



## **Análisis Multicriterio para la instalación de energía solar fotovoltaica en Paraguay**

**Iván Velázquez, Mayra Alfonso**

**Universidad Nacional de Asunción – Facultad de Ingeniería/Facultad Politécnica**

**Paraguay**

### **1.1 RESUMEN**

Paraguay cuenta actualmente con un alto potencial en generación de energía eléctrica, pero a su vez, posee un gran crecimiento anual de la demanda, el cual ha sido estimado en 8.9% en el escenario de mayor aumento, según se establece en el Plan Maestro de la ANDE 2016-2025. A este ritmo se tiene previsto llegar al límite de producción en alrededor de 10 años.

De ello nace la relevancia del estudio de otras fuentes de generación de energía y la factibilidad de la integración de estos al sistema actual, teniendo en cuenta los recursos naturales con los que cuenta el país y buscando el aprovechamiento eficiente de dichos recursos para un crecimiento sostenible.

Ahora bien, para el desarrollo de estas tecnologías y el logro de precios competitivos en comparación con las alternativas convencionales, las basadas en combustibles fósiles y centrales hidroeléctricas de gran escala, es fundamental realizar un análisis de las distintas opciones de generación de energía no convencionales (solar, eólica, biomasa, entre otras).

Es con este fin que en el presente artículo se presenta un Proceso Analítico Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) en el cual se evalúan distintas alternativas para la integración de generación solar fotovoltaica al Sistema Eléctrico Interconectado del Paraguay en el año 2023. El objetivo de lo propuesto consiste en hallar la localización más óptima para la instalación de un generador solar fotovoltaico, bajo un enfoque técnico y económico, y considerando la incertidumbre del crecimiento de la carga, la cual primeramente se modela bajo el Movimiento Browniano Tendencial y posteriormente se le aplica simulaciones de Monte Carlo para abordar distintos escenarios de incertidumbres.

### **1.2 PALABRAS CLAVES**

Generación fotovoltaica, movimiento Browniano, evaluación multicriterio, AHP.

### **1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO**

#### **1.3.1 Objetivo General**

- Realizar un análisis multicriterio con base técnica y económica para la integración de generación solar fotovoltaica al Sistema Eléctrico Interconectado Paraguayo en el año 2024.



### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo del sistema eléctrico interconectado contemplando generación solar fotovoltaica en el año 2024.
- Establecer criterios para la evaluación de las alternativas para la localización de un generador solar fotovoltaico en el año 2024.
- Realizar comparaciones cuantitativas de los distintos parámetros establecidos.
- Simular computacionalmente para determinar la alternativa más óptima para la integración de generación solar al sistema eléctrico interconectado modelado.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo evalúa 10 alternativas de barras para la integración de un generador solar fotovoltaico al SIN. Los recursos y pasos utilizados para el establecimiento de dichas alternativas se presentan a continuación.

### 2.1 Software MATPOWER

MATPOWER es un paquete de archivos *.m* del software MATLAB para la solución de problemas de Flujo de Potencia (FP), Flujo de Potencia Óptimo (FPO), Estimación de Estado (EE), etc. Está concebida como una herramienta de simulación, fácil de utilizar y modificar, para investigadores y educadores. [1]

Está diseñado para entregar el mejor rendimiento posible sin perder simplicidad para comprender y modificar su código. MATPOWER está disponible en línea (<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/MATPOWER>) y fue desarrollado por Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sánchez y Deqiang Gandel del Power Systems Engineering Research Center (PSERC) – Cornell University de Estados Unidos. [1]

De la misma forma cabe destacar que para los flujos de potencia, permite desarrollar resoluciones tanto para Corriente Alterna (AC), como en Corriente Continua (CC). 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, entre los que se encuentran: El Primal-Dual Interior Point Method (PDIPM), el MINOS, el BPMPD, etc. [1] En este trabajo el utilizado es el PDIPM.

### 2.2 Modelado de la Red y OPF

El Flujo de Potencia Óptimo (OPF, por sus siglas en inglés) del SIN paraguayo, es obtenido a partir de un modelo de red simplificado que contempla las líneas de transmisión (LT) de 500 kV y 220 kV, además de las unidades generadoras existentes. Los datos del SIN utilizados fueron obtenidos de [2]. En la Fig.1 se muestra la red para el año 2024, previendo la ejecución de obras según el Plan Maestro de la ANDE 2016-2025.

La obtención del OPF toma como parámetros de control que el suministro de la demanda no viola los criterios de seguridad de tensión y de carga en líneas de transmisión y equipos de transformación en condiciones normales de operación del sistema (red completa) [2].

El cálculo del OPF, tiene el objetivo de estimar el costo óptimo de generación considerando que la demanda es inelástica. Esto último establece que, a pesar que acontezcan cambios sustanciales dentro del mercado, tales como un aumento de precios en la energía, los usuarios no son capaces de cambiar su demanda en el corto plazo. [3]

En este trabajo se utilizara el OPF de Matpower "runpof.m" dada su flexibilidad y accesibilidad al código fuente para realizar las modificaciones y simulaciones necesarias. Se emplea la variante de cálculo del OPF en Corriente Alterna (OPF-AC, por sus siglas en inglés).

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Selección de la barra

El Proceso Analítico Jerárquico es una de las técnicas multicriterio con mayor implantación práctica en casi todos los ámbitos de la toma de decisiones. Sin entrar a estudiar con detalle cuáles son las causas que han motivado su gran aplicabilidad, mencionar que, entre éstas, cabe citar las mismas ideas que sugirieron su metodología, esto es: la flexibilidad de la técnica; la adecuación a numerosas situaciones reales referidas, fundamentalmente, a la selección multicriterio entre alternativas; su facilidad de uso; la posibilidad de aplicarla en decisión individual y en grupo [4].

El primer paso del método AHP consiste en modelar el problema de decisión que se pretende resolver como una jerarquía. Esta es la característica principal del método y consiste en situar en el vértice superior la meta global del problema; en el nivel inmediatamente inferior, los criterios; y por debajo de estos últimos, las alternativas. [4]

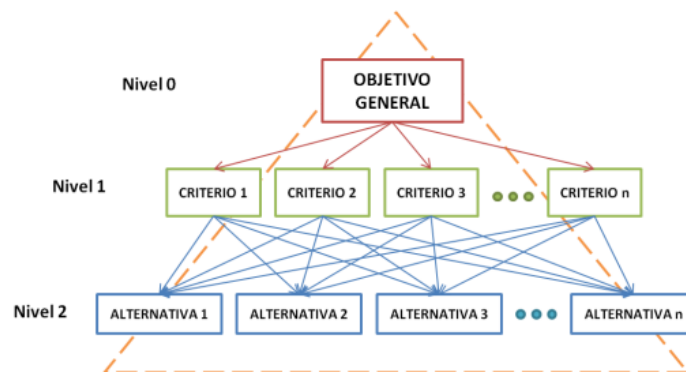


Fig. 1: Jerarquía AHP Genérica. FUENTE: [5]

Posteriormente se busca construir un vector de pesos que establezca la importancia relativa que se le dará a cada criterio con respecto al objetivo principal del problema. En este punto se pueden utilizar 2 estrategias distintas para asignar un valor numérico a cada criterio: la asignación directa y la asignación indirecta. [4]

- *Asignación directa:*

El decisor realiza la valoración de los criterios de forma cualitativa. Cada valoración corresponderá con un valor numérico, según una escala definida previamente.

- *Asignación indirecta:*

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

Consiste en realizar comparaciones entre pares de criterios y se basa en los conceptos matemáticos del auto-valor o vector propio.

Como ya se ha indicado, cuando el decisor realiza el proceso de comparación por pares pueden darse incoherencias que generen un auto-valor poco representativo. Para detectar la inconsistencia de la matriz después de construir la matriz R, puede resolverse la ecuación 1:

$$R \cdot \vec{w} = \lambda_{m\acute{a}x} \cdot \vec{w} \quad (1)$$

Cuanto más próximo sea el valor de  $\lambda_{m\acute{a}x}$  la dimensión de la matriz (n), mayor será la consistencia de los juicios emitidos. Cuando no se tiene un valor exacto a n, puede medirse la consistencia mediante el índice de consistencia (IC) (Ver ecuación 2):

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (2)$$

El IC debe compararse con el índice de consistencia aleatorio (CA), que se define como el índice de consistencia aleatorio medio obtenido mediante la simulación de 100.000 matrices recíprocas generadas aleatoriamente utilizando la escala de Saaty. Como resultado de estas simulaciones, se obtiene la siguiente tabla, que contempla los valores de CA en función de n (hasta dimensión n=16):

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404
n	9	10	11	12	13	14	15	16
RI	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

**Tabla 1: CA en función de la dimensión de la matriz (n). Fuente: [5].**

Conocidos IC e CA, se obtiene entonces el ratio de consistencia (RC) según la ecuación 3:

$$RC = IC / IR \quad (3)$$

Finalmente, se consideran aptos los resultados del auto-vector si RC no supera los siguientes valores umbrales:

Dimensión de la matriz (n)	Valor umbral
3	0.05
4	0.08
≥ 5	0.1

**Tabla 2: Umbrales de RC en función de la dimensión de la matriz (n). Fuente: [5].**

### 3.2 Criterios

Para la selección de la ubicación de las plantas de energía renovable se hace uso de dicho método con asignación indirecta, y teniendo en cuenta los siguientes 5 criterios:

#### 3.2.1 Costos nodales (Pr)

Los valores son extraídos del caso base en Matlab para el año 2024. Este criterio se define como el principal para la selección de las barras, ya que se busca estabilizar los costos que se encuentran muy por encima de la media.

### 3.2.2 Potencial de Generación de Energía Fotovoltaica Anual (FV)

Estos valores son obtenidos de la página web del Mapeo de Potencial Solar y Eólico del Paraguay, elaborado por el Parque Tecnológico Itaipu y disponibles en su página web [6], y corroborados con el Mapa de Recurso Solar elaborado por Solargis y publicado por el Banco Mundial y la Corporación Financiera Internacional. Este se encuentra disponible en [7]. En este criterio se favorece aquellas alternativas que presenten mayor potencial energético.

### 3.2.3 Demanda en las barras (D)

Las mismas son obtenidas del caso base en Matlab para el año 2024. En este criterio se favorece aquellas alternativas que presenten mayor demanda.

### 3.2.4 Pérdidas totales en el sistema (P)

Las mismas son obtenidas una vez realizado el OPF del caso base en Matlab para el año 2024, y habiendo insertado el generador solar fotovoltaico. En este criterio se favorece aquellas alternativas que presenten menor pérdida total del sistema.

### 3.2.5 Costo Global de Producción (CP)

Estos costos son obtenidos una vez realizado el OPF del caso base en Matlab para el año 2024, y habiendo insertado el generador solar fotovoltaico. En este criterio se favorece aquellas alternativas que presenten menor costo de producción del sistema.

## 4. SIMULACIONES Y RESULTADOS

El caso de estudio del presente trabajo es el Sistema Interconectado Nacional (SIN) del Paraguay, evaluado en el periodo 2024, según lo contemplado en el Plan Maestro de Generación y Transmisión para el periodo 2016-2025 [2]. En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta en el apartado anterior.

### 4.1 Elección de Alternativas

Teniendo en cuenta los precios nodales de las barras presentes en el sistema en el año 2024 luego de realizar el OPF del mismo, se seleccionaron las siguientes 10 barras 220 KV del SIN para la comparación por medio del método AHP. Estas se visualizan en Tabla 3.

BUS #	BARRA	CÓDIGO
472	CERRO CORA	CCO
425	PIRAYU	PIR
452	CARLOS A LOPEZ	CAL
471	CAPITAN BADO	BDO
4472	COLONIA INDEPENDENCIA	CIN
468	HORQUETA	HOR
469	VALLEMI 1	VMI1
479	LOMA PLATA	LPA
4487	POZO COLORADO	PZO
454	TRINIDAD	TRI



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

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

---

**Tabla 3: Barras del SIN seleccionadas para la comparación. Fuente: [Elaboración Propia]**

#### **4.2 Verificación de datos**

Tomando en cuenta los establecidos y las alternativas seleccionadas, se completaron los datos de cada barra para cada criterio. Dichos datos se visualizan en Tabla 4.

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

<u>CRITERIOS</u>	<u>UNIDAD</u>	<u>OPCIONES</u>									
		CCO	PIR	CAL	BDO	CIN	HOR	VMI1	LPA	PZO	TRI
C	\$/MVA-h	45,988	44,33	43,07	47,55	47,44	47,43	49,24	49,97	48,70	45,45
FV	kWh/m2	1898	1679	1643	1825	1752	1752	1752	1716	1716	1606
D	MW	16,88	102,11	10,59	97,48	60,12	44,88	29,46	75,80	6,50	87,71
P	MW	227,90	229,14	230,43	226,27	226,00	226,05	226,27	224,63	223,98	228,39
CP	\$/hr	- 1547706 2,63	- 1547700 8,14	- 1547695 1,40	- 1547713 4,29	- 1547714 6,23	- 15477144, 16	- 1547713 4,54	- 1547720 6,79	- 15477235,46	- 1547615 9,99

**Tabla 4: Datos de las Barras del SIN seleccionadas. Fuente: [Elaboración Propia]**
**4.3 Evaluación de los criterios de valoración**

A continuación se construye una matriz, a partir de la comparación de los diferentes criterios con el propósito de estimar la importancia relativa entre cada uno de ellos. En este caso se asume que todos los criterios tienen el mismo peso. Esta matriz constituye la Tabla 5.

	<b>PRIORIDAD RELATIVA %</b>
<b>COSTO NODAL</b>	20
<b>POTENCIAL DE ENERGÍA SOLAR ANUAL</b>	20
<b>DEMANDA</b>	20
<b>PÉRDIDAS</b>	20
<b>COSTO GLOBAL DE PRODUCCIÓN</b>	20

**Tabla 5: Jerarquización de criterios en %. Fuente: [Elaboración Propia]**
**4.4 Evaluación de las alternativas de valoración**

Posteriormente se realiza la evaluación de las alternativas por el método de asignación indirecta como se describió anteriormente. Los resultados se presentan en la Tabla 6.

BARRA	COSTO NODAL	POTENCIAL DE ENERGÍA SOLAR ANUAL	DEMANDA	PÉRDIDAS EN EL SISTEMA	COSTO GLOBAL DE PRODUCCIÓN
<b>CCO</b>	0,098	0,123	0,032	0,100	0,100
<b>PIR</b>	0,094	0,109	0,192	0,099	0,100
<b>CAL</b>	0,092	0,106	0,020	0,098	0,100
<b>BDO</b>	0,101	0,118	0,183	0,100	0,100

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

<b>CIN</b>	0,101	0,113	0,113	0,100	0,100
<b>HOR</b>	0,101	0,113	0,084	0,100	0,100
<b>VMI1</b>	0,105	0,113	0,055	0,100	0,100
<b>LPA</b>	0,107	0,111	0,143	0,101	0,100
<b>PZO</b>	0,104	0,111	0,012	0,101	0,100
<b>TRI</b>	0,097	0,104	0,165	0,099	0,100

**Tabla 6: Pesos relativos resultantes de la comparación de alternativas de acuerdo a los criterios**  
Fuente: [Elaboración Propia]

Es muy importante agregar que se analizaron las consistencias de los resultados utilizando las ecuaciones 1 al 3 y teniendo en cuenta el umbral permitido de la RI según la Tabla 2, y en todos los casos, este entra dentro del margen.

#### 4.5 Jerarquización final de las alternativas

Finalmente, para conocer qué alternativa es la más importante de acuerdo a los criterios establecidos se realiza la jerarquización de las alternativas, lo cual se muestra en la Tabla 7.

<b>Ponderación final</b>	
<b>CCO</b>	9,05%
<b>PIR</b>	11,89%
<b>CAL</b>	8,33%
<b>BDO</b>	<b>12,06%</b>
<b>CIN</b>	10,56%
<b>HOR</b>	9,99%
<b>VMI1</b>	9,48%
<b>LPA</b>	11,22%
<b>PZO</b>	8,57%
<b>TRI</b>	11,30%

**Tabla 7: Jerarquización Final en porcentaje. Fuente: [Elaboración Propia]**

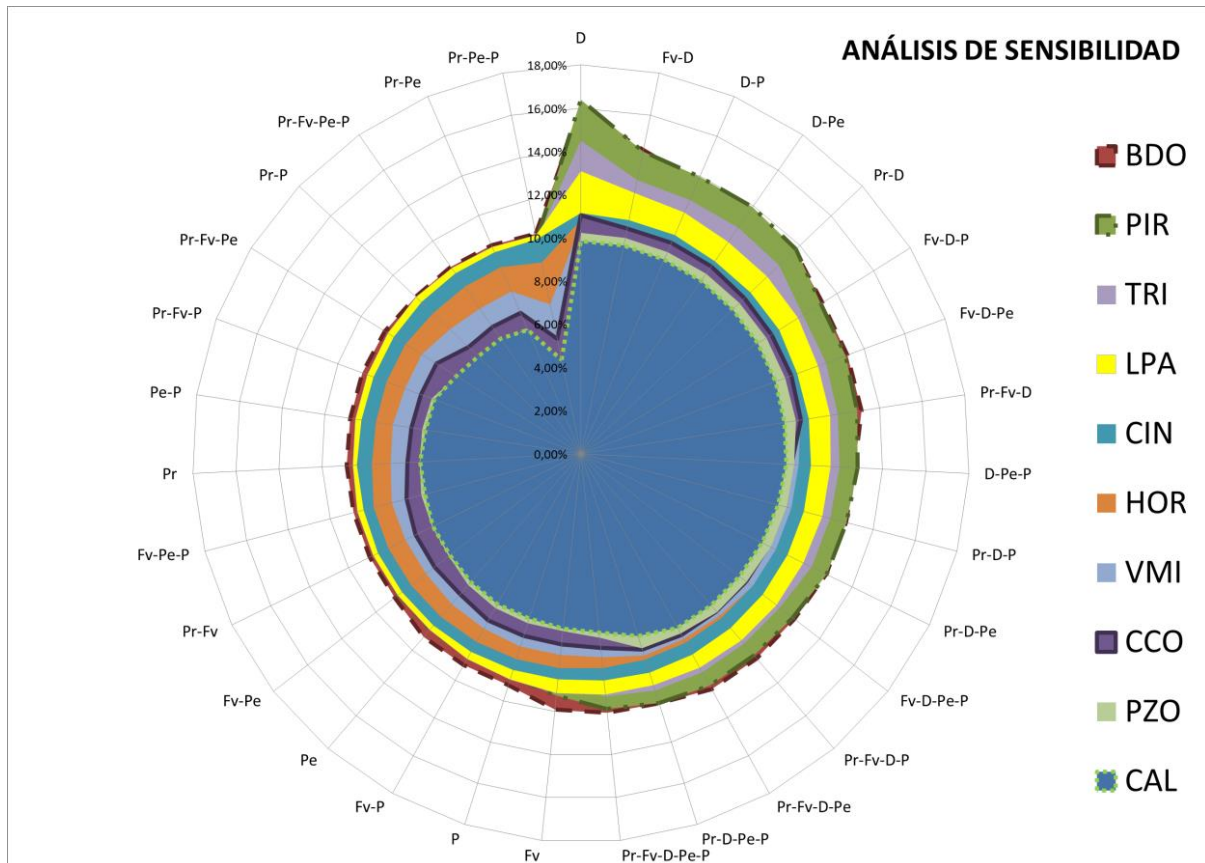
De lo anterior, por tener un mayor peso se selecciona la barra número 471, con código BDO correspondiente a la barra ubicada en la ciudad de Capitán Bado.

#### 4.6 Análisis de sensibilidad

Como último paso de este proceso se realiza un análisis de sensibilidad para así confirmar la solidez de los datos. El análisis de sensibilidad consiste en verificar la estabilidad en el ordenamiento de las alternativas al modificar arbitrariamente en una determinada cantidad, la ponderación relativa de los criterios de evaluación, esto se logra variando la ponderación de los criterios mientras se observa el comportamiento del orden de las alternativas.

El criterio más importante considerado para la selección es el precio nodal de la barra, el cual como muestra el gráfico 1 solo presenta una variación notable cuando la demanda presenta una mayor relevancia. Así se demuestra que la robustez de los resultados obtenidos.





**Gráfico 1: Análisis de Sensibilidad del modelo. Fuente: [Elaboración Propia]**

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo, la aplicación de un marco metodológico ha sido presentada para seleccionar una alternativa viable técnica y económicamente para la generación de energía solar fotovoltaica. Podemos concluir que la instalación de una planta fotovoltaica en la ciudad de Capitán Bado, en la cual se encuentra la barra BDO es la estrategia más viable para equilibrar los precios y tener una alternativa a la generación hidroeléctrica que beneficie tanto a la encargada de administrar el sistema (ANDE) como a sus contribuyentes.

Como un trabajo futuro, el cual ya se encuentra en proceso actualmente, se puede también realizar el análisis de rentabilidad de la integración de esta fuente a dicha barra, y analizar la viabilidad financiera con respecto a otra opción (repotenciación de líneas).



## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Power Systems Engineering Research Center. Cornell University. Disponible en: [www.pserc.cornell.edu](http://www.pserc.cornell.edu).
- [1] C. Battle y R. Paredes, BID. (2014). Análisis del impacto del incremento de la generación de energía renovable no convencional en los sistemas eléctricos latinoamericanos.
- [2] Dirección de Planificación General y Política Empresarial (DP), División de Estudios Energéticos (DP/EE), Departamento de Estudios de Generación y Transmisión (DP/DEG), y Sección Estudios de Generación (DP/DEG1). (2016). Plan Maestro de Generación y Transmisión 2016-2025. Disponible en: [http://www.ande.gov.py/plan\\_maestro.php](http://www.ande.gov.py/plan_maestro.php).
- [3] G. Blanco, D. Waniek, F. Olsina, F. Garcés, and C. Rehtanz. (2011). Flexible investment decisions in the European interconnected transmission system. Electric Power Systems Research, vol. 81, issue 4, pp. 984-994.
- [4] J. Moreno, El Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Disponible en: [https://users.dcc.uchile.cl/~nbaloian/DSSDCC/ExplicacionMetodoAHP\(ve%20paginas11-16\).pdf](https://users.dcc.uchile.cl/~nbaloian/DSSDCC/ExplicacionMetodoAHP(ve%20paginas11-16).pdf).
- [5] J. Jiménez. (2013). Desarrollo de un Sistema de Ayuda a la Decisión (SAD) integrando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Soft Computing (SC) para resolver problemas de ubicación óptima. Tesis de Grado. Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica de Cartagena.
- [6] Mapeo de Potencial Solar y Eólico del Paraguay - Parque Tecnológico Itaipu. Disponible en: <http://pese.pti.org.py/maps/107/view>.
- [7] World Bank Group - Global Solar Atlas. Disponible en: <http://globalsolaratlas.info/downloads/paraguay>