

Comparación de enfoques en la construcción de un indicador de eficiencia para generadores eléctricos en sistemas de transmisión: DEA-IC y Unweighted TOPSIS

Gustavo Schweickardt¹[0000-0002-0843-2946] y Omar Faure²[0009-0001-3099-0119]

¹ CONICET-UTN Facultad Regional Concepción del Uruguay, Argentina
gustavoschweickardt@conicet.gov.ar

² UTN Facultad Regional Concepción del Uruguay, Argentina
ofaure@frcu.utn.ar

Resumen. En el estado del arte, son observados diversos métodos para definir la responsabilidad que los agentes generadores tienen en el uso de las redes de transmisión eléctrica. Se procura, con ello, asignar los costos de la red de transporte, bajo la forma de peaje de transmisión o costo de acceso a redes de transporte. Sin embargo, tales mecanismos no consideran la eficiencia que las unidades de generación exhiben conforme diferentes criterios bajo los cuales operan, vinculados a la sustentabilidad económica, energética y ambiental. Un indicador compuesto de eficiencia así concebido, puede reflejar incentivos basados en la renovabilidad de las fuentes primarias de energía empleadas, la eficiencia energética, las emisiones de gases equivalentes en CO₂, y la optimización de las inversiones en la instalación de cada central. En el presente trabajo son comparados dos enfoques para la construcción de tal indicador compuesto, considerando cinco criterios - como indicadores simples- en aras de la sustentabilidad procurada: el modelo DEA-IC y el método TOPSIS Unweighted. Se presentan los desarrollos teóricos pertinentes y sus aplicaciones, evaluando la sensibilidad y robustez del indicador compuesto obtenido, y se discuten los resultados para ser considerados como factores de eficiencia en un sistema con 22 unidades de generación.

Palabras clave: Eficiencia de Centrales de Generación, Indicadores Compuestos, DEA-IC, TOPSIS, Factores de Incentivo en los Costos de Acceso de Transmisión.

Comparison of approaches in the construction of an efficiency indicator for electricity generators in transmission systems: DEA-IC and Unweighted TOPSIS

Abstract. The In the state of the art, various methods are used to define the responsibility of generating agents in the use of electricity transmission networks. This seeks to assign transmission network costs, in the form of transmission tolls

or access costs to transmission networks. However, such mechanisms do not explicitly consider the efficiency that generating units exhibit according to the different criteria under which they operate, linked to economic, energy, and environmental sustainability. A composite efficiency indicator conceived in this way, can reflect incentives based on the renewability of the primary energy sources used, energy efficiency, CO₂ equivalent gas emissions, and the optimization of investments in the installation of each power plant. This paper compares two approaches to constructing such a composite indicator, considering five criteria—as simple indicators—for the sake of the desired sustainability: the DEA-IC model and the TOPSIS Unweighted method. The relevant theoretical developments and their applications are presented, evaluating the sensitivity and robustness of the composite indicator obtained, and discussing the results for consideration as efficiency factors in a system with 22 generating units.

Keywords: Power Generation Plant Efficiency, Composite Indicators, DEA-IC, TOPSIS, Incentive Factors in Transmission Access Costs.

1 Introducción

La Reforma en la Industria Eléctrica, caracterizada por una segmentación vertical de la cadena de producción de electricidad (generación-transmisión-distribución-comercialización), que tuvo lugar hace más de cuatro décadas (Schweickardt, 2012), introdujo modificaciones sustanciales en el abastecimiento eléctrico y su análisis económico, respecto del paradigma primigenio (verticalmente integrado). Entre ellas, se estableció, a partir del principio de libre acceso de terceros a las redes, un sistema de remuneración marginalista, para definir los cargos de acceso de los generadores a la red de transmisión. Este cargo de acceso, no puede resultar completamente sustentado por una remuneración marginal -diferencias de precios nodales de la red-, puesto que no alcanzarían a cubrirse la totalidad de los costos de transporte. Siguiendo a Schweickardt (2014), se cubren alrededor de un 20%-30%, y a esta remuneración se la refiere como ‘ingreso variable del transporte’ (IVT). Por ello se necesita de una remuneración adicional al IVT, denominada ‘cargo complementario’. Su cálculo se realiza por diversos métodos: ‘costo estampilla’, ‘áreas de influencia’ -utilizado en Argentina-, ‘participación proporcional’, ‘beneficiarios’, entre los más difundidos. El ‘costo estampilla’, el más simple, que se obtiene de dividir el costo total del transporte entre la potencia total generada o demandada por el sistema, proporciona una medida de ‘uso intensivo’ de la red. En el otro extremo, ‘áreas de influencia’ intenta introducir una remuneración complementaria de carácter marginal, como medida de ‘uso extensivo’ de las redes, para cada unidad de generación. Se sustenta en simular flujos incrementales de potencia en corriente continua (CC), y evaluar las variaciones de flujo CC imputables a cada generador en cada línea. Pero tiene algunos inconvenientes, fundamentalmente, la dependencia de los cargos complementarios resultantes, de la barra de referencia en la cual aplique el incremento (marginal) de demanda.

En las dos referencias citadas se proponen varios métodos de remuneración que no consideran la imposición regulatoria de preservar el IVT como componente necesaria, a la vez que se introduce la eficiencia de los generadores, mediante varios modelos de

análisis envolvente de datos (DEA). De modo que la propuesta aquí presentada, puede considerarse una superadora de las anteriores.

El punto central que se discute, pues continúa ausente en estado del arte, es la introducción de un factor de eficiencia para cada generador, conforme sus características, obtenido desde un índice compuesto a partir de un conjunto pertinente de subindicadores. En la bibliografía especializada, el empleo de indicadores compuestos puede consultarse en Benítez y Liern (2021), Liern et al. (2021), Bouslah et al. (2023), y López-García (2024), entre muchos otros. Para el modelo propuesto, se han considerado dos métodos a efectos de comparación: el DEA-IC (Zhou et al., 2007) y el Unweighted TOPSIS -UW-TOPSIS- (Benítez y Liern, 2021), con algunas variantes. El trabajo está organizado como sigue:

En la sección 2, son introducidos los métodos DEA-IC y Unweighted TOPSIS (UW-TOPSIS). En la sección 3, se desarrollan los elementos teóricos de la metodología propuesta, abordando, primero, los correspondientes a la construcción del índice compuesto de eficiencia y, luego, los requeridos para la obtención de los factores, que intervienen en la construcción del cargo de acceso a la red de transporte asignable a cada generador. En la sección 4, se aplica la metodología sobre un sistema basado en la red de prueba IEEE-24 barras, a la que se le ha agregado un generador más, suponiendo que, en cada barra de generación, existen acopladas dos unidades de generación, cuyas características son diferentes en términos de la construcción del indicador de eficiencia, computando 22 generadores. Se presentan y se discuten los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 5, se presentan las principales conclusiones del trabajo.

2 Métodos DEA-IC y Unweighted TOPSIS (UW-TOPSIS)

2.1 El Método DEA-IC

Este método, propuesto por Zhou et al. (2007), Zhou et al. (2021), presenta un enfoque basado en programación matemática, específicamente en programación lineal, cuyo objetivo estriba en la construcción de indicadores compuestos (ICs). Los mismos son definidos como ‘una agregación matemática de un conjunto de indicadores individuales (o simples, ISs) que miden conceptos multidimensionales pero que, por lo general, no tienen unidades de medida comunes’, definición muy apropiada en general, y en particular para los objetivos del presente trabajo.

Como estos autores subrayan, la utilidad de un IC va a depender, en gran medida, de los esquemas de ponderación y de agregación subyacentes, aplicados sobre los indicadores simples (ISs) para su composición. De manera que el estudio sobre la ponderación ISs y su posterior agregación, ‘resulta siempre un tema controvertido’, en el campo de la construcción de ICs’. El esquema de ponderación, define la determinación de los pesos para los subindicadores (ISs), que luego se someten a un esquema de agregación, formando, finalmente, el IC buscado. El esquema de ponderación puede ser subjetivo u objetivo. En el primer caso, el problema está en disponer del ‘juicio de expertos’ quienes coincidan en la importancia que tendrá cada IS en la etapa de agregación, asignándose el mismo peso en casos de desacuerdo o ausencia de los mismos. Además, tales pesos serán iguales para todas las entidades en evaluación (en el caso de este trabajo, los 22 generadores), lo cual implica un inconveniente puesto que ‘no todas las

entidades que se van a evaluar, acordarán con un supuesto de pesos iguales', ya que cada una de ellas tiene sus propias características y/o preferencias.

Por tal motivo, y a modo de síntesis, habida cuenta de la profusa literatura existente en este campo, los autores destacan dos aspectos en su propuesta:

1.- Al basarse en técnica DEA (*Data Envelopment Analysis* – Análisis Envoltente de Datos), se tiene un esquema de ponderación objetivo, ya que los pesos de los ISs son calculados mediante un proceso de optimización.

2.- Las tareas de ponderación y agregación se realizan al mismo tiempo.

Este método será aquí referido como DEA-IC. El modelo propuesto para la construcción del IC, requiere tres pasos: dos modelos de programación lineal (primero y segundo pasos) y una ponderación que combina los mismos para componer, finalmente, el IC (tercer paso). El enfoque adopta, entonces, un procedimiento o esquema de agregación lineal (podría ser no lineal, considerando la existencia de una gran variedad de modelos de eficiencia similares a DEA, que no son lineales, ver Mesa y Segura (2014)).

El esquema de ponderación tiene la misma estructura del método de ponderación simple, SAW - *Simple Additive Weighting* –, con la diferencia de que los pesos SAW son fijos y exógenos, mientras que los del enfoque propuesto son variables para cada entidad y endógenos. Todos los subindicadores son de 'beneficio' – modelo 'cuanto más mejor'-. En el caso que algún subindicador sea de 'costo', debe ser transformado en uno de 'Beneficio'.

Paso 1: Modelo (1). Se consideran m ISs o subindicadores, y n entidades, I_{ij} , i en $[1, n]$, j en $[1, m]$. Resolviendo repetidamente, n veces, una para cada entidad, se obtiene un conjunto de índices, $\{II_1, II_2 \dots II_m\}$, correspondientes a sendas entidades. w_{ij}^l , es el peso del indicador j , asignado a la entidad i , en el agregado de su índice resultante, II_i :

$$FO \rightarrow II_i = \text{Max} \sum_{j=1}^n w_{ij}^l I_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n w_{ij}^l I_{kj} &\leq 1, \quad k = 1, 2, \dots, m \\ w_{ij}^l &\geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

Se trata de un modelo DEA multiplicador, de maximización de eficiencia, con salidas múltiples y entradas constantes. Mide 'cuán lejos' está la entidad evaluada de la entidad de mejor práctica, 'bajo los mejores pesos posibles' (desde aquí la ' l ' en II_i).

Si sólo fuese considerado el modelo (1) en la construcción del IC, se tendrían dos inconvenientes: a) si una entidad tuviese un valor para determinado subindicador, que domina a las otras entidades, esta entidad siempre obtendrá una puntuación de 1, inclusive teniendo valores muy pobres en los otros subindicadores (que pueden ser más importantes); b) el modelo (1) por sí mismo, puede conducir a la situación en la que una gran cantidad de entidades tengan una puntuación de desempeño de 1, y la clasificación posterior entre ellas resulte difícil. Es decir que, por sí mismo, carece de 'poder de discriminación'. Para resolver estos dos inconvenientes, los autores introducen un segundo modelo de programación lineal.

Paso 2: Modelo (2). Al resolver repetidamente, se obtiene un conjunto de índices $\{cI_1, cI_2 \dots cI_m\}$ correspondientes a sendas entidades. w_{ij}^c , es el peso del indicador j , asignado a la entidad i , en el agregado de su índice resultante, cI_i :

$$FO \rightarrow cI_i = \text{Min} \sum_{j=1}^n w_{ij}^c I_{ij} \quad (3)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n w_{ij}^c I_{kj} &\geq 1, \quad k = 1, 2, \dots, m \\ w_{ij}^c &\geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4)$$

Este modelo mide ‘cuán cerca está la entidad evaluada de la entidad de peor práctica’, bajo ‘los peores pesos posibles’ (desde aquí la ‘c’ en cI_i).

Paso 3: Modelo (3). Considerando conjuntamente los modelos (1) y (2), son integrados aspectos complementarios de la eficiencia para cada entidad, confiriéndole al IC, un mayor poder de discriminación. El índice compuesto, IC_i , resulta, entonces:

$$IC_i(\lambda) = \lambda \cdot \frac{II_i - II^-}{II^+ - II^-} + (1 - \lambda) \cdot \frac{cI_i - cI^-}{cI^+ - cI^-} \quad (5)$$

Donde: $\{II_i, II^+, II^-\}$ e $\{cI_i, cI^+, cI^-\}$, son los valores del índice i -ésimo, su máximo y su mínimo, entre las n entidades, obtenidos para los modelos (1) y (2), respectivamente. y λ ($0 \leq \lambda \leq 1$) es un parámetro de ajuste de la participación de los índices II_i , e cI_i , en IC_i . Se utiliza una normalización en el rango mínimo-máximo de fI_i y cI_i , a los efectos de permitir su comparabilidad en el intervalo $[0, 1]$.

Un punto importante, fundamente para el modelo que se propone en este trabajo, es la restricción exógena sobre los pesos, evitando pesos nulos o muy pequeños tales que se ignoren algunos subindicadores debido esquema de agregación inherente al DEA-IC. Estas son, en realidad, ‘restricciones de proporción’ sobre cada subindicador j :

$$\begin{aligned} Inf_j &\leq \frac{w_{ij}^g I_{ij}}{\sum_{j=1}^n w_{ij}^g I_{ij}} \leq Sup_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \\ Inf_j &\leq \frac{w_{ij}^b I_{ij}}{\sum_{j=1}^n w_{ij}^b I_{ij}} \leq Sup_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (6)$$

Se observa que no se aplican directamente sobre los pesos, sino sobre la mínima y máxima participación de I_j en IC_i , y se incorporan en los modelos (1) y (2). Formulados sin las mismas, asumen implícitamente los límites superior e inferior $Inf_j = 0$ y $Sup_j = 1$.

2.2 El Método Unweighted TOPSIS (UW-TOPSIS)

Este método reciente, propuesto por Benítez y Liern (2021), presenta un enfoque desde el conocido método TOPSIS para la clasificación u ordenamiento de entidades en el análisis multi-criterio, que permite generar un índice compuesto. Comparte la esencia del DEA-IC, en cuanto: a) esquema de ponderación objetivo y la realización de las etapas de ponderación y agregación en forma conjunta, b) se sustenta en programación matemática, en este caso no lineal, y c) la participación no nula de cada subindicador en el IC, puede ser asegurada mediante restricciones directas sobre los pesos, w_j .

Exhibe, sin embargo, una ventaja respecto de DEA-IC: los subindicadores pueden ser de ‘beneficio’ – ‘cuanto más mejor’- o de ‘costo’ – ‘cuanto menos mejor’-, pues la propia estructura del algoritmo TOPSIS clásico, adecúa el tratamiento homogéneo de los criterios involucrados en la clasificación de las entidades.

Como diferencia, a favor de DEA-IC, los métodos TOPSIS en general, requieren normalización para los subindicadores.

El método UW-TOPSIS, permite calcular la proximidad relativa de cada entidad a la solución, operando con distancias euclídeas, mediante los siguientes pasos:

Paso 1. Construcción de la matriz de decisión normalizada:

$$r_{ij} = \frac{I_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n I_{ij}^2}}, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m \quad (7)$$

Paso 2: Cálculo de los vectores ideales (A^+) y anti-ideales (A^-), se definen como:

$$\begin{aligned} A^+ &= (r_1^+, r_2^+, \dots, r_m^+), r_j^+ = \max_i r_{ij} \\ A^- &= (r_1^-, r_2^-, \dots, r_m^-), r_j^- = \min_i r_{ij} \end{aligned} \quad (8)$$

Paso 3: Distancia de cada entidad i a las soluciones ideal, D_i^+ , y anti-ideal, D_i^- :

$$D_i^+(w) = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (r_{ij} - r_j^+)^2} \quad (9)$$

$$D_i^-(w) = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (r_{ij} - r_j^-)^2} \quad (10)$$

Paso 4: Cálculo de la proximidad relativa de cada entidad i , R_i :

$$R_i(w) = \frac{D_i^-(w)}{D_i^+(w) + D_i^-(w)} \quad (11)$$

Puede observarse que R_i , resulta una función no lineal de los pesos de cada subindicador, w_j . A diferencia de DEA-IC, estos pesos serán los mismos para cada entidad i . Desde aquí, se requiere plantear dos problemas de optimización: 1) la minimización de $R_i(w)$ ($\rightarrow R_i^{Inf}$), y 2) la maximización de $R_i(w)$ ($\rightarrow R_i^{Sup}$), variando los pesos w_j , en los límites Inf_j y Sup_j , restricciones de peso de cada subindicador, I_j .

Paso 5: Resolver los problemas de optimización no lineal 1) y 2):

$$R_i^{Inf} = \text{Min} \rightarrow R_i(w); \text{ sujeto a: } \sum_{j=1}^m w_j = 1, Inf_j \leq w_j \leq Sup_j, \forall j \quad (12)$$

$$R_i^{Sup} = \text{Max} \rightarrow R_i(w); \text{ sujeto a: } \sum_{j=1}^m w_j = 1, Inf_j \leq w_j \leq Sup_j, \forall j \quad (13)$$

El problema 1), ecuación (12), busca encontrar la combinación de pesos, w_j , que haga que cada entidad i -ésima tenga la ‘menor proximidad relativa’ al ideal positivo, A^+ . El valor R_i^{Inf} , representa el ‘peor desempeño posible’ de la entidad i dentro del rango permitido por la restricción de pesos.

Análogamente, El problema 2), ecuación (13), busca encontrar la combinación de pesos, w_j , que haga que cada entidad i -ésima tenga la ‘mayor proximidad relativa’ al ideal positivo, A^+ . El valor R_i^{Sup} , representa el ‘mejor desempeño posible’ de la entidad i dentro del rango permitido por la restricción de pesos.

Paso 6: Definir el valor $R_i^{UW-TOPSIS}$ en el intervalo $[R_i^{Inf}, R_i^{Sup}]$ para cada entidad i : Los autores proponen utilizar el promedio de los valores extremos:

$$R_i^{UW-TOPSIS} = \frac{R_i^{Inf} + R_i^{Sup}}{2} \quad (14)$$

En este trabajo se plantea una evaluación más formal, compatible metodológicamente, a los efectos de comparación con el IC_i obtenido por DEA-IC, para la elección de $IC_i = R_i^{UW-TOPSIS}$, la cual se explica en la siguiente sección.

3 Metodología propuesta

3.1 Modelo propuesto para el determinar el Índice de Eficiencia de las unidades Generadoras

La metodología propuesta en este trabajo, emplea los dos indicadores descritos, a efectos de comparación (DEA-IC y UW-TOPSIS), con algunas modificaciones. Estas resultan muy útiles al propósito específico de aplicación investigada: obtener un indicador de eficiencia de las unidades de generación de energía eléctrica (que opere como un factor más, adicional al factor de uso extensivo-intensivo de las redes y al factor de pérdidas). Pero sin pérdida de generalidad para aplicaciones en otros campos.

Los índices de eficiencia para cada unidad de generación i , conectada a la red de transmisión considerada, son referidos como IC_i^{DEA-IC} e $IC_i^{UW-TOPSIS}$ según el método empleado. Dados los desarrollos expuestos con detalle en las dos sub-secciones anteriores, las modificaciones introducidas pueden ser sintetizadas, en los siguientes puntos que sigue la metodología:

1ro: Se aplica el método DEA-IC sin restricciones de proporción sobre los subindicadores, para obtener una base de comparación general. Esto implica, considerando el parámetro λ en $[0.1, 0.9]$ -con incrementos de valor 0.1-, evaluar el cuál es la dispersión de $IC_i^{DEA-IC}(\lambda)$ para cada unidad de generación i .

2do: Se aplica el método UW-TOPSIS, pero considerando la misma parametrización λ planteada para en el paso anterior, obteniéndose $IC_i^{UW-TOPSIS}(\lambda) = R_i^{UW-TOPSIS}(\lambda)$.

Como en UW-TOPSIS se aplican ‘originalmente’ restricciones directas sobre los pesos de cada subindicador, se realiza una simulación por el método de Montecarlo, para obtener los valores límites de las restricciones sobre w_j , Inf_j y Sup_j , que minimicen la dispersión de $IC_i^{UW-TOPSIS}(\lambda)$ para cada unidad de generación i .

3ro: Se analiza la sensibilidad y la robustez del $IC_i^{UW-TOPSIS}$, obtenido en el 2do paso. La sensibilidad se focaliza sobre los cambios de $IC_i^{UW-TOPSIS}(\lambda)$ al variar el parámetro λ , y la robustez en su capacidad de sostener el ordenamiento o ranking de eficiencias obtenido para cada unidad de generación i .

4to: Se considera el método DEA-IC con restricciones de proporción, y se realiza, también, una simulación por el método de Montecarlo, para obtener los valores límites de tales restricciones, Inf_j y Sup_j , que minimicen la dispersión de $IC_i^{DEA-IC}(\lambda)$ para cada unidad de generación i .

5to: Se analiza la sensibilidad y la robustez del IC_i^{DEA-IC} , obtenido el 4to paso.

De esta forma, se obtienen los dos indicadores de eficiencia, a comparar, para cada unidad de generación i , de mínima dispersión con la variación de λ , adoptando $\lambda = 0.5$: $IC_i^{DEA-IC}_{MD}$ y $IC_i^{UW-TOPSIS}_{MD}$.

3.2 Modelo para la obtención de los factores para la asignación de los costos de acceso de cada unidad de generación a la red de transmisión

Son considerados dos factores vinculados a la red de transporte: de uso extensivo, fu_i^Δ , y de pérdidas, $fPerd_i^\Delta$, para cada unidad de generación i . Los mismos se obtienen, en forma incremental, (símbolo ‘ Δ ’) desde un flujo óptimo de potencia cuyos desarrollos

teóricos se presentan en Schweickardt y Faure (2024), para un despacho con restricciones de red que minimiza el costo total de operación de los generadores.

A partir del cálculo de fu_i^Δ y $fPerd_i^\Delta$, se integra el indicador de eficiencia obtenido desde la sub-sección 2.1.3, $IC_i^{DEA-IC}_{MD}$ y $IC_i^{UW-TOPSIS}_{MD}$. Según se aplique uno u otro, se tendrán, lógicamente, resultados distintos en los cargos de acceso a la red.

Sea CT [UD/año], el costo total a recuperar (anualidad). Se busca que los tres factores operen multiplicativamente sobre CT, para obtener Ca_i , costo de acceso asignable a cada generador, tal que se cumpla la ecuación básica de balance:

$$\sum_{i=1}^n Ca_i = CT \quad (15)$$

Supóngase que se considera $IC_i^{DEA-IC}_{MD}$, pues para $IC_i^{UW-TOPSIS}_{MD}$ vale el mismo razonamiento. Sean fu_i , $fPerd_i$ y FEf_i , obtenidos a partir de fu_i^Δ y $fPerd_i^\Delta$, y $IC_i^{DEA-IC}_{MD}$, a determinar, tales que:

$$fu_i \times fPerd_i \times IC_i^{DEA-IC}_{MD} = Ca_i \quad (16)$$

Entonces se tendrá que aplicar la siguiente transformación sobre los dos factores incrementales y el $IC_i^{DEA-IC}_{MD}$:

$$fu_i = \left(\frac{fu_i^\Delta}{\left(\sum_{i=1}^n fu_i^\Delta \times fPerd_i^\Delta \times IC_i^{DEA-IC}_{MD} \right)^{1/3}} \right) \quad (17)$$

$$fPerd_i = \left(\frac{fPerd_i^\Delta}{\left(\sum_{i=1}^n fu_i^\Delta \times fPerd_i^\Delta \times IC_i^{DEA-IC}_{MD} \right)^{1/3}} \right) \quad (18)$$

$$IC_i^{DEA-IC}_{MD} = \left(\frac{IC_i^{DEA-IC}_{MD}}{\left(\sum_{i=1}^n fu_i^\Delta \times fPerd_i^\Delta \times IC_i^{DEA-IC}_{MD} \right)^{1/3}} \right) \quad (19)$$

Con tales factores se satisfarán (15) y (16), sin perder el orden de eficiencia de las unidades de generación. Es claro que si se considera $IC_i^{UW-TOPSIS}_{MD}$, los tres factores transformados, cambian, no solo el de eficiencia. Desde aquí el objeto de comparar resultados, empleando los dos indicadores compuestos de mínima dispersión.

4 Simulaciones y discusión de los resultados

El sistema considerado como caso de estudio, se presenta en la Fig. 1, los datos completos pueden ser descargados desde Power and Energy Systems Group – University of Illinois (s.f., accedido el 21 de abril de 2025).

Como se dijo, a las 11 inyecciones de generación originales, en color rojo, se le agrega 1, en color azul, cuya potencia activa máxima es 100 [MW], mínima 0, reactiva máxima 50 [MVar], mínima 0. Se asume que existen, acopladas en cada barra de generación, dos unidades, componiendo un generador equivalente, cuyas características son diferentes en términos de la construcción del indicador de eficiencia. Se computan, así, 22 unidades de generación, las dos acopladas a cada barra, tendrán los mismos fu_i y $fPerd_i$, pero diferentes $IC_i^{DEA-IC}_{MD}$ y $IC_i^{UW-TOPSIS}_{MD}$.

Se consideraron 5 subindicadores para componer el índice de eficiencia, todos de beneficio: **I1** → Índice de Eficiencia Energética (**IEE**): mide cuánta energía útil se genera por unidad de energía primaria consumida [MWútil/MWconsumido]; **I2** → Índice

de Renovabilidad del Recurso Primario (**IRR**): mide el grado de participación renovable, en la generación [MW renovables generados/MW totales generados]; **I3**→ Índice de Generación Baja en Carbono (**IGBC**): Mide el bajo impacto en emisiones por MW [ton Equivalentes en CO2 evitadas/MW generado]; **I4**→ Índice de Disponibilidad Operativa (**IDO**): mide la capacidad que efectivamente estuvo disponible para generación [MW disponible/MW instalados]; e **I5**→ Índice de Optimización de Inversiones (**IOI**): mide Evalúa la eficiencia técnica y operativa en relación al capital invertido [MWh generados/Millones de USD invertidos en la planta de generación].

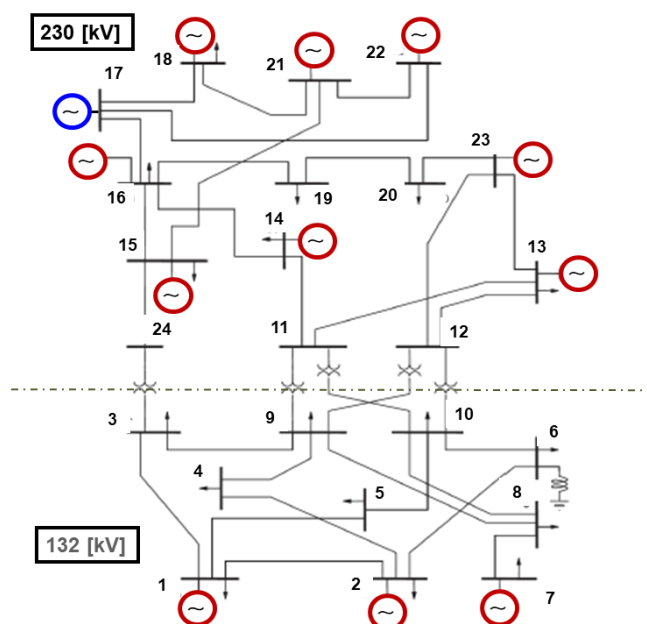


Fig. 1. Esquema unifilar IEEE-24 barras modificado

La Tabla 1, presenta los valores de cada subindicador y los índices de eficiencia $IC_i^{DEA-IC}_{MD}$ e $IC_i^{UW-TOPSIS}_{MD}$ para cada unidad. Los valores límites de las restricciones de proporción (DEA-IC) y de pesos (UW-TOPSIS), resultados de sendas simulaciones Montecarlo, fueron: $Inf_j = 0.2$ y $Sup_j = 0.5$; $lInf_j = 0.15$, $lSup_j = 0.30$, respectivamente.

Tabla 1. Subindicadores agregados y los tres IC compuestos resultantes para $\lambda = 0.5$

Gen	IEE	IRR	IGBC	IDO	IOI	IC ^{DEA-IC}	IC ^{DEA-IC} _{MD}	IC ^{UW-TOPSIS} _{MD}
1	29.832	896.285	35.975	171.734	871.853	0.66454	0.63709	0.70341
2	76.638	1211.575	32.992	208.196	1166.43	1.00000	1.00000	1.00000
3	53.433	784.174	40.195	157.594	547.111	0.87877	0.73007	0.68869
4	23.620	286.041	18.195	81.3240	206.706	0.30679	0.27089	0.26511
5	23.283	663.267	19.766	141.431	463.789	0.42371	0.42076	0.47696
6	18.498	209.792	12.827	66.0010	153.294	0.19065	0.18615	0.17808
7	29.993	385.745	20.278	99.2100	275.398	0.40658	0.35950	0.34399
8	37.318	505.580	20.118	118.520	357.068	0.49564	0.44513	0.42635
9	36.356	489.562	16.425	116.049	345.808	0.44173	0.40979	0.39978
10	36.752	496.150	14.231	117.069	490.746	0.40514	0.41980	0.43195
11	17.703	473.823	15.085	113.590	469.574	0.29577	0.31616	0.36707
12	35.293	471.959	10.945	113.297	467.201	0.33536	0.36695	0.39829
13	25.467	123.794	12.875	48.1110	274.454	0.24364	0.18133	0.18414
14	26.792	131.916	11.368	50.2630	86.6240	0.22858	0.13604	0.15197
15	24.888	120.272	11.503	47.1620	79.1820	0.22343	0.12268	0.13839
16	23.905	114.328	11.897	45.5370	75.4130	0.21726	0.11650	0.13325
17	20.211	92.461	11.463	39.2750	61.3410	0.17356	0.08717	0.10679
18	10.587	39.945	5.2020	21.4450	26.7950	0.00000	0.00000	0.00000
19	31.175	159.343	26.123	57.2010	355.104	0.45024	0.26902	0.31954
20	44.938	250.021	37.468	77.4870	552.626	0.71096	0.42940	0.48095
21	46.697	262.026	8.2980	79.9440	569.563	0.32603	0.28911	0.38178
22	22.796	107.683	12.860	43.6840	71.2500	0.21558	0.11035	0.13262

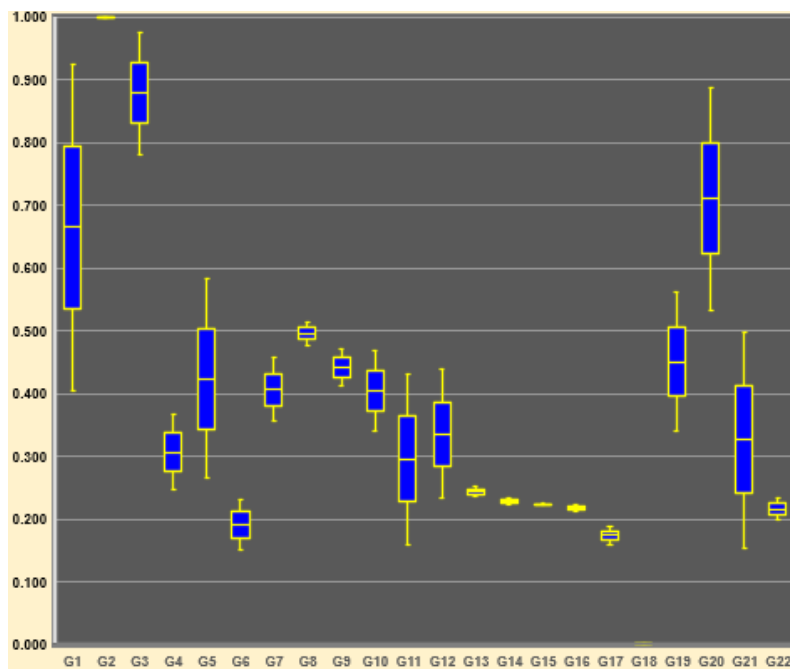


Fig. 2. Diagramas de caja para el $IC^{DEA-IC}(\lambda)$ para cada unidad de generación

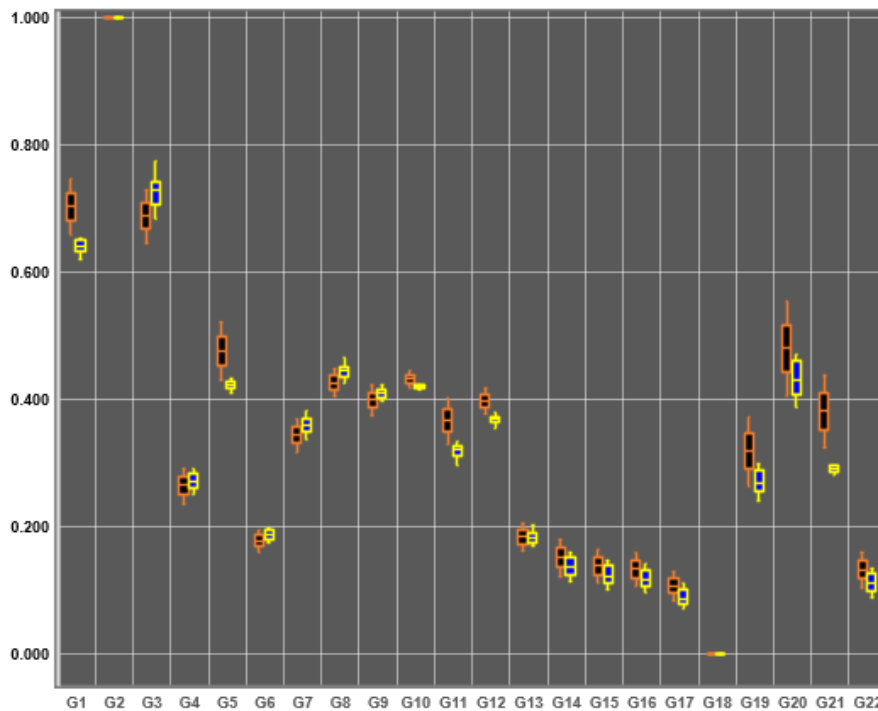


Fig. 3. Diagramas de caja comparativos de $IC^{WDEA-IC}_{MD}(\lambda)$ e $IC^{UW-TOPSIS}_{MD}(\lambda)$ para cada unidad de generación

La Fig. 2, presenta la dispersión conforme varía el parámetro λ en $[0.1, 0.9]$, para el $IC_i^{DEA-IC}(\lambda)$ sin aplicar restricciones de proporción. La Fig. 3, compara $IC_i^{DEA-IC}_{MD}(\lambda)$ e $IC_i^{UW-TOPSIS}_{MD}(\lambda)$. Se observa una reducción muy importante de la dispersión de valores entre $IC_i^{DEA-IC}(\lambda)$ e $IC_i^{DEA-IC}_{MD}(\lambda)$. Los dos indicadores de mínima dispersión, resultan algo diferentes en su ordenación, pero ambos son poco sensibles a los cambios del parámetro (λ), y robustos. Las correlaciones entre los subindicadores y cada indicador compuesto (coeficiente r de Pearson) resultaron superiores a 0.8, y el menor coeficiente de correlación ρ de Spearman, resultó 0.686, lo cual garantiza la monotonía u orden entre cada indicador compuesto y los subindicadores.

La Tabla 2, presenta los tres factores transformados mediante las ecuaciones (17) a (19), obtenidos para cada unidad de generación, según se considere como indicador de eficiencia $IC_i^{DEA-IC}_{MD}$ o $IC_i^{UW-TOPSIS}_{MD}$. El Ca_i se calcula mediante la ecuación (16), considerando un costo anual de 360000 [UD/año]. Se observa que según sea el indicador de eficiencia considerado, resultarán valores diferentes de los tres factores transformados, pero se satisface, por igual, la ecuación de balance (15).

Tabla 2. Factores transformados de uso (fu), de pérdidas (fPerd), y eficiencia (fEf) y costos de acceso a la red (Ca_i [UD]), según los modelos DEA-IC y UW-TOPSIS de mínima dispersión

Gen	Factores y Ca desde IC ^{DEA-IC} _{MD}				Factores y Ca desde IC ^{UWTOPSIS} _{MD}			
	fu	fPerd	fEf	Ca	fu	fPerd	fEf	Ca
1	0.3555	0.1500	0.6366	12218.308	0.3605	0.1521	0.5276	10414.332
2	0.3555	0.1500	0.1228	2356.7280	0.3605	0.1521	0.1245	2457.9110
3	0.1228	0.1228	0.4735	2569.8760	0.1245	0.1245	0.5538	3091.1580
4	0.1228	0.1228	1.2789	6941.6050	0.1245	0.1245	1.3073	7297.0000
5	0.0937	0.5692	1.0161	19501.632	0.0950	0.5773	0.9304	18365.508
6	0.0937	0.5692	1.4276	27400.479	0.0950	0.5773	1.4621	28859.999
7	0.1228	0.1228	1.1235	6097.9440	0.1245	0.1245	1.1669	6513.7490
8	0.1228	0.1228	0.9733	5282.6720	0.1245	0.1245	1.0204	5696.0000
9	0.1228	0.1228	1.0353	5619.1390	0.1245	0.1245	1.0677	5959.8000
10	0.1228	0.1228	1.0177	5523.9040	0.1245	0.1245	1.0105	5640.4270
11	0.3186	0.1674	1.1995	23023.091	0.3231	0.1697	1.1259	22224.013
12	0.3186	0.1674	1.1104	21313.324	0.3231	0.1697	1.0704	21127.892
13	0.1228	0.1228	1.4360	7794.2420	0.1245	0.1245	1.4513	8101.0110
14	0.1228	0.1228	1.5155	8225.4210	0.1245	0.1245	1.5085	8420.3870
15	0.2338	0.1674	1.5389	21682.542	0.2371	0.1697	1.5327	22208.402
16	0.2338	0.1674	1.5498	21835.313	0.2371	0.1697	1.5418	22340.908
17	0.2357	0.2280	1.6012	30974.454	0.2390	0.2312	1.5889	31609.921
18	0.2357	0.2280	1.7541	33932.374	0.2390	0.2312	1.7789	35389.217
19	0.2477	0.2152	1.2822	24610.208	0.2512	0.2183	1.2104	23893.030
20	0.2477	0.2152	1.0009	19210.634	0.2512	0.2183	0.9233	18225.381
21	0.2692	0.1980	1.2470	23933.936	0.2730	0.2008	1.0997	21707.641
22	0.2692	0.1980	1.5605	29952.173	0.2730	0.2008	1.5429	30456.313
			$\sum Ca_i$	360000.00			$\sum Ca_i$	360000.00

Ninguno de los factores aplicados puede resultar nulo, pues $Ca_i = 0$. Para ello, dado que los factores incrementales de uso y de pérdidas pueden resultar 0 si algún generador no puede cambiar la potencia despachada (es máxima), se aplican valores mínimos.

La Fig. 4, presenta los cambios relativos en los factores transformados, según el indicador de eficiencia que se emplee. Se nota la preponderancia conferida al fEf.

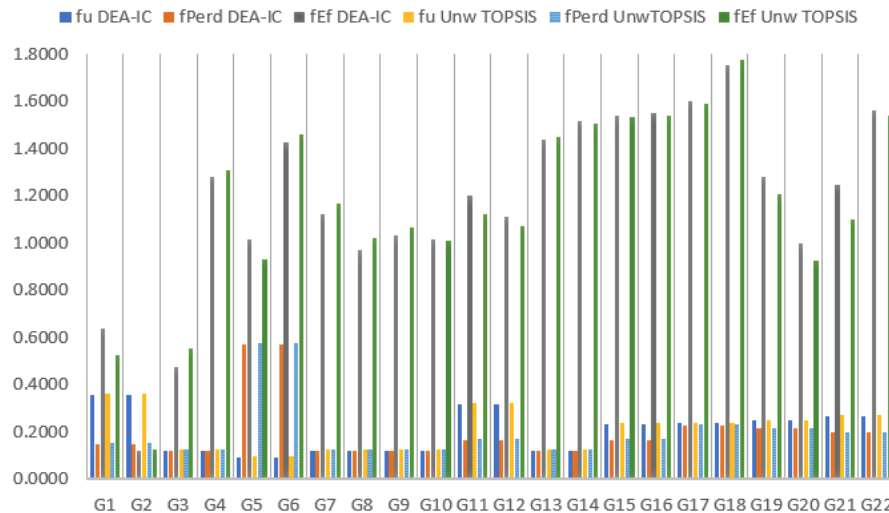


Fig. 4. Factores f_u , f_{Perd} y f_{Ef} comparativos según el enfoque empleado - $IC^{WDEA-IC}_{MD}$ o $IC^{UW-TOPSIS}_{MD}$ - para cada unidad de generación

5 Conclusiones

Las principales conclusiones para el trabajo propuesto se sintetizan a continuación:

Se ha presentado una novedosa metodología para crear un indicador compuesto de eficiencia de unidades de generación conectadas a la red de transmisión eléctrica, basado en el agregado de subindicadores pertinentes. Son utilizados dos enfoques sustentados en programación matemática: DEA-IC y Unweighted TOPSIS. Ambos operan muy satisfactoriamente.

La metodología se completa con un método para asignar costos de acceso a las unidades de generación acopladas a la red. Los factores de eficiencia aplicados, fomentan, desde los 5 subindicadores considerados, la penetración de unidades de generación con fuentes primarias renovables que presentan alto factor de disponibilidad.

El caso de estudio analizado para la aplicación de la metodología completa, considera una red de transmisión de prueba. No obstante, demuestra ser perfectamente aplicable no sólo a un sistema a nivel transmisión, sino a un sistema a nivel distribución con una escala media de emplazamiento de generadores distribuidos y/o multi-puntos de inyección desde el sistema interconectado, tratados como generadores equivalentes. Este último, es un tema de mucho interés para abordar en la misma línea de investigación.

Referencias

- Benítez, R., & Liern, V. (2021). Unweighted TOPSIS: a new multi-criteria tool for sustainability analysis. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 28(1), pp. 36-48.

- Bouslah, K., Liern, V., Ouenniche, J., & Pérez-Gladish, B. (2023). Ranking firms based on their financial and diversity performance using multiple-stage unweighted TOPSIS. *International Transactions in Operational Research*, 30(5), pp. 2485-2505.
- Mesa, J. D. G., & Segura, S. L. (2014). Ordenación de unidades eficientes usando múltiples modelos DEA y TOPSIS. Ed. Universidad de Sevilla.
- Liern, V., & Pérez-Gladish, B. (2021). Building composite indicators with unweighted-TOPSIS. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 70(5), pp. 1871-1880.
- López-García, A. (2024). A Proposal for Selecting the Most Value-Aligned Preferences in Decision-Making Using Agreement Solutions. In *ICAART* (1), pp. 461-470.
- Power and Energy Systems Group – University of Illinois (s.f.). IEEE 24-bus system. Illinois Center for a Smarter Electric Grid (ICSEG). <https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-24-bus-system/> (Accedido el 21 de abril de 2025)
- Schweickardt, G. A. (2012). Modelos para la identificación de los cargos de acceso a redes de transmisión de energía eléctrica con incentivos a la generación mediante fuentes primarias de energía renovable. Bariloche, Argentina. Ed. Fundación Bariloche.
- Schweickardt, G. A. (2014). Incentivos en cargos de acceso a redes de transmisión eléctrica. *Energética*, (43), pp. 5–22. Universidad Nacional de Colombia.
- Schweickardt, G., & Faure, O. (2024). Despacho económico de generación distribuida sustentado en flujos óptimos de potencia con asignación de pérdidas mediante seguimiento eléctrico híbrido-incremental. Parte 1: Aspectos teóricos del modelo. *Congreso Internacional XXXVII ENDIO – XXXV EPIO*, pp. 186-191.
- Zhou, P., Ang, B. W., & Poh, K. L. (2007). A mathematical programming approach to constructing composite indicators. *Ecological economics*, 62(2), pp. 291-297.
- Zhou, H., Yang, Y., Chen, Y., Zhu, J., & Shi, Y. (2021). DEA application in sustainability 1996–2019: The origins, development, and future directions. *Pursuing Sustainability: OR/MS Applications in Sustainable Design, Manufacturing, Logistics, and Resource Management*, pp. 71-109.