

# A New Way to Reduce Electrical Intermittency in a Sustainable Way, Case Study: A Pumped Storage Reservoir-Solar Hybrid System in Mexico

*Una Nueva Forma de Reducir la Intermitencia Eléctrica de Manera Sustentable, Caso de Estudio: un Sistema Híbrido Tipo Rebombear Solar en México*

**Leonardo de Jesús Ramos Gutiérrez<sup>\*1</sup>, Manuel Montenegro Fragoso<sup>\*\*2</sup>**

<sup>1</sup> Comisión Federal de Electricidad, <sup>2</sup> Universidad Panamericana, Campus Guadalajara

Correspondence e-mail: leonardo.ramosg@cfe.mx\*, mmontene@up.edu.mx\*\*

Received: 21/03/2019. Modified: 18/06/2019. Accepted: 30/07/2019

## Abstract

**Context:** Mexico before 2013, had a unilateral government-like control of the electricity sector, a situation that was modified with the energy reform, where the operating policies changed, creating a new scheme based on a Wholesale Electricity Market (MEM) through an open market and where the sources with the greatest presence to date are intermittent power generation sources, such as; photovoltaic solar power plants and wind power plants. The intermittency of these sources arising in the electrical transmission network will cause a problem of energy security called the duck curve.

**Method:** This technical-administrative study makes a detailed panorama to structure a model through decision making with the Hierarchical Analysis Process (AHP, acronym in English) to repower the Mexican electric sector by making decisions with social criteria, environmental, economic, political and technical.

**Results:** A sensitivity analysis is presented as a result of the LINGO Software and Web Hipre that supports the criterion and sub-criterion that will benefit the most by including a new innovation called Re-pumping-solar to save-the public finances and decrease the electrical intermittency in Mexico.

**Conclusions:** Lead to decision making, technologies within energy policies without the need for a physical model, but yes; with an investigation of operations verifying the feasibility of said technologies.

**Keywords:** decision making, energy security, innovation, intermittent, pumped storage reservoir solar, sensitivity analysis.

**Language:** Spanish.

## Open access



Cite this work as: L.Ramos and M. Montenegro., "A New Way to Reduce Electrical Intermittency in a Sustainable Way, Case Study: A Pumped Storage Reservoir-Solar Hybrid System in Mexico", Ingeniería, vol. 24, no.3, pp. 209-223, Sep-Dec. 2019.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI:<https://doi.org/10.14483/23448393.14256>

## Resumen

**Contexto:** México, antes de 2013, tenía un control unilateral tipo gubernamental del sector eléctrico, situación que fue modificada con la reforma energética donde las políticas de operación cambiaron, creando un nuevo esquema basado en un mercado eléctrico mayorista (MEM) a través de un mercado abierto; al mismo tiempo, las fuentes con mayor presencia a la fecha son las fuentes de generación eléctrica tipo intermitente, tales como las centrales solares fotovoltaicas y las centrales eólicas. La intermitencia que de estas fuentes surja en la red de transmisión eléctrica provocará un problema de seguridad energética denominado la curva de pato.

**Método:** Este estudio técnico-administrativo realiza un panorama pormenorizado para estructurar un modelo a través de la toma de decisiones con el proceso de análisis jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), ello con el fin de repotenciar el sector eléctrico mexicano mediante la toma de decisiones con los criterios sociales, ambientales, económicos, políticos y técnicos.

**Resultados:** Se presenta un análisis de sensibilidad resultado del software Lingo y Web-Hipre, el cual sustenta el criterio y subcriterio que mayor beneficio tendrá al incluir una nueva innovación denominada rebombeo solar, ello para salvaguardar las finanzas públicas y disminuir la intermitencia eléctrica en México.

**Conclusiones:** Llevar a la toma de decisiones y tecnologías dentro de políticas energéticas sin necesidad de un modelo físico, pero sí con una investigación de operaciones, comprobando la factibilidad de estas.

**Palabras clave:** análisis de sensibilidad, innovación, intermitencia, rebombeo solar, seguridad energética toma de decisiones.

**Idioma:** Español

## 1. Introducción

En la búsqueda de un esquema práctico y sustentable para cumplir con los compromisos ambientales y disminuir la presencia de gases de efecto invernadero (GEI) derivados del modo de producción eléctrico actual, México ha recurrido a la energía renovable, particularmente a la energía solar o a la fuente de energía eléctrica eólica. Sin embargo, considerando que ambas son fuentes de energía eléctrica denominadas limpias (no generan dióxido de carbono o CO<sub>2</sub>), además de utilizar recursos renovables para su producción eléctrica, no alcanzan un grado de confiabilidad si no cuentan con el respaldo de una capacidad instalada de almacenamiento de energía eléctrica. Teniendo en cuenta lo anterior, este estudio propone una tecnología híbrida en búsqueda de evitar un problema futuro de regulación y abasto eléctrico que provocaría la intermitencia de las fuentes solares y eólicas en el sistema eléctrico mexicano (SEN). El sistema que se propone es una central de almacenamiento de energía por bombeo, junto con la incorporación de un sistema de paneles solares flotantes sobre el embalse inferior, de ahí la denominación híbrida. Al ser una tecnología nueva para México y el mundo, primero se debe convencer a los expertos que toman decisiones en el Gobierno mexicano de que la propuesta funciona. Esta tecnología híbrida debe ser incluida en el parque eléctrico mexicano, ya que, como lo establecen en [1], se ha comprobado que las fuentes de energía solar y eólica acarrearán el fenómeno de la curva de pato en el mediano plazo, luego de alimentar las redes de transmisión eléctrica.

La curva de pato representa gráficamente un déficit de potencial eléctrico durante las horas de despacho, derivado de la intermitencia eléctrica proveniente de la energía solar fotovoltaica y la energía eólica, lo cual pone en riesgo la seguridad energética, como se indica en [2]. Este fenómeno en el SEN provocará sobrecostos provenientes de la alteración eléctrica en diversos sectores de consumo en momentos fluctuantes dentro de las líneas de transmisión y distribución eléctrica, ello para la regulación de estas y la estabilización de la red.

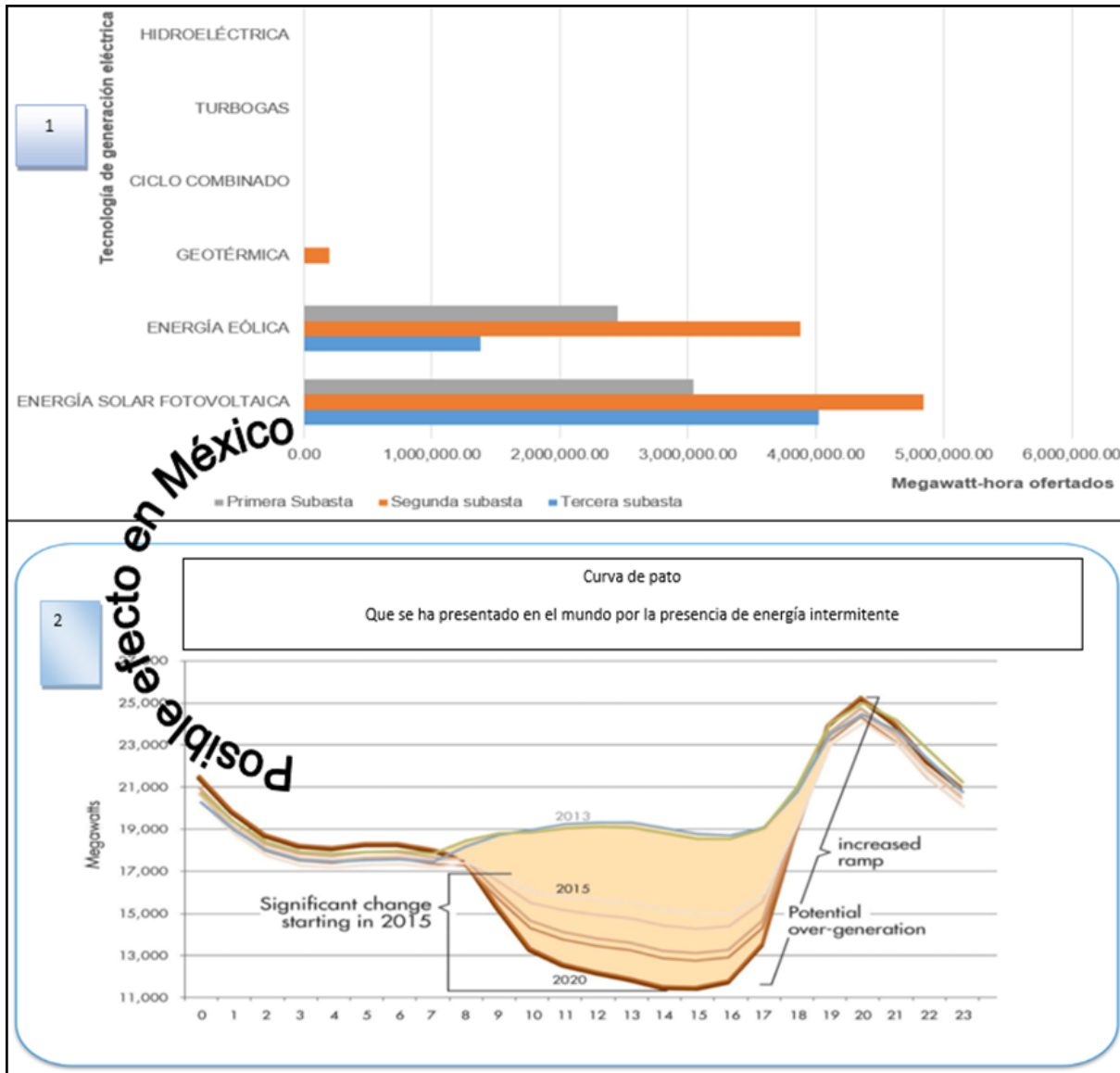
Con apego a [3], donde los autores de manera coordinada han sabido intercalar distintas fuentes de energía eléctrica de modo sustentable, se impulsó la idea de abatir la intermitencia eléctrica; así, en México, a mediano plazo, se puede desarrollar un modelo de sensibilidad con participación de quienes toman decisiones en el Gobierno para impulsar la creación del primer rebombero solar en este país. Para esto, se recurrió al método de [4], un estudio con base en procesos analíticos jerárquicos para la toma de decisiones, se realizó una encuesta que involucró la opinión de expertos dentro de los aspectos del desarrollo sustentable: aspecto social, ambiental, económico, político y, finalmente, el técnico. Mediante el *software* Lingo y Web-Hipre se busca representar gráficamente la toma de decisiones que consideraron pertinente los expertos. Con la opinión de expertos se busca determinar si procede construir un rebombero y paneles solares flotantes como solución para lograr una autosuficiencia energética, la estabilización de la red nacional mexicana y un equilibrio en el despacho eléctrico con un manejo asequible de tarifas.

## 2. Metodología

En primer lugar, se procedió a identificar el estado actual de los rebombero en México con base en el marco teórico, y particularmente con el Programa de Desarrollo del Sector Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018 es el más reciente convenio), donde se pudo identificar que en México no existe ningún rebombero y, mucho menos, una mezcla en uso con la energía solar fotovoltaica (paneles solares flotantes).

Derivado de lo anterior, se recurrió a los resultados de las últimas tres subastas del mercado eléctrico mayorista (MEM), además de identificar la participación actual de las energías renovables tipo solar y eólica en otros mercados eléctricos para conocer los impactos de estas tecnologías en ellos (Figura 1). Así, se encontró el fenómeno de la curva de pato que ha desestabilizado mercados eléctricos, se tomó como muestra el mercado eléctrico de los Estados Unidos de América, específicamente en el estado de California. Con estos datos se identificó la alerta futura para evitar que la intermitencia en el parque eléctrico mexicano presente sobre costos y problemas de despacho a largo y mediano plazo.

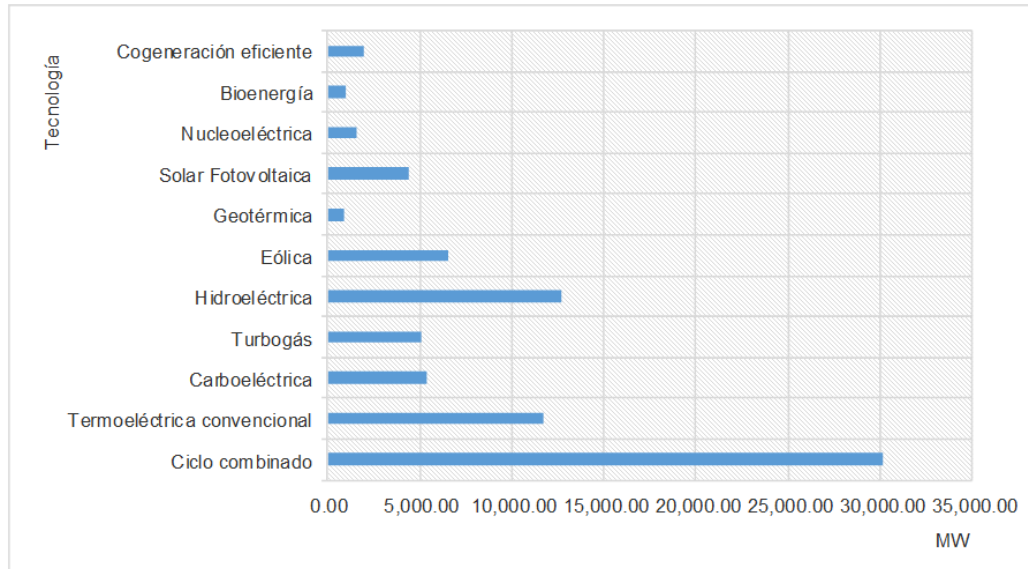
Posteriormente, se recurrió a la búsqueda del comportamiento evolutivo de la participación de forma aislada de las fuentes de energía solar fotovoltaica y la energía eólica en el SEN. La energía solar, en el periodo 2010-2018, experimentó un incremento de 4397 MW en cuanto a capacidad instalada se refiere, lo que podría traducirse en un promedio de 549 625 MW por año; sin embargo, en números reales el mayor incremento evolutivo de la capacidad instalada de la energía solar fotovoltaica ha sido de 3752 MW instalados, que comprendió el periodo 2017 y 2018 respectivamente.



**Figura 1.** Resultados de las Subastas del MEM (1) y la curva de pato que se presentó en California, EUA (2) en el 2018.

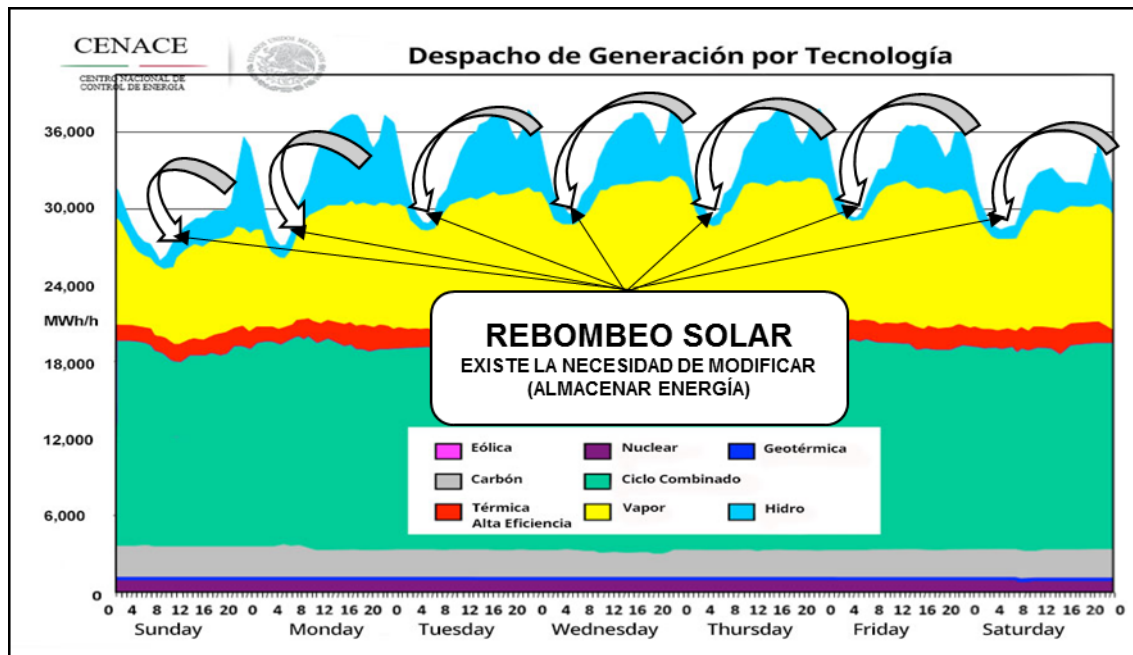
La energía solar, en el periodo del 2010-2018, experimentó un incremento de 4397 MW en cuanto a capacidad instalada se refiere, lo que podría traducirse en un promedio de 549 625 MW por año; sin embargo, en números reales, el mayor incremento evolutivo de la capacidad instalada de la energía solar fotovoltaica ha sido de 3752 MW instalados, que comprendió el periodo entre 2017 y 2018.

Finalmente, se identificó la participación actual de la energía solar fotovoltaica y la energía eólica en el SEN. Los resultados obtenidos hasta el mes de diciembre de 2018 presentan 6590.88 MW de capacidad instalada de energía eólica, lo que equivale al 8.09 % de la capacidad total del país en México, y una capacidad instalada de energía solar fotovoltaica de aproximadamente 4426.21 MW, es decir, 5.43 % de la capacidad instalada en el parque eléctrico mexicano (Figura 2).



**Figura 2.** Capacidad instalada del sector eléctrico nacional mexicano hasta el diciembre de 2018.

El paso siguiente fue verificar en tiempo real los registros del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). En lo particular se indagó en los registros de generación eléctrica coincidente, el día 14 de diciembre del 2018, donde se pudo observar las manifestaciones de déficit y el sustento técnico para promover el abatimiento de la intermitencia eléctrica antes de que crezca la curva de pato en el SEN, como ocurrió en el mercado eléctrico de California, Estados Unidos (Figura 3)

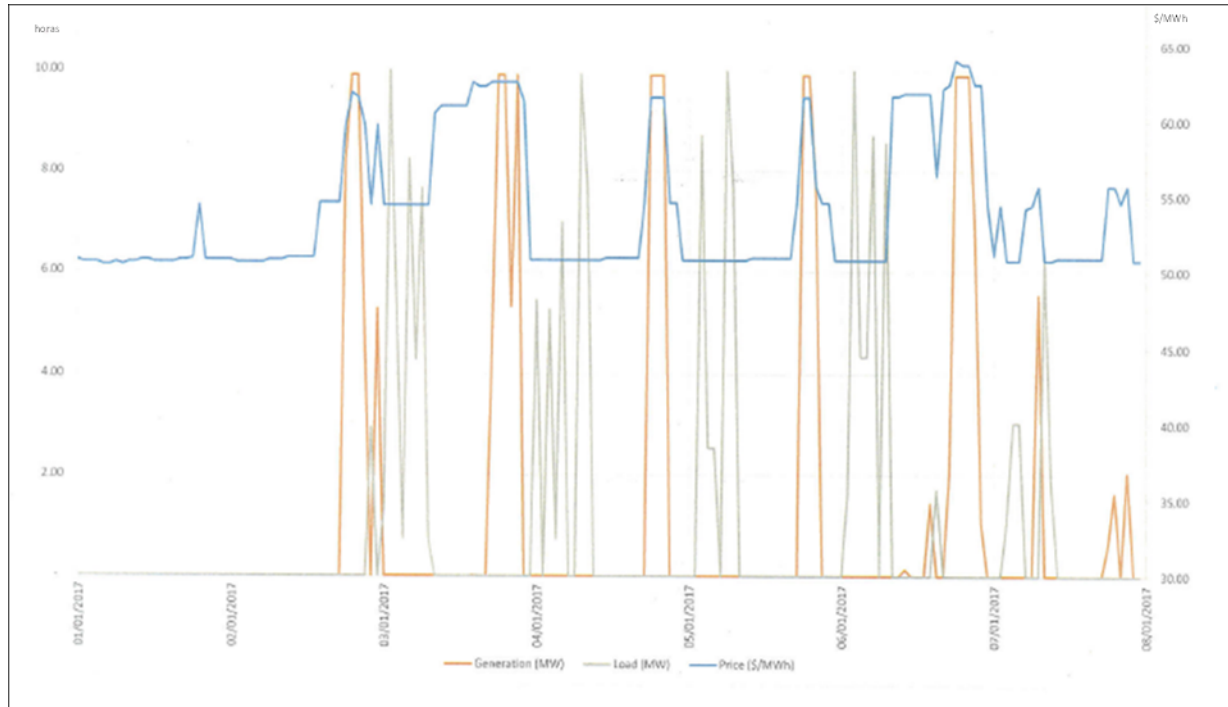


**Figura 3.** Generación eléctrica coincidente en tiempo real.

Fuente: CENACE, México 14 de diciembre 2018.

Finalmente, utilizando el *software* Plexus, que es el programa con que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) realiza el programa de obras e inversiones del sector eléctrico (POISE), y con

el cual el CFE controla y regula su expansión de proyectos, se realizó una prueba de un rebombero solar para vislumbrar cómo hubiera impactado en el sistema de Baja California para el 2017 (este año fue seleccionado al azar, así como la región), y contar con un soporte técnico del beneficio en tiempo real de esta tecnología (Figura 4).



**Figura 4.** Resultado del impacto de un rebombero solar en el sistema eléctrico Baja California Norte, en México (Plexus).

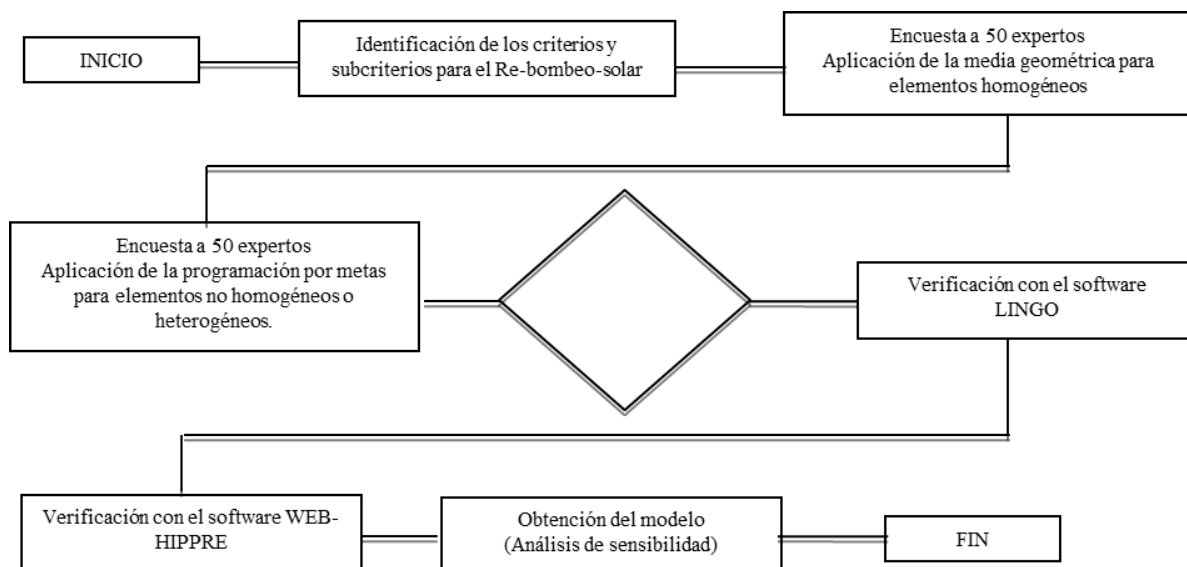
Este sistema no tiene déficit. No obstante, se necesitó demostrar de forma determinística el impacto de progreso económico, y con el nuevo acuerdo Estados Unidos-México-Canadá (AEUAMC) resultaba interesante ver cómo minimizar costos y evitar pérdidas en cuanto a generación eléctrica se refiere para México, porque el sistema eléctrico de Baja California norte compra potencia a los Estados Unidos de América como medida de regulación de la red de transmisión eléctrica. Para tal fin, se valoró un rebombero solar de 50 MW de capacidad instalada como rebombero y 30 MW de capacidad instalada de paneles solares flotantes; entonces, con base en la Figura 4, se puede observar que al incluir este rebombero solar el *software* Plexus (línea azul) minimiza los costos de generación, y cuando se presenta una fluctuante carga que se traduce en sobres costos, la energía solar en horas base mitigaría esos impactos y garantizaría tarifas bajas.

Por otro lado, se tomó los ocho primeros días de 2017 para poder mediar en tiempo real la posibilidad de garantizar, en una semana, un control del costo de generación (línea naranja). En este sentido, la curva de la Figura 4 muestra que es posible cubrir demandas inesperadas de energía eléctrica que con el nuevo AEUAMC se convertirían en sobre costos que el usuario tendría que cubrir. Es así como, al insertar un rebombero solar con la capacidad nominal referida, se presentó una curva que minimiza en ciertos momentos un descontrol de abasto eléctrico entre la generación eléctrica y la carga (demanda), lo cual es un resultado positivo porque controlando estos dos factores se garantiza un servicio eléctrico asequible.

Con base en este resultado determinístico, se contó con la certeza para poder conformar una encuesta bajo parámetros medidos que le brindarían consistencia y coherencia al aspecto económico, de cómo se hubiera comportado un sistema eléctrico en México (en este caso el sistema eléctrico de Baja California en el 2017), particularmente en ahorros económicos, de haber contado con una tecnología como la que se propone.

Teniendo el soporte que haría a la encuesta consistente con la opinión de expertos, se procedió a elaborarla con un sustento basado en que el MEM no brinda participación a los sistemas híbridos, pero bajo el amparo del problema aún minúsculo en el comportamiento del CENACE en tiempo real y la curva de pato en otros mercados eléctricos internacionales, se piensa en el almacenamiento de energía eléctrica en México como una necesidad, teniendo, además, el impulso de las políticas y compromisos ambientales ante la Organización Mundial de las Naciones Unidas (ONU), y en particular con la expedición de la Ley General de Cambio Climático promulgada en el 2012. Esta última impulsa la creación de nuevas fuentes de energía limpia, entendiendo esto como aquellas tecnologías destinadas a la producción de energía eléctrica que no produzcan ( $\text{CO}_2$ ).

Es así como la encuesta se estructuró haciendo del conocimiento a los expertos la inclinación excesiva del MEM hacia las energías solar y eólica, pero, además, las consecuencias que de esto puedan acarrear si el MEM no tiene un respaldo de almacenamiento eléctrico. Con apego a lo anterior, se tuvo certeza para poder hacer la encuesta utilizando el método AHP [4], pero aplicado a las energías renovables [5]. Luego, entonces, se seleccionó un universo de 50 expertos distribuidos en las especialidades que impulsan la sustentabilidad en México, porque era importante que la tecnología de rebombeo solar fuera considerada impulsora de desarrollo sustentable y cumplir con la normativa de ley ambiental vigente en México. Los expertos encuestados fueron especialistas en aspectos sociales, ambientales, económicos, políticos y técnicos para determinar el factor con mayor incidencia sustentable y presentarlo en el MEM con el fin de alcanzar la aprobación de esta nueva tecnología y, con ella, generar energía eléctrica en el SEN (Figura 5).



**Figura 5.** Procedimiento para la toma de decisiones de incluir en el MEM un rebombeo solar.

Una vez que se identificaron los criterios sociales, ambientales, económicos, políticos y técnicos, se establecieron los subcriterios de cada uno de ellos: (a) criterio social, recreación y turismo, venta de certificados de energía limpia, reasentamientos humanos, aceptación social, generación de empleos, comunidades y medios de sustento; (b) criterio ambiental, impacto en el ecosistema, emisiones de CO<sub>2</sub> por KWh, hectáreas ocupadas por KWh; (c) criterio económico, precio de energía, viabilidad económica, costo de operación y mantenimiento, costo de generación KWh, costo de construcción del KWh; (d) criterio técnico, confiabilidad, madurez tecnológica, eficiencia energética, tiempo de vida, tiempo de construcción, disponibilidad de recursos, recurso humano experto, disponibilidad para su transmisión, y (e) criterio político, seguridad energética y beneficios económicos.

Se siguieron los esquemas de [5] y, posteriormente, el método de consistencia [4] para desechar aquellas encuestas que no alcancen el orden que establezca el método de consistencia de matrices pareadas, donde:

$$CI = \frac{\lambda_{Max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$CI$  es el coeficiente de consistencia, una medida de desviación de la consistencia de la matriz derivado de la comparación de pares. Calculando el máximo valor propio de la matriz de comparaciones es como se obtiene dicho coeficiente. En casos donde pueda existir inconsistencia en los juicios el valor propio tiende a ser mayor que el rango de la matriz; para ello,  $\lambda$  es el máximo valor propio de la matriz de comparaciones a pares y  $n$  es el número de criterios. Para ejemplificar este cálculo, se presentan los folios 014 y 015 correspondientes al criterio técnico (Figura 6).

| Folio:014                          |               |                     |                       |                |                        |                            |                        |                                    |       |        |         |         |        |        |  |
|------------------------------------|---------------|---------------------|-----------------------|----------------|------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------------------|-------|--------|---------|---------|--------|--------|--|
|                                    | Confiabilidad | Madurez Tecnológica | Eficiencia energética | Tiempo de vida | Tiempo de construcción | Disponibilidad de recursos | Recurso humano experto | Disponibilidad para su transmisión |       |        |         |         |        |        |  |
| Confiabilidad                      | 1             | 1                   | 1/2                   | 1/2            | 5                      | 3                          | 3                      | 4                                  | 0.159 | 1.4165 | 8.9240  | 8.9240  | 0.1320 | 0.0943 |  |
| Madurez Tecnológica                | 1             | 1                   | 1/3                   | 3              | 4                      | 3                          | 4                      | 3                                  | 0.184 | 1.6405 | 8.9240  |         |        |        |  |
| Eficiencia energética              | 2             | 3                   | 1                     | 3              | 5                      | 5                          | 4                      | 3                                  | 0.282 | 2.5189 | 8.9240  |         |        |        |  |
| Tiempo de vida                     | 2             | 1/3                 | 1/3                   | 1              | 3                      | 3                          | 3                      | 2                                  | 0.138 | 1.2305 | 8.9240  |         |        |        |  |
| Tiempo de construcción             | 1/5           | 1/4                 | 1/5                   | 1/3            | 1                      | 1/3                        | 1/4                    | 1/4                                | 0.030 | 0.2675 | 8.9240  |         |        |        |  |
| Disponibilidad de recursos         | 1/3           | 1/3                 | 1/5                   | 1/3            | 3                      | 1                          | 4                      | 1/3                                | 0.067 | 0.5974 | 8.9240  |         |        |        |  |
| Recurso humano experto             | 1/3           | 1/4                 | 1/4                   | 1/3            | 4                      | 1/4                        | 1                      | 1/3                                | 0.048 | 0.4310 | 8.9240  |         |        |        |  |
| Disponibilidad para su transmisión | 1/4           | 1/3                 | 1/3                   | 1/2            | 4                      | 3                          | 3                      | 1                                  | 0.092 | 0.8217 | 8.9240  |         |        |        |  |
| Folio:015                          |               |                     |                       |                |                        |                            |                        |                                    |       |        |         |         |        |        |  |
|                                    | Confiabilidad | Madurez Tecnológica | Eficiencia energética | Tiempo de vida | Tiempo de construcción | Disponibilidad de recursos | Recurso humano experto | Disponibilidad para su transmisión |       |        |         |         |        |        |  |
| Confiabilidad                      | 1             | 1/8                 | 1/8                   | 1/8            | 1/8                    | 1/9                        | 1/9                    | 1/7                                | 0.008 | 0.1296 | 16.0980 | 16.0980 | 1.1569 | 0.8263 |  |
| Madurez Tecnológica                | 8             | 1                   | 8                     | 8              | 7                      | 8                          | 7                      | 7                                  | 0.331 | 5.3284 | 16.0979 |         |        |        |  |
| Eficiencia energética              | 8             | 1/8                 | 1                     | 1/7            | 1/7                    | 7                          | 1/7                    | 7                                  | 0.089 | 1.4256 | 16.0980 |         |        |        |  |
| Tiempo de vida                     | 8             | 1/8                 | 7                     | 1              | 1/7                    | 8                          | 1                      | 1/7                                | 0.115 | 1.8484 | 16.0976 |         |        |        |  |
| Tiempo de construcción             | 8             | 1/7                 | 7                     | 7              | 1                      | 1/6                        | 1/7                    | 7                                  | 0.134 | 2.1617 | 16.0980 |         |        |        |  |
| Disponibilidad de recursos         | 9             | 1/8                 | 1/7                   | 1/8            | 6                      | 1                          | 1                      | 7                                  | 0.103 | 1.6578 | 16.0983 |         |        |        |  |
| Recurso humano experto             | 9             | 1/7                 | 7                     | 1              | 7                      | 1                          | 1                      | 7                                  | 0.156 | 2.5057 | 16.0981 |         |        |        |  |
| Disponibilidad para su transmisión | 7             | 1/7                 | 1/7                   | 7              | 1/7                    | 1/7                        | 1/7                    | 1                                  | 0.065 | 1.0409 | 16.0980 |         |        |        |  |

**Figura 6.** Consistencia de la encuesta para integrar en el MEM un rebombeo solar.

Por lo anterior, se puede apreciar cómo se realizó la simetría (importancia número entero, lo simétrico, es decir, menos importante es fracción) a través de una matriz diagonal en orden de importancia ante las respuestas de expertos. En el folio 014 se obtuvo un  $CI$  menor a 1, con lo que, de acuerdo con [4], se determina que tiene consistencia. En el caso del folio 015, se determinó un  $CI$  mayor a la unidad, por lo que se rechaza, no tiene consistencia al no tener una lógica establecida al responder la encuesta. De esta forma se analizaron las 50 encuestas.

Al combinar este estudio en un método técnico-administrativo, se entrevistaron expertos de diversas ramas a cada criterio (sociales, ambientales, económicas, políticas y técnicas); por tal motivo, se tuvo un procedimiento de evaluación [6] para analizar elementos homogéneos y no homogéneos (heterogéneos). Entonces, se necesita determinar un modelo de sensibilidad para la toma de decisiones con la finalidad de que, a través de la opinión de expertos, este estudio pueda ser un instrumento técnico-administrativo que impulse la viabilidad de un sistema híbrido tipo rebombeo solar que pueda impactar positivamente el SEN.

Existen varias formas de llegar a un modelo para el fin que se persigue [4], [6]; para ello, se procedió con la siguiente metodología para cada experto en su rama, es decir, elementos homogéneos (Figura 7).

Ejemplificando el procedimiento, se tomó el folio 001. Se considera la matriz de elementos pareados (orden de importancia, paso 1) de cada experto encuestado, se normaliza hasta encontrar el CI (coeficiente de consistencia, paso 5). Posteriormente, se determina el vector prioridad a través de un proceso iterativo (EI-E0), hasta tener un vector con elementos menores a la unidad, ese es el vector prioridad. Este procedimiento es para todos y cada una de las matrices de los expertos encuestados [6] (Figura 8).

Una vez que se obtuvo el vector propio, se afecta la matriz de cada encuestado con una media geométrica, ello en favor de tener el índice de consistencia [4] para elementos homogéneos y el valor de  $n$  con las características propias de la matriz de cada encuesta de expertos; para este caso, son cinco elementos homogéneos. Por tal motivo, al normalizar las matrices de los encuestados el parámetro 0.10 se considera una consistencia razonable.

Posterior a la conclusión del proceso de matrices pareadas para criterios homogéneos, se procede a la parte de análisis [4]. Cabe señalar que durante este análisis un subcriterio de desviación será no deseado cuando alcance su valor más pequeño, es decir, cero, ya que los expertos encuestados pasan de su área de dominio (homogéneo) al campo cualitativo de las otras especialidades al responder la parte de los subcriterios (heterogéneo o no homogéneo) y la desviación típica de estos (varianza) durante el proceso de análisis debe minimizarse.

De ahí se tomará la decisión, siguiendo la opinión de expertos, de qué subcriterio será el más útil. Esta técnica es necesaria como apoyo al método de análisis de jerarquías para la toma de decisiones (AHP, por sus siglas en inglés), porque este último no garantiza por sí mismo a través de la media geométrica el valor óptimo, por no tener un grupo de expertos no homogéneo en los datos base; este es el motivo por el cual la programación por metas debe minimizar la desviación de los datos base, la desviación provocada por la media geométrica del AHP, el subcriterio máximo y la varianza mínima [4].

Derivado de lo anterior, se recurrió al software Lingo [7], [8], y una vez obtenidas las ponderaciones [4], se procedió a comparar estas con los resultados mediante Web-Hipre para tener certeza. El software Web-Hipre es una herramienta necesaria para jerarquizar y generalizar de forma más rápida la toma de decisiones y crear el árbol de decisión [8], [9].

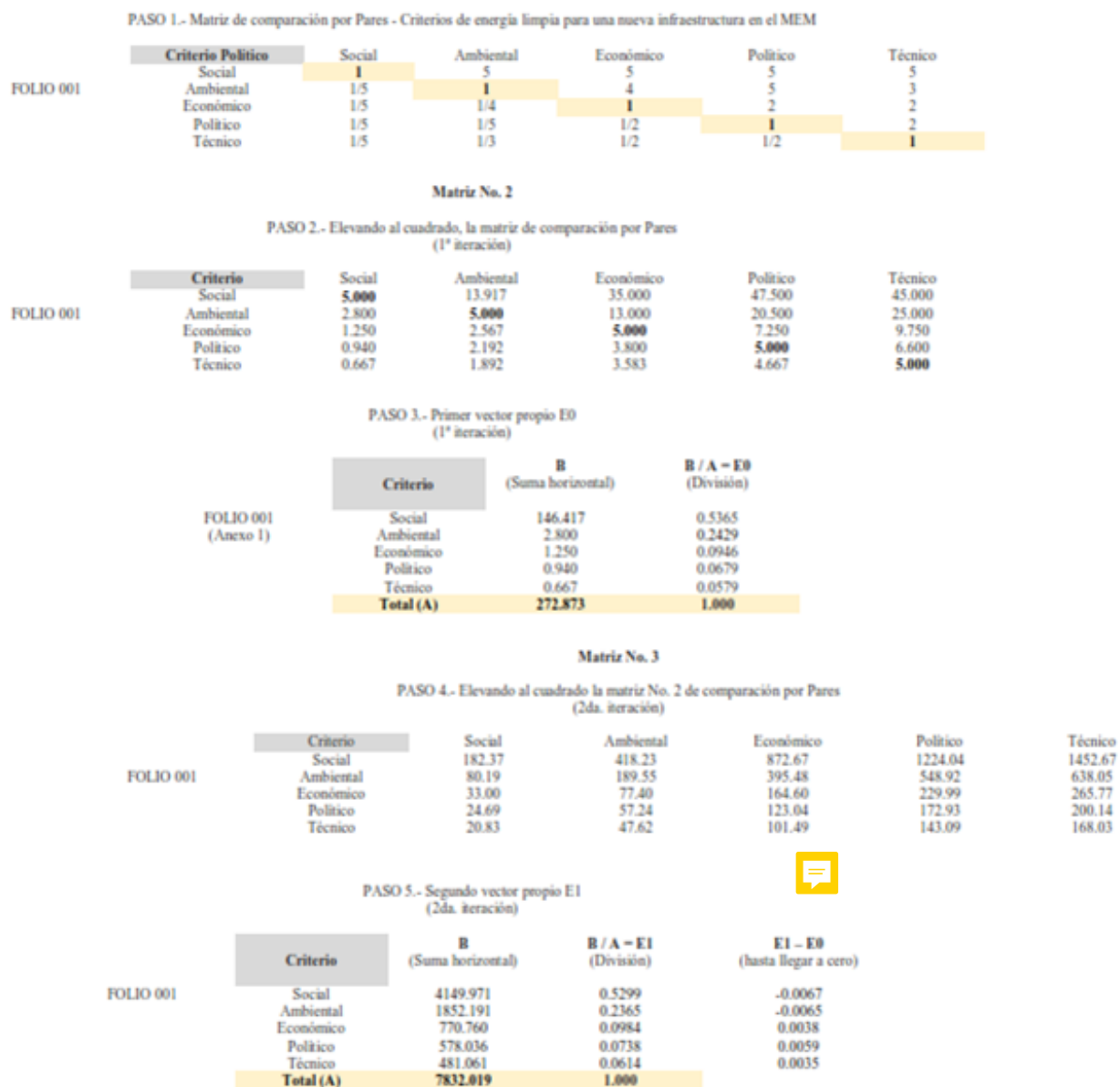
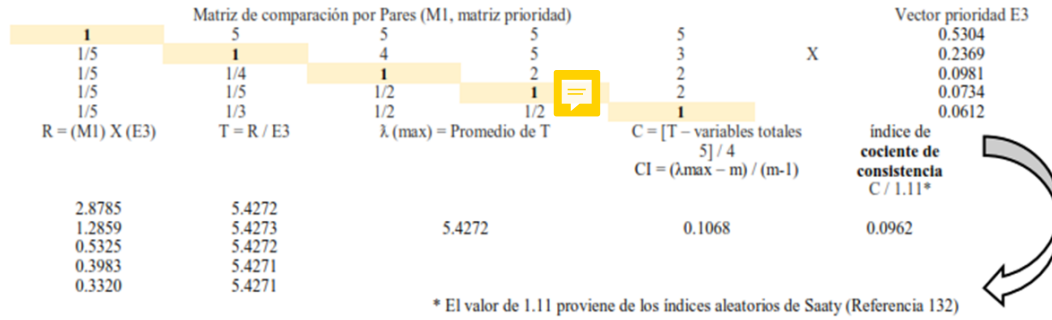


Figura 7. Metodología para la obtención del modelo de sensibilidad.

Para el caso de elementos no homogéneos (heterogéneos) se generalizó la toma de decisiones con base en un árbol de decisión y metodologías probabilísticas (Web-Hipre), pero en este procedimiento se tendría un proceso largo y con un sesgo de error importante [10], ya que el árbol de decisión de criterios y subcriterios de la Figura 9 lleva respuestas cualitativas, es decir, un peso multiatributo de los vectores prioridad [4], y es coherente porque las respuestas con que se abastecería el Web-Hipre provienen de los expertos encuestados dentro y fuera de su especialidad. Este error puede desviar el aspecto prioritario para proponer el rebombeo solar ante el MEM.



Valores que corresponden al Índice aleatorio IA, del método AHP.

| "n" elementos que se comparan       | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|-------------------------------------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Índice aleatorio de consistencia AI | 0 | 0 | 0.58 | 0.89 | 1.11 | 1.24 | 1.32 | 1.40 | 1.45 | 1.49 |

Nota: Los valores proviene de la Fórmula  $IA = 1.98 \times (n - 2) / n$

Donde,

$CI / IA \leq 0.10$  se considera consistencia razonable

$CI / IA > 0.10$  se considera una inconsistencia

Figura 8. Ejemplo del procedimiento.

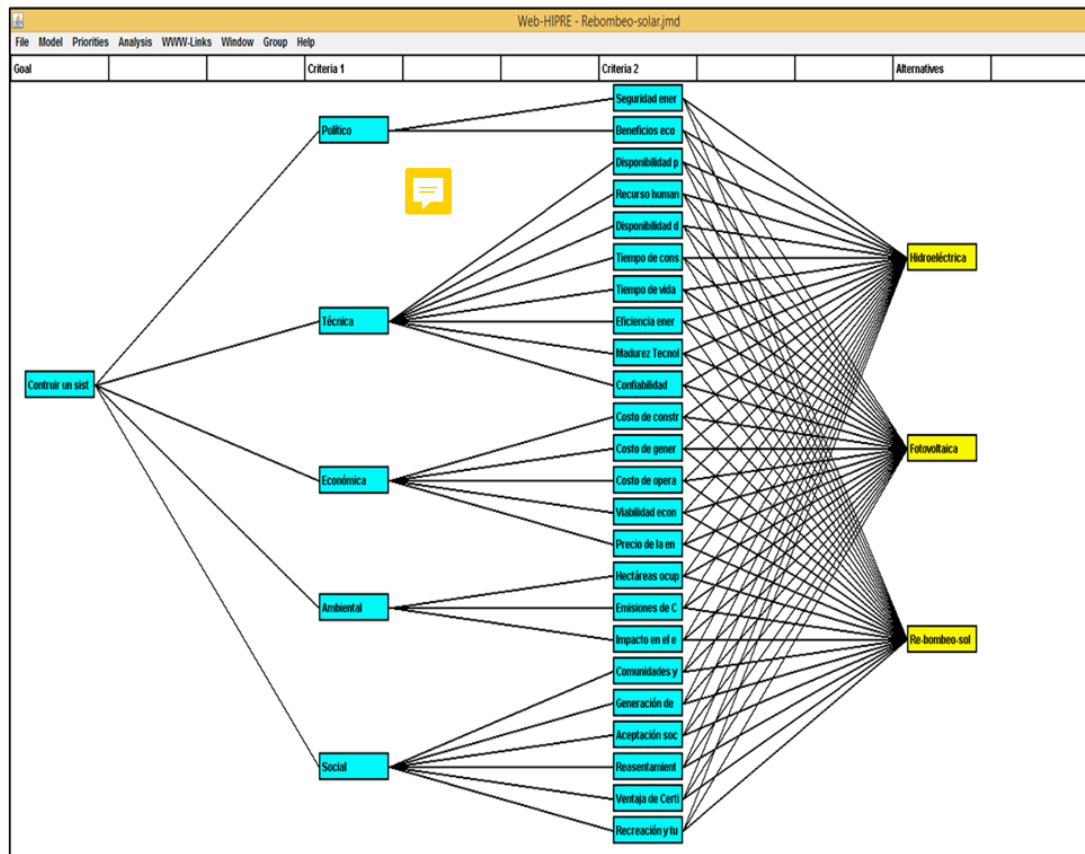


Figura 9. Árbol de decisión para determinar el aspecto prioridad de incluir en el MEM, un rebombio solar.

Ahora bien, conociendo la limitante del Web-Hipre, se recurrió a la utilización del *software* Lingo (*Linear Generalize Optimizer*) [7]. Este *software* es una herramienta simple que formula problemas lineales y no lineales, los resuelve rápidamente y los analiza con una solución, es decir, optimiza el mejor resultado de un análisis de  $n$  variables, brinda la opción más alta y el dato más bajo (que para este estudio es lo que se busca lo más cercano a cero) con rangos de operación mínimos que debilitan la aparición de un error importante. Entonces, se procedió a vaciar los datos en el *software* Lingo y, en consecuencia, se comparó el modelo de sensibilidad del Web-Hipre para estar en condiciones de conocer el criterio de mayor impacto que produciría la tecnología de un rebombero solar en el MEM con apego a la opinión de expertos.

### 3. Resultados

Luego de alimentar el *software* Lingo con las matrices pareadas derivadas de la opinión de expertos, se obtuvieron los resultados de la consistencia de subcriterios para elementos no homogéneos (Figura 10).

$$\begin{aligned} \min = & (1-1) * D + 1 * (n_{11} + p_{11} + n_{12} + p_{12} + n_{13} + p_{13} + n_{14} + p_{14} + n_{15} + p_{15} + n_{21} + p_{21} + n_{22} + p_{22} + n_{23} \\ & + p_{23} + n_{24} + p_{24} + n_{25} + p_{25} + n_{31} + p_{31} + n_{32} + p_{32} + n_{33} + p_{33} + n_{34} + p_{34} + n_{35} + p_{35} + n_{41} + p_{41} + n_{42} \\ & + p_{42} + n_{43} + p_{43} + n_{44} + p_{44} + n_{45} + p_{45} + n_{51} + p_{51} + n_{52} + p_{52} + n_{53} + p_{53} + n_{54} + p_{54} + n_{55} + p_{55}); \end{aligned}$$

| Variable | Value         | Dual Price |
|----------|---------------|------------|
| N34      | 0.1196000     | 0.000000   |
| P34      | 0.000000      | 10.00000   |
| N35      | 0.000000      | 10.00000   |
| P35      | 0.3980000E-01 | 0.000000   |
| N41      | 0.000000      | 0.000000   |
| P41      | 0.5310000E-01 | 0.000000   |
| N42      | 0.4250000E-02 | 0.000000   |
| P42      | 0.7195000E-01 | 0.000000   |
| N43      | 0.1595000     | 0.000000   |
| P43      | 0.3250000E-01 | 0.000000   |
| N44      | 0.8835000E-01 | 0.000000   |
| P44      | 0.3125000E-01 | 0.000000   |
| N45      | 0.6500000E-03 | 0.000000   |
| P45      | 0.3915000E-01 | 0.000000   |
| N51      | 0.1750000E-01 | 0.000000   |
| P51      | 0.3560000E-01 | 0.000000   |
| N52      | 0.5065000E-01 | 0.000000   |
| P52      | 0.2555000E-01 | 0.000000   |
| N53      | 0.1920000     | 0.000000   |
| P53      | 0.000000      | 0.000000   |
| N54      | 0.6530000E-01 | 0.000000   |
| P54      | 0.5430000E-01 | 0.000000   |
| N55      | 0.3505000E-01 | 0.000000   |
| P55      | 0.4750000E-02 | 0.000000   |
| W1       | 0.3057000     | 0.000000   |
| W2       | 0.3067000     | 0.000000   |
| W3       | 0.1475000     | 0.000000   |
| W4       | 0.1607000     | 0.000000   |
| W5       | 0.8290000E-01 | 0.000000   |
| Z        | 2.403500      | 0.000000   |
| D1       | 0.5310000E-01 | 0.000000   |
| D2       | 0.7620000E-01 | 0.000000   |
| D3       | 0.1920000     | 0.000000   |
| D4       | 0.1196000     | 0.000000   |
| D5       | 0.3980000E-01 | 0.000000   |

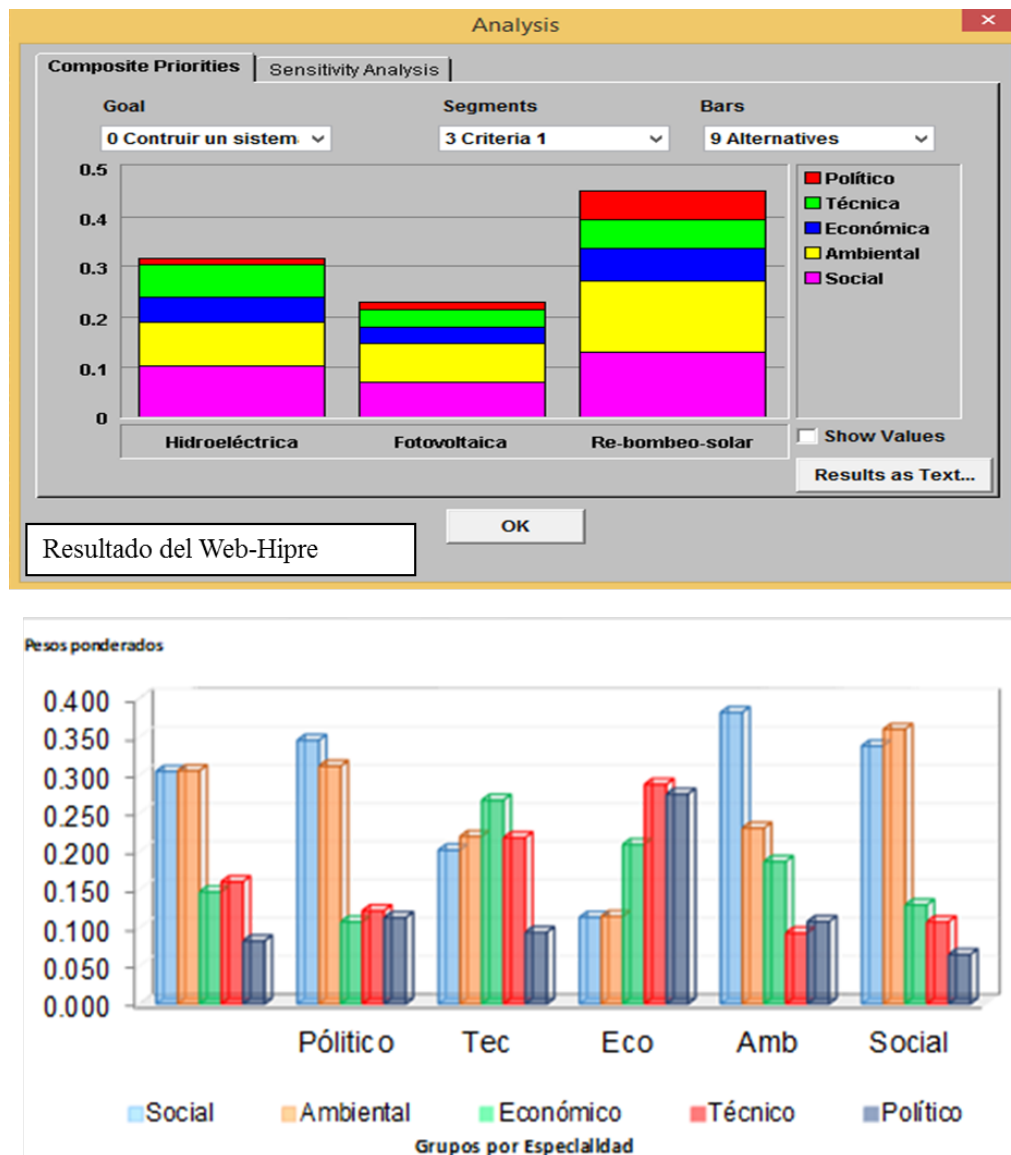
  

| Row | Slack or Surplus | Dual Price |
|-----|------------------|------------|
| 1   | 2.403500         | -1.000000  |
| 2   | 0.1389000        | 0.000000   |
| 3   | 0.1158000        | 0.000000   |
| 4   | 0.000000         | 0.000000   |
| 5   | 0.7240000E-01    | 0.000000   |
| 6   | 0.1522000        | 0.000000   |
| 7   | 0.1389000        | 0.000000   |
| 8   | 0.1158000        | 0.000000   |
| 9   | 0.000000         | 0.000000   |
| 10  | 0.7240000E-01    | 0.000000   |
| 11  | 0.1522000        | 0.000000   |
| 12  | 0.1389000        | 0.000000   |

**Figura 10.** Ponderaciones de consistencia, obtenidas del *software* Lingo para elementos no homogéneos de este estudio.

Por su parte, el Web-Hipre proporciona una aproximación basada en la teoría de valor multiatributo (MAVT) como técnica de apoyo al método AHP para modelar las preferencias individuales de

los decisores y tener la agregación de modelos individuales en un modelo de grupo no homogéneo, lo que convierte a esta herramienta en favorable para utilizarse a lo largo de esta investigación para el fin que persigue [4], [10] (Figura 11).



**Figura 11.** Ponderaciones de consistencia, obtenidas del software WebHipe para elementos homogéneos y heterogéneos de este estudio.

Con los datos normalizados provenientes de la opinión de expertos para elementos homogéneos (dentro de su especialidad respectiva), se obtuvo como resultado que, dentro de las tres opciones analizadas en el árbol de decisión, la tecnología propuesta es la mejor opción sustentable para el MEM.

Para la parte heterogénea de análisis, el *software* Lingo arroja un resultado de ponderación de 0.306 aproximadamente para la parte del criterio ambiental, ligeramente mayor en pesos de decisión con respecto a los del criterio social, que alcanzó un valor en ponderación de 0.305. Al

comparar estos valores con el modelo de sensibilidad del *software* Web-Hipre, los resultados alcanzan para la parte del criterio ambiental una ponderación de 0.452 dentro de sus subcriterios y una ponderación en peso de 0.387 del criterio social, teniendo un margen diminuto en diferencia.

## 4. Conclusiones

La curva de pato es un fenómeno que se ha presentado en la cobertura de energía eléctrica en México, se necesita construir infraestructura que respalde el SEN ante una fluctuante demanda de energía eléctrica y se eviten sobrecostos que los usuarios en el futuro estarán obligados a pagar. Con un rebombear solar se regulan los altos disparos de los costos derivados de necesidad de generación eléctrica adicional en un momento determinado y la carga necesaria para garantizar un despacho eléctrico firme y constante. El *software* Lingo y Web-Hipre (para medir resultados con precisión de variables discretas y continuas) dieron como resultado que México, desde el punto de vista ambiental y social, necesita una nueva tecnología que respalde el MEM, y esa opción es un rebombear solar.

Los expertos en materia social, ambiental, económica, técnica y política dentro del sector energético en México dictaminan, desde un punto de vista homogéneo (únicamente opinando desde el punto de vista de su especialidad), que un rebombear solar es la mejor opción sustentable para el MEM. Además de ello, dictaminan (opinando en cada subcriterio de criterios distintos a su especialidad acerca de esta tecnología) que el mayor impacto positivo de un rebombear solar en el MEM, será la parte ambiental, también que el segundo mayor impacto positivo será la parte social.

Se midió con el uso del *software* Plexus que un rebombear solar impacta positivamente el SEN, y más con el crecimiento en participación de la energía intermitente como la energía solar y la energía eólica porque evitará la intermitencia eléctrica al controlar generación y carga.

El método AHP de Saaty [4] es un excelente instrumento para la toma de decisiones, pero debe ser optimizado con programas de mayor precisión ante subcriterios multivariantes para acotar el sesgo de error típico de la desviación estándar. La combinación de los programas Lingo y Web-Hipre son una combinación técnicoadministrativa que optimiza la toma de decisiones del método AHP, estos garantizan un sesgo de error diminuto.

Este estudio comprueba que es posible llevar a la toma de decisiones tecnologías dentro de políticas energéticas sin necesidad de un modelo físico, pero sí con una investigación de operaciones desde un punto de vista cualitativo (multiatributo) y posteriormente, un método cualitativo (media geométrica, programación por metas) con ayuda de programas como el Lingo y el Web-Hipre.

## Referencias

- [1] A. Beltrán, H. Gracia-León, D. Rodríguez-Urrego, and L. Rodríguez-Urrego, "Design and calculation of a hybrid solar-hydraulic power station in Gran Canaria", *Dyna*, vol. 85, no. 206, pp. 250-257, 2018. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.70573> ↑210
- [2] A. Jain, A. Chakraborty, S. K. Gupta, K. K. Kandpal and N. Shukla, "Evaluating Pumped Hydro storage technology in the era of renewable generation and ancillary Markets", *Water and Energy International*, vol. 62, no. 1, pp. 33-38, 2019. ↑211

- [3] H. Zhang, Z. Lu, W. Hu, Y. Wang, L. Dong and J. Zhang, “Coordinated optimal operation of hydro–wind–solar integrated systems”, *Applied Energy*, vol. 242, pp. 883-896, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.064> ↑211
- [4] T. Saaty, *Toma de decisiones para líderes: el proceso analítico jerárquico en la toma de decisiones en un mundo complejo*. Pittsburgh: RWS Publications, 1997. ↑211, 215, 216, 217, 218, 221, 222
- [5] F. Cavallaro, “Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies”, *Renewable Energy*, vol. 34, no. 7, pp. 1678-1685, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.034> ↑215, 216
- [6] N. Gunantara, N. Putra, N and I. D. Nyoman, “The Characteristics of Metaheuristic Method in Selection of Path Pairs on Multicriteria”, *Journal of Computer Networks and Communications*, no. 4, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/7983583> ↑217
- [7] I. Cahyadi and I. D. Anna, “A Multi-Criteria Model for Marketing Strategy Selection for Batik Fashion Creative Industry in Indonesia”, *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, vol. 5, no. 1, 2019. <https://doi.org/10.31695/IJASRE.2019.33071> ↑217, 220
- [8] T. Kaya and C. Kahraman, “Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul” *Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 2517-2527, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.051> ↑217
- [9] J. Watróbski, J. Jankowski, P. Ziemba, A. Karczmarczyk and M. Zioto, “Generalised framework for multi-criteria method selection.” *Omega*, vol. 86, pp. 107-124, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.07.004> ↑217
- [10] J. G. Pope, T. J. Hegland, M. Ballesteros, K. N. Nielsen and M. Rahikainen, “Steps to unlocking ecosystem based fisheries management: Towards displaying the N dimensional potato” *Fisheries research*, vol. 209, pp. 117-128, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2018.07.023> ↑218, 221

---

### Leonardo de Jesús Ramos Gutiérrez

Jefe de Departamento en la Subgerencia de Anteproyectos Hidroeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, Funcionario Público) Candidato a Doctor en Ingeniería por la Universidad Anáhuac México, Maestro en Administración de la Construcción, por la Universidad Panamericana Campus Guadalajara, Ingeniero Civil por la Universidad Nacional Autónoma de México. Especialista en innovación eléctrica a base de recursos renovables, conferencista a nivel Nacional e Internacional y ganador de varios reconocimientos por trascendencia académica así como profesional en la rama de la hidráulica en México.

Correo electrónico: leonardo.ramosg@cfe.mx

---

### Manuel Montenegro Fragoso

Ingeniero Civil por la UAG, Maestría en Ingeniería Hidráulica por la UNAM y Doctor en Ingeniería por la UNAM. Miembro de la IAHR, ASCE, AMH y CAA. Líneas de investigación: Hidroeléctricas, Agua, Crecimiento, Educación y Sostenibilidad. Actualmente Profesor Investigador de la Universidad Panamericana y Conferencista Internacional.

Correo electrónico: mmontene@up.edu.mx