1	1	0
A	A1	0,3509	0,0907	0,0521	0,2502	0,4325	0,0469	0	0	0	0	0	0
	A2	0,3509	0,1446	0,0521	0,2224	0,1836	0,0469	0	0	0	0	0	0
	A3	0,1891	0,2021	0,1918	0,4170	0,2867	0,0874	0,1671	0	0	0	0	0
	A4	0,1091	0,3126	0,7040	0,1105	0,0972	0,1515	0,5013	0	0	0	0	0
O	o1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 43: Supermatriz Ponderada del modelo ANP

En esta matriz podemos observar que a partir de las columnas E1 y E2, en la columna E1 criterio social (C3) tiene un peso o valor asociado, sin embargo en la columna E2, la misma no posee ningún peso asociado, esto debido a que el Criterio social (C3) no tiene una relación con el Consumo Total de Energía del sector industrial (E2), sólo fue comparado y relacionado con el Consumo total de Energía del Paraguay (E1), esto debido principalmente a las bases de datos obtenidas para el análisis del problema abordado.

3.2.4 Supermatriz Límite

El siguiente paso consiste en elevar la supermatriz ponderada a una potencia de $N=50.000$, con esto se pudo obtener una supermatriz límite que representa el resultado general del modelo ANP para este caso planteado, a partir de la Tabla 44.

		C1	C2	C3	C4	C5	E		A				O
		c1	c2	c3	c4	c5	E1	E2	A1	A2	A3	A4	o1
C1	c1	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040
C2	c2	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050	0,0050
C3	c3	0,1355	0,1355	0,1355	0,1355	0,1355	0,1355	0,1355	0,1355	0,1355	0,1355	0,1355	0,1355
C4	c4	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045
C5	c5	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042	0,0042
E	E1	0,0266	0,0266	0,0266	0,0266	0,0266	0,0266	0,0266	0,0266	0,0266	0,0266	0,0266	0,0266
	E2	0,4087	0,4087	0,4087	0,4087	0,4087	0,4087	0,4087	0,4087	0,4087	0,4087	0,4087	0,4087
A	A1	0,0131	0,0131	0,0131	0,0131	0,0131	0,0131	0,0131	0,0131	0,0131	0,0131	0,0131	0,0131
	A2	0,0122	0,0122	0,0122	0,0122	0,0122	0,0122	0,0122	0,0122	0,0122	0,0122	0,0122	0,0122
	A3	0,1015	0,1015	0,1015	0,1015	0,1015	0,1015	0,1015	0,1015	0,1015	0,1015	0,1015	0,1015
	A4	0,3072	0,3072	0,3072	0,3072	0,3072	0,3072	0,3072	0,3072	0,3072	0,3072	0,3072	0,3072
O	o1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tabla 44: Supermatriz Límite del modelo ANP.

Finalmente, obtenemos la supermatriz límite, la cual aún no ha sido normalizada, sin embargo ya podemos notar claramente analizando los resultados de las filas A1 al A4 que la que posee mayor peso sobre las demás es la alternativa 4.

3.2.5 Prioridad general de las Alternativas basadas en el modelo ANP

Una vez obtenida la supermatriz límite, se procedió a utilizar los valores resultantes para los elementos (A1, A2, A3, A4) del clúster de las Alternativas (A), para normalizarlos y así obtener la prioridad de los elementos.

El resultado final obtenido en base al modelo ANP desarrollado para determinar la mejor estrategia para la utilización del excedente hidroenergético del Paraguay se puede observar en la Tabla 45.

Clúster		Resultado supermatriz limite	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 Electrointensivas	0,1015	0,2338	23,38%
	A4 - Fomentar la Industria Nacional	0,3072	0,7079	70,79%
Totales		0,4249	1,000	1

Tabla 45: Prioridad general de las Alternativas.

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

3.3 Integración de los Resultados obtenidos

En base a la formulación de los modelos mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y el Proceso Analítico en Red (ANP) se obtuvieron resultados similares para ambos casos, en donde la tendencia predominante es la de la estrategia de implementar la A4 - Fomentar la Industria Nacional. Mediante la aplicación de ambos modelos se puede asegurar con certeza que la mejor estrategia en cuanto al uso adecuado del excedente de energía hidroeléctrica del Paraguay radica en la fuerte penetración de la industria nacional. Para cada uno de los criterios evaluados se trató de abordar los más trascendentes y/o importantes mediante la realización de encuestas y análisis de posibles criterios, además de establecer los indicadores más representativos en base a múltiples sistemas de recopilación de información.

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 4

La producción de energía eléctrica a través de las binacionales ITAIPU Binacional, Entidad Binacional Yacyreta y la Central Hidroeléctrica Acaray forman parte de los recursos más importantes que posee el Paraguay, por lo tanto, su eficiente, adecuada y conveniente utilización que reditúen en los mayores beneficios para el Paraguay, deberían ser evaluados adecuadamente. El impacto que tendría la apropiada utilización de los excedentes hidroenergéticos pueden afectar diferentes áreas positivamente, debido a que esto se traduciría en un aumento de empleos, impacto positivo al Producto Interno Bruto nacional y una mayor inversión en infraestructura del sistema de distribución de la Administración Nacional de Electricidad (ANDE); es decir, una mejora en la calidad de vida de todos los paraguayos.

Bajo este contexto, la evaluación sobre qué es lo más conveniente para el país sobre el uso de sus excedentes hidroenergéticos podría tornarse en una tarea compleja, debido a los diferentes criterios de evaluación existentes en un proceso de análisis tan importante para el país. En ese sentido, este trabajo ha presentado al AHP y ANP como herramientas de análisis multicriterio para el caso de estudio analizado.

Con los métodos del AHP y el ANP, se han incorporado tanto variables cuantitativas como cualitativas difíciles de identificar mediante enfoques usuales de evaluación, lo que representan en una ventaja comparativa importante debido al hecho de que son uno de los pocos métodos que permiten realizar dicha incorporación, el cual fue realizado mediante las matrices de comparación por pares. Por otro lado, el método del ANP facilita la reflexión del tomador de decisión, porque le permite considerar todas las posibilidades y razonar sobre la estructura de la metodología. Además, con esto se pretende proporcionar a los tomadores de decisiones una herramienta con rigor científico, con el análisis de una problemática contemporánea, de manera a tomar decisiones fundamentadas que producirán los mayores beneficios para el país.

Finalmente, se ha propuesto un nuevo enfoque de evaluación basado en las técnicas del AHP y el ANP para el análisis del uso adecuado de los excedentes hidroenergéticos del Paraguay, donde los criterios de evaluación e indicadores que han sido considerados fueron: Criterio Técnico (Costo Esperado de la Energía No Suministrada), Criterio Social (Generación de empleos), Criterio Ambiental (Emisiones de Gases de Efecto Invernadero), Criterio Económico (Producto Interno Bruto) y Criterio de Factibilidad (Riesgo de implementación). Igualmente, fueron consideradas las siguientes alternativas: (A1) Continuar cediendo energía: Paraguay sigue cediendo su excedente de electricidad al Brasil (es decir, *Business as Usual* o "BaU"), (A2) Alto nivel de exportación de energía hidroeléctrica: La electricidad se vende en el mercado mayorista brasileño a precios de mercado, generando un ingreso neto de alrededor de 50 USD/MWh, (A3) Alto nivel de penetración de la industria electro-intensiva: se instala en el país una fábrica similar a la fundidora de aluminio RTA de 1100 MW, (A4) Alto desarrollo de la pequeña industria: Se instalan muchas pequeñas industrias. Los parques industriales

de 180 MW se establecen en el escenario base y alcanzan una demanda acumulada de 1100 MW. Además ha sido analizado el Consumo de Energía (E), Consumo Total de energía del Paraguay (E1) y Consumo Total de energía del sector industrial (E2).

Los resultados del modelo ANP muestran que la mejor alternativa es la alternativa 4 (70,74%). Esto significa que de acuerdo con las hipótesis asumidas, la estrategia más adecuada para el Paraguay es la fuerte penetración de las industrias nacionales a través del uso de la energía eléctrica disponible, lo que traería grandes beneficios en muchos aspectos en comparación con otras alternativas, que a su vez propiciarían el desarrollo social, económico, ambiental y de integración regional y mundial para el Paraguay.

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO 5

En este capítulo se abordan algunas recomendaciones que surgen a partir de la implementación de la metodología y en las cuales se detectaron algunas limitaciones. Por una parte, las comparaciones por pares entre los criterios y/o alternativas dan lugar a que los resultados obtenidos dependan de algunos juicios subjetivos realizados por el decisor, siempre y cuando los juzgamientos realizados no estén justificados. Además, si el punto de partida de la metodología está compuesto por una red grande compuesta de un alto número de criterios y alternativas, el método requiere de muchas comparaciones por pares que dificultan la obtención de los resultados. Por otra parte, los criterios y las alternativas consideradas presentan una sensibilidad ante cambios en la metodología, por lo que la inclusión de criterios y/o alternativas irrelevantes podría modificar el ranking de los resultados obtenidos, y así, provocar un cambio en el orden final de las alternativas analizadas. En este sentido, para un trabajo futuro sería interesante considerar una mayor muestra de las alternativas a ser analizadas, realizando las modificaciones correspondientes en la metodología, sin embargo, el acceso a un gran número de datos, que en su mayoría no siempre son públicos, no es una tarea trivial.

Finalmente, a pesar de las limitaciones mencionadas, el modelo adoptado a partir de la metodología implementada contempló un gran número de alternativas y criterios que fueron puestos a consideración y refrendados y/o aprobados por diferentes actores del sector energético nacional, por ello se puede concluir que la metodología propuesta podría ser útil como herramienta de toma de decisiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, S., & Tahar, R. M. (2014). Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia. *Renewable Energy*, 63, 458-466.
- Almudena C. (2013). *La Decisión Multicriterio; Aplicación en la Selección de Ofertas Competitivas en Edificación*. P.27
- Amarilla, R., Buzarquis, E., Domaniczky, J., Barán, B., & Blanco, G. (2015, November). Analysis of the energy sector of Paraguay. Energy balance in terms of useful energy in 2011. In 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV) (pp. 1-7). IEEE.
- Amarilla, R.; Ojeda, H. (2014). Modelo de planificación multicriterio integrada: Caso de estudio de la utilización de los excedentes de energía hidroeléctrica del Paraguay. P. 49
- Aznar Bellver, J. (2011). Localización de plantas de tratamiento de residuos sólidos urbanos.
- Banco Central del Paraguay, 2011. Incorporación de las Binacionales a las Cuentas Nacionales y a la Balanza de Pagos de Paraguay. http://www.ssme.gov.py/vmme/images/noticias/Incorporacion_de_Ingreso_Binacionales_a_PIB%28rev%29.pdf. Accessed 10 July 2016.
- Barajas Moreno, J. J. (2016). Sumabilidad de Cesàro.
- Becalli, M., Cellura, M., & Mistretta, M. (2003). Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy*, 28(13), 2063-2087.
- Blanco, G., Amarilla, R., Martinez, A., Llamosas, C., & Oxilia, V. (2017). Energy transitions and emerging economies: A multi-criteria analysis of policy options for hydropower surplus utilization in Paraguay. *Energy Policy*, 108, 312-321.
- Cabrera, C. (2008). Aplicación de algoritmos genéticos al pre despacho de unidades térmicas usando flujo óptimo de potencia, 91-92.

- Casaña Pérez, Almudena. (2013). La decisión multicriterio: aplicación en la selección de ofertas competitivas en edificación, 9-11.
- Chung, Y., Hong, S., & Kim, J. (2014). Which of the technologies for producing hydrogen is the most prospective in Korea?: Evaluating the competitive priority of those in near-, mid-, and long-term. *Energy Policy*, 65, 115-125.
- CRU Strategies Ltd., 2011. Energía y Aluminio en Paraguay: Informe final preparado para ITAIPU Binacional. CRU Strategies Ltd., 324 pp.
<https://elpueblodecide.files.wordpress.com/2012/08/cru-inf-final-24-10-2011.pdf>.
- Goumas, M., & Lygerou, V. (2000). An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects. *European Journal of Operational Research*, 123(3), 606-613.
- Grubler, A., 2012. Energy transitions research: Insights and cautionary tales. *Energy Policy* 50, 8-16. 10.1016/j.enpol.2012.02.070.
- Heras, M. (2011). Flujo de Cargas Óptimo Probabilístico, 8-9.
- Hurtado, T., & Bruno, G. (2005). El Proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. Trabajo de grado (Licenciado en Investigación Operativa), Universidad Nacional de San Marcos. Facultad de Ciencias Matemáticas. EAP de Investigación Operativa, Lima.
- International Labour Organization -ILO, 2014. Slight decline and key challenges in informal employment in Paraguay. Notes on Formalization of the Regional Office for Latin America and the Caribbean.
http://www.ilo.org/americas/sala-de-prensa/WCMS_245890/lang--en/index.htm
- 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.
- Liu, T., Xu, G., Cai, P., Tian, L., & Huang, Q. (2011). Development forecast of renewable energy power generation in China and its influence on the GHG control strategy of the country. *Renewable Energy*, 36(4), 1284-1292.
- Marcotullio, P.J., Schulz, N.B., 2007. Comparison of Energy Transitions in the United States and Developing and Industrializing Economies. *World Development* 35 (10), 1650-1683. 10.1016/j.worlddev.2006.11.006.
- Medel-González, F., García-Ávila, L., Hernández, C., & Medel-González, M. (2015). Environmental performance evaluation procedure: application in the Cuban energy sector. *Gestão & Produção*, 22(3), 463-479.

- Ministerio de Industria y Comercio, Equipo de Trabajo Institucional ETI, 2011. Proyecto de Instalación de una Planta de Aluminio en Paraguay. <http://www.ssme.gov.py/vmme/pdf/riotinto/diegozavala.pdf>. Accessed May 23, 2016.
- Ozdemir, M. S., & Saaty, T. L. (2006). The unknown in decision making: What to do about it. *European Journal of Operational Research*, 174(1), 349-359.
- 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.
- Ren, J., & Sovacool, B. K. (2015). Prioritizing low-carbon energy sources to enhance China's energy security. *Energy Conversion and Management*, 92, 129-136.
- Saaty T. (1990). How to Make a Decision, *European Journal of Operational Research*. P.10
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.
- Saaty, T. L. (1996). *The analytical network process*. Pittsburgh: RWS Publication.
- Saaty, T. L. (1999, August). Fundamentals of the analytic network process. In *Proceedings of the 5th international symposium on the analytic hierarchy process* (pp. 12-14).
- Saaty, T. L. (2001). Decision making with dependence and feedback. *The analytic network process*.
- Saaty, T. L. (2013). Analytic network process. *Encyclopedia of operations research and management science*, 64-72.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1998). Diagnosis with dependent symptoms: Bayes theorem and the analytic hierarchy process. *Operations Research*, 46(4), 491-502.
- 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.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2013). *The logic of priorities: applications of business, energy, health and transportation*. Springer Science & Business Media.
- 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.
- Skikos, G. D., & Machias, A. V. (1992). Fuzzy multicriteria decision making for the evaluation of wind sites.

- Stein, E. W. (2013). A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 640-654.
- Toledano, P., & Maennling, N. W. (2013). Report on Leveraging Paraguay's Hydropower for Sustainable Economic Development.
- Toskano G. (2005). El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de decisiones en la selección de Proveedores. P.36.
- Viceministerio de Minas y Energía, Balance Energético Nacional, 2017, Pág. 41 de 55. <https://www.ssme.gov.py/vmme/pdf/balance2017/BEN2017.pdf>
- Voropai, N. I., & Ivanova, E. Y. (2002). Multi-criteria decision analysis techniques in electric power system expansion planning. *International journal of electrical power & energy systems*, 24(1), 71-78.
- Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., & Zhao, J. H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263-2278.
- Webb, J. (2015). Improvising innovation in UK urban district heating: The convergence of social and environmental agendas in Aberdeen. *Energy Policy*, 78, 265-272.

APÉNDICES

APÉNDICE 1. ENCUESTAS REALIZADAS A ACTORES DEL SECTOR ENERGÉTICO NACIONAL

Resultado de las encuestas					
Cantidad de Encuestas	Criterio Técnico	Criterio Social	Criterio Ambiental	Criterio Económico	Criterio de Factibilidad
1	6	8	8	6	7
2	7	8	6	7	8
3	3	4	5	2	1
4	5	9	7	7	3
5	9	7	7	5	7
6	9	5	5	8	5
7	6	7	8	9	5
8	9	7	8	8	8
9	0	0	8	9	9
10	6	6	3	9	9
11	8	9	7	8	9
12	8	9	8	8	8
13	8	6	7	9	7
14	7	7	5	9	5
15	8	6	5	7	9
16	9	5	5	7	7
17	6	5	7	7	5
18	9	4	4	8	7
19	8	5	7	9	4
20	9	7	8	6	6
21	9	8	8	9	6
22	3	5	5	5	3
23	5	5	3	9	9
24	1	1	1	1	1
25	0	0	0	9	1
26	7	5	8	9	3

Cantidad de Encuestas	Criterio Técnico	Criterio Social	Criterio Ambiental	Criterio Económico	Criterio de Factibilidad
27	7	7	8	9	7
28	8	6	9	9	3
29	8	6	7	9	7
30	7	6	2	9	7
31	9	8	7	8	7
32	7	9	6	9	9
33	7	5	3	7	3
34	3	5	5	7	3
35	7	9	5	9	8
36	7	7	3	5	3
37	8	9	5	9	9
38	5	3	3	7	5
39	8	8	3	9	7
40	7	6	6	5	9
41	7	6	3	6	6
42	5	9	2	9	5
43	7	5	3	9	5
44	7	7	5	7	5
45	3	9	7	7	7
46	9	9	9	9	9
47	5	7	5	7	5
48	5	7	0	8	0
49	8	5	5	6	5
50	7	5	5	7	5
51	5	6	6	7	7
52	7	8	9	9	5
53	9	8	9	9	9
54	3	3	2	9	9
55	6	5	5	9	5
56	6	7	2	6	5
57	5	8	9	9	8
58	2	4	6	7	7
59	8	9	9	9	9
60	7	6	2	9	1
61	9	8	9	7	6
62	9	5	7	9	9
63	8	5	8	4	7
64	9	8	8	8	7

Cantidad de Encuestas	Criterio Técnico	Criterio Social	Criterio Ambiental	Criterio Económico	Criterio de Factibilidad
65	9	9	9	7	7
66	3	5	1	4	2
67	7	9	8	6	6
68	7	9	9	7	8
69	7	5	5	8	5
70	8	5	5	8	7
71	9	7	7	9	9
72	9	8	9	9	9
73	5	7	3	9	9
74	9	9	8	8	8
75	8	9	5	7	6
76	9	9	9	9	9
77	6	9	8	2	4
78	8	1	1	8	1
ΣTotal	523	502	447	588	475

APÉNDICE 2. PONDERACIÓN DE CRITERIOS Y VECTOR DE PRIORIDAD OBTENIDO EN BASE A LAS ENCUESTAS REALIZADAS

Criterios	Ponderación	Vector de prioridad
1. Económico	588	0.231952663
2. Técnico	523	0.206311637
3. Social	502	0.198027613
4. Factibilidad	475	0.187376726
5. Ambiental	447	0.176331361
ΣTotal	2535	1.000000000

**APÉNDICE 3. COMPARACIONES PAREADAS DE LOS CRITERIOS
EN BASE A LAS ENCUESTAS Y CÁLCULO DEL RATIO DE
CONSISTENCIA**

Crterios	1. Económico	2. Técnico	3. Social	4. Factibilidad	5. Ambiental
1. Económico	1	2	2	2	2
2. Técnico	1/2	1	1	2	2
3. Social	1/2	1	1	1	2
4. Factibilidad	1/2	1/2	1	1	1
5. Ambiental	1/2	1/2	1/2	1	1

ΣTotal	3.00	4.96	5.54	7.00	8.00
---------------------------------	------	------	------	------	------

N=	5
----	---

W=	0.33	0.22	0.18	0.14	0.12
----	------	------	------	------	------

C=	3.00
	4.96
	5.54
	7.00
	8.00

$\lambda_{\text{máx}}$ =	5.10
--------------------------	------

IC=	0.025
-----	-------

RC=	0.022
-----	-------