



## **Complementariedad de los recursos energéticos**

Esteban Agudelo Casas

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Asesor

Jaime Alejandro Valencia Velásquez, Doctor (PhD) en Área de formación del asesor interno

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Eléctrica  
Medellín, Antioquia, Colombia  
2023

| Cita                                    | Agudelo Casas [1]   |
|---|---|
| <b>Referencia</b><br>Estilo IEEE (2020) | [1] E. Agudelo Casas, “Complementariedad de los recursos energéticos”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023. |



Empresa: guane enterprises, jefes y supervisores: Diego Adolfo Mejía Giraldo y Oscar Mauricio Carreño, Asesor interno UdeA: Jaime Alejandro Valencia Velásquez



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Julio César Saldarriaga.

**Jefe departamento:** Noé Alejandro Mesa Quintero.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

Este proyecto es dedicado con todo mi amor, a mi abuela que está en el cielo, la cual me enseñó muchas cosas en mis 24 años de vida, a mi madre, la persona que día a día me motivó y esperaba mis triunfos con toda la confianza y plenitud del mundo, quien nunca dudó de mi en un solo momento, a mi mascota; mi mejor amigo (Dango) y finalmente, a una persona muy importante y especial que llegó a mi vida, me ha acompañado desde la mitad de mi carrera profesional y amo con todo mi ser.

## **Agradecimientos**

Este proyecto fue realizado gracias al apoyo brindado por parte del profesor Diego A. Mejía, quien me brindó la oportunidad laboral, a mi jefe Oscar M. Carreño, a la empresa a la cual pertenezco, guane enterprises, por abrirme las puertas y enseñarme nuevas cosas día a día, y en general mi alma mater, Universidad de Antioquia y los profesores del departamento de ingeniería eléctrica.

## TABLA DE CONTENIDO

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| RESUMEN.....                   | 8  |
| ABSTRACT .....                 | 9  |
| I. INTRODUCCIÓN .....          | 10 |
| II. OBJETIVOS .....            | 11 |
| A. Objetivo general .....      | 11 |
| B. Objetivos específicos ..... | 11 |
| III. MARCO TEÓRICO .....       | 12 |
| IV. METODOLOGÍA .....          | 20 |
| V. RESULTADOS .....            | 22 |
| VI. ANÁLISIS .....             | 26 |
| VII. CONCLUSIONES .....        | 28 |
| REFERENCIAS .....              | 30 |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| TABLA I. INTERPRETACIÓN DE MÉTRICAS .....                 | 18 |
| TABLA II. INTERPRETACIÓN MÉTRICA DESVIACIÓN ESTÁNDAR..... | 19 |
| TABLA III. RESULTADOS GENERALES .....                     | 25 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Fig. 1. Complementariedad de recursos. ....                                     | 16 |
| Fig. 2. Resultados Pearson Antioquia Vs FNCER Guajira y Cesar. ....             | 22 |
| Fig. 3. Resultados Kendall Antioquia Vs FNCER Guajira y Cesar. ....             | 22 |
| Fig. 4. Resultados Desviación estándar Antioquia Vs FNCER Guajira y Cesar. .... | 23 |
| Fig. 5. Resultados Pearson Córdoba Vs FNCER Guajira y Cesar. ....               | 23 |
| Fig. 6. Resultados Kendall Córdoba Vs FNCER Guajira y Cesar. ....               | 24 |
| Fig. 7. Resultados Desviación estándar Córdoba Vs FNCER Guajira y Cesar. ....   | 24 |

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

|                 |   |
|-----------------|---|
| <b>FNCER</b>    | Fuentes No Convencionales de Energía Renovable. |
| <b>ENFICC.</b>  | Energía Firme para el Cargo por Confiabilidad.  |
| <b>CREG.</b>    | Comisión de Regulación de Energía y Gas.        |
| <b>SIN.</b>     | Sistema Interconectado Nacional.                |
| <b>MW.</b>      | Megavatio.                                      |
| <b>MWh/mes</b>  | Megavatio-hora-mes.                             |
| <b>GWh/Mes.</b> | Gigavatio-hora-mes.                             |
| <b>Prom.</b>    | Promedio de la métrica analizada.               |
| <b>Desv.</b>    | Desviación típica de la métrica analizada.      |
| <b>UdeA</b>     | Universidad de Antioquia                        |

## RESUMEN

El informe presenta una metodología para evaluar la complementariedad entre recursos de energía renovable no convencional (FNCER) y recursos hidráulicos en el sistema eléctrico colombiano. Se calculan métricas de complementariedad, como el coeficiente de correlación de Pearson y Kendall, así como el índice de complementariedad de la desviación estándar. Se analizan datos históricos de generación de energía en diferentes regiones y se encuentra que, en general, existe una complementariedad fuerte o moderada entre las fuentes de energía evaluadas, con algunas excepciones. Los resultados indican que la combinación de FNCER y recursos hidráulicos puede mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico. El artículo contribuye a la comprensión de cómo diferentes fuentes de energía pueden trabajar juntas para garantizar la estabilidad y confiabilidad del suministro eléctrico en Colombia.

***Palabras clave*** — ENFICC, Cargo por confiabilidad, FNCER, CREG, Mercado eléctrico colombiano, Energía, Planta solar, Planta eólica, Complementariedad, Recursos energéticos, Correlación, Pearson, Kendall.



### ABSTRACT

The report presents a methodology to evaluate the complementarity between unconventional renewable energy resources (FNCER) and hydraulic resources in the Colombian electrical system. Complementarity metrics such as Pearson and Kendall correlation coefficients, as well as the standard deviation complementarity index, are calculated. Historical data on energy generation in different regions are analyzed, and it is found that, in general, there is strong or moderate complementarity among the evaluated energy sources, with some exceptions. The results indicate that the combination of FNCER and hydraulic resources can enhance the reliability of the electrical system. The article contributes to understanding how different energy sources can work together to ensure the stability and reliability of the electrical supply in Colombia.

***Keywords* — Reliability, FNCER, CREG, Colombian electricity market, Energy, Solar generation, Wind generation, Complementarity, Energy resources, Correlation, Pearson, Kendall.**

## I. INTRODUCCIÓN

En la práctica empresarial se apoyó en labores de un estudio para medir la complementariedad entre los recursos que usan Fuentes Renovables No Convencionales (FNCER) y los recursos Hidráulicos del sistema colombiano. Se pretende que esta complementariedad sea valorada y tenida en cuenta en el cálculo de la energía en firme para el Cargo por Confiabilidad (ENFICC). Actualmente las metodologías de cálculo de ENFICC, no tienen en cuenta la complementariedad de los recursos de generación ni sus aportes en periodos de escasez en Colombia.

El mecanismo de Cargo por Confiabilidad se puede enmarcar dentro de los que se denominan mecanismos de mercado de largo plazo [1], cuyo propósito es guiar la expansión de acuerdo con una visión estratégica, por medio de incentivos para la inversión, más allá de un mercado únicamente de energía. La forma como se lleva a cabo el diseño de los mercados para implementar los mecanismos de capacidad, considerando entre otros el proceso de adquisición de la capacidad firme (sea energía o sea potencia), las condiciones y plazos para su suministro, las penalidades y los mecanismos para respaldar las obligaciones o para hacer ajustes a los resultados de un determinado proceso, son particulares de cada sistema.

En este proyecto, el objetivo se centró en calcular métricas para medir la correlación (Pearson, Kendall y Desviación estándar) entre series de datos numéricos, por ejemplo, Energía solar vs hidráulica para un periodo de tiempo determinado en cada año de estudio. El desarrollo de todos los cálculos se llevó a cabo en Python con el uso de las librerías Pandas, Numpy y Matplotlib [2]. Los datos históricos para el respectivo análisis se tomaron de los anexos de la circular No 024 de 2019 de la CREG y las resoluciones respectivas para el cálculo de la energía solar y eólica [3]-[5].

Se obtuvieron unos resultados alentadores que dan razón a la intuición inicial del estudio, la cual se centraba en el gran aporte que podrían brindar las FNCER en periodos de verano y/o sequía, sin embargo, los resultados son apenas un inicio de un estudio que podría avanzar más en cuanto a la creación de una propuesta que pueda cambiar el mercado eléctrico colombiano.

## II. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Calcular métricas de complementariedad entre los recursos FNCER y los recursos hidráulicos del sistema colombiano.

### *B. Objetivos específicos*

- Implementar en Python algunas métricas de complementariedad.
- Calcular los índices de complementariedad entre las plantas FNCER y las plantas hidráulicas del sistema colombiano.
- Elaborar un informe con resultados y los avances logrados en el estudio de complementariedad.

### III. MARCO TEÓRICO

#### *Cargo por confiabilidad*

Cargo por Confiabilidad: Remuneración que se paga a un agente generador por la disponibilidad de activos de generación con las características y parámetros declarados para el cálculo de la ENFICC, que garantiza el cumplimiento de la Obligación de Energía Firme que le fue asignada en una Subasta para la Asignación de Obligaciones de Energía Firme o en el mecanismo que haga sus veces. Esta energía está asociada a la Capacidad de Generación de Respaldo de que trata el artículo 23 de la Ley 143 de 1994 y es la que puede comprometerse para garantizar a los usuarios la confiabilidad en la prestación del servicio de energía eléctrica bajo condiciones críticas [6]

#### *Energía Firme para el Cargo por Confiabilidad (ENFICC)*

Es la máxima energía eléctrica que es capaz de entregar una planta de generación continuamente, en condiciones de baja hidrología, en un período de un año [6].

#### *Obligación de Energía Firme:*

Vínculo resultante de la Subasta o del mecanismo que haga sus veces, que impone a un generador el deber de generar, de acuerdo con el Despacho Ideal, una cantidad diaria de energía durante el Período de Vigencia de la Obligación, cuando el Precio de Bolsa supere el Precio de Escasez. Esta cantidad de energía corresponde a la programación de generación horaria resultante del Despacho Ideal hasta una cantidad igual a la asignación hecha en la Subasta, considerando solamente la Demanda Doméstica [6].

#### *Mecanismos de suficiencia*

El mecanismo de Cargo por Confiabilidad se puede enmarcar dentro de los que se denominan mecanismos de mercado de largo plazo [1], cuyo propósito es guiar la expansión de acuerdo con una visión estratégica, por medio de incentivos para la inversión, más allá de un mercado únicamente de energía. En la definición de [1], estos mecanismos de largo plazo incluyen

los mecanismos de capacidad (como el Cargo por Confiabilidad) así como los mecanismos para incentivar el desarrollo de las fuentes renovables (subastas). En el caso de los mecanismos por capacidad el objetivo estratégico es garantizar un determinado nivel de confiabilidad en el sistema.

El diseño de los mecanismos de capacidad depende de las características específicas de cada sistema. Estas características determinan el tipo de producto por el cual se reconoce una remuneración. A partir del tipo de producto, se derivan los tipos de tecnologías a usar por los posibles proveedores y la cantidad de producto que los proveedores pueden suministrar (su aporte reconocido a la capacidad firme o a la suficiencia del sistema [7]). Todos estos aspectos como se discute a continuación están relacionados con la complementariedad.

En sistemas de potencia con una alta participación de la generación hidroeléctrica con embalses, el cubrimiento de la demanda pico de potencia, puede no representar un riesgo alto para la confiabilidad. Por otra parte, se pueden presentar riesgos para la confiabilidad asociados con escasez de energía para cubrir la demanda de todo un día o una semana ante períodos de sequías prolongados. En este tipo de sistemas, dentro del cual se encuentra el colombiano y el de otros países de la región, el producto asociado al mecanismo de capacidad es la energía. El caso de Colombia se diferencia de otros países de la región, como Brasil [8], por el hecho de que el producto es la energía firme que se puede exigir cuando sea requerida y no una energía firme certificada asociada a un contrato de suministro de energía a futuro.

Por ejemplo, en sistemas basados en generación térmica, la multiplicación de una determinada capacidad disponible por el tiempo puede resultar suficiente para satisfacer la demanda de energía durante un periodo específico de tiempo. Los riesgos para la confiabilidad podrían estar asociados a escasez en la capacidad disponible para cubrir la demanda instantánea de potencia en algún periodo determinado del día.

### *Recursos energéticos para la suficiencia del sistema*

En un sistema con posible riesgo de escasez de potencia, el mayor valor a la capacidad firme lo dan aquellas tecnologías que permiten incrementar la capacidad cuando la demanda es mayor o que permiten reducir el pico de la demanda neta. En un sistema como el colombiano, las fuentes

de energía deben ser las mayores aportantes a la suficiencia del sistema, la energía firme que una planta o un portafolio de plantas, independiente de los recursos primarios que utilicen, es lo que aporta a la confiabilidad. No se esperaría que el uso de baterías (capacidad de almacenamiento de corto plazo) o la gestión para el desplazamiento de la demanda de un periodo a otro, repercuten de manera determinante en la demanda neta de energía y por lo tanto en la necesidad de recursos de generación para atender posibles situaciones de escasez.

### *Recursos de energías renovables variables*

La integración y una alta participación de las energías renovables variables, como la solar y la eólica, tiene un impacto importante en el diseño de los mecanismos de capacidad. El incremento en la participación de estas fuentes ha sido uno de los impulsores para el desarrollo de nuevos mercados de capacidad en sistemas tradicionalmente basados en generación térmica, Reino Unido por ejemplo [9]. En este caso, los mecanismos de capacidad no solamente facilitan la incorporación de nuevas fuentes de generación, sino que también permiten la sostenibilidad económica de plantas convencionales que aportan capacidad firme al sistema y han visto afectados sus ingresos en el mercado de energía al ser desplazadas en la operación por plantas eólicas y solares con costos operativos más bajos. En estos sistemas con posibles situaciones de escasez asociada a la potencia, una posible falta de correlación entre la demanda y la disponibilidad de los recursos hace que el aporte de las fuentes solares y eólicas a la capacidad firme/suficiencia del sistema sea limitado [10]-[11].

### *Uso de la complementariedad en los mecanismos de suficiencia*

En las referencias consultadas no se encontró evidencia del uso directo de complementariedad o de portafolios de recursos de un agente generador para la valoración y para el pago de mecanismos de capacidad, en su lugar se valora o se da crédito a recursos individuales. Sin embargo, y considerando los siguientes temas analizados en esta sección, se identifica:

1. A nivel internacional se observa la tendencia a valorar el aporte de los recursos a la confiabilidad por medio de estudios de modelamiento del sistema. El modelamiento del sistema para el cálculo de su confiabilidad permite capturar de manera automática, si los

## COMPLEMENTARIEDAD DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS

---

recursos se modelan de manera apropiada, las sinergias y correlaciones entre ellos, por ejemplo, su complementariedad [12].

2. Las plantas eólicas y solares le aportan energía al sistema.
3. La necesidad específica en el caso del SIN para el aporte a la confiabilidad por el cual se reconoce el mecanismo del cargo está relacionada con la energía firme.

Se entiende y se justifica, teniendo en cuenta el contexto internacional, la realización de estudios de simulación de la operación del sistema donde se valore el aporte a la confiabilidad de recursos individuales y portafolios de los mismos, teniendo en cuenta la posible complementariedad en la disponibilidad de los recursos primarios e identificando las métricas de confiabilidad apropiadas, y a partir de estos resultados se puedan proponer cambios regulatorios, siempre que sea posible demostrar los beneficios en términos de confiabilidad en el sistema del uso de recursos que se complementan.

### *Correlación*

En probabilidad y estadística, la correlación indica la fuerza y la dirección de una relación lineal y la proporcionalidad entre dos variables estadísticas. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra: si tenemos dos variables (A y B) existe correlación entre ellas si al disminuir los valores de A lo hacen también los de B y viceversa [13].

Se dice que dos recursos son perfectamente complementarios si su generación de energía en un periodo de tiempo determinado es similar a lo mostrado en la Fig. 1

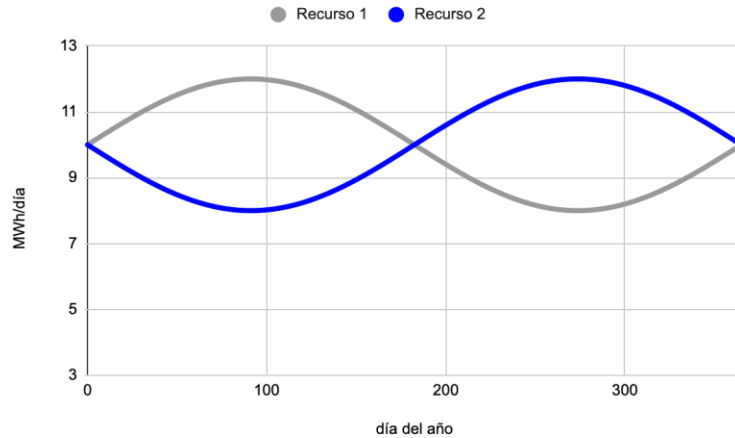


Fig. 1. Complementariedad de recursos.

A continuación, se presenta una descripción básica conceptual de los índices de complementariedad que se consideraron en el estudio.

### *Coefficiente de correlación de Pearson*

El coeficiente de correlación de Pearson, como índice de complementariedad, cuantifica la relación estadística entre dos recursos energéticos. Esta métrica provee el grado de asociación entre dos recursos así como también la dirección de su asociación. Matemáticamente, se calcula como [14]:

$$\rho_{1,2} = \frac{Cov(E_1, E_2)}{\sigma_1 \sigma_2} = \frac{(\sum_{i=1}^n E_{n,1} - \bar{E}_1) \cdot (\sum_{i=1}^n E_{n,2} - \bar{E}_2)}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (1)$$

Donde  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  representan las desviaciones estándar de los dos recursos  $E_1$  y  $E_2$ .

Este índice de complementariedad de Pearson es adimensional y puede oscilar entre -1 y 1. El signo positivo indica que ambos recursos tienden a cambiar en la misma dirección; mientras que el signo negativo indica que cuando un recurso entrega energía por encima de su valor promedio, la otra entrega energía por debajo de su valor medio.

De acuerdo con lo descrito es importante tener en cuenta que a la hora de evaluar complementariedad entre dos recursos, lo deseable es que el índice sea lo más negativo posible.



Sin embargo, a pesar de que este indicador sea -1, no implica que los recursos se complementan idealmente. La razón de lo anterior es que la métrica evalúa solamente el comportamiento, aumentos y disminuciones, de los recursos a lo largo del tiempo; pero no evalúa la cantidad de energía entregada por los recursos. Esta es la principal desventaja de esta métrica; sin embargo, es recomendable calcularla y complementar con la energía media que pueden entregar los recursos evaluados para lograr un mayor entendimiento de estos.

### *Coefficiente de correlación de Kendall*

La prueba de correlación tau de Kendall se utiliza para medir el grado y el sentido de la relación que hay entre dos variables medidas por los menos en un nivel ordinal. Su aplicación tiene sentido si las variables objeto de estudio no poseen una distribución poblacional conjunta normal [15].

Se define  $(x_1, y_1)$  , ...,  $(x_n, y_n)$  como un conjunto de observaciones de las variables aleatorias conjuntas  $x$  e  $y$ , tal que todos los valores de  $(x_i)$  y  $(y_i)$  son únicos. De cualquier par de observaciones  $(x_i, y_i)$  y  $(x_j, y_j)$ , donde, se dice que son concordantes si  $x_i > x_j$  y  $y_i > y_j$  o si  $x_i < x_j$  y  $y_i < y_j$ . De lo contrario se dice que son discordantes.

A partir de lo anterior, se define el coeficiente  $\tau$  de Kendall como:

$$\tau = \frac{(\# \text{ de pares concordantes}) - (\# \text{ de pares discordantes})}{\# \text{ de pares}} \quad (2)$$

$$\tau = 1 - \frac{2 \cdot (\# \text{ de pares concordantes})}{\frac{n(n-1)}{2}} \quad (3)$$

- El coeficiente de Kendall debe estar en el rango  $-1 \leq \tau \leq 1$
- Si la concordancia entre las dos clasificaciones es perfecta (es decir, las dos clasificaciones son iguales) el coeficiente tiene valor 1.
- Si el desacuerdo entre las dos clasificaciones es perfecto (es decir, una clasificación es la inversa de la otra), el coeficiente tiene el valor  $-1$ .
- Si  $X$  e  $Y$  son independientes y no constantes, entonces la expectativa del coeficiente es cero.

*Índice de complementariedad de la desviación estándar.*

Los autores en [16], proponen el Índice de Complementariedad de la Variación Total, el índice de complementariedad de la varianza, y el índice de complementariedad de la desviación estándar como métricas para evaluar la complementariedad de recursos energéticos. Este último se obtiene:

$$\phi_s(F_1, F_2) = 1 - \frac{\sigma[F_1 + F_2]}{\sigma[F_1] + \sigma[F_2]} \quad (4)$$

$$\phi_s(F_1, F_2) = 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot \sigma[F_1] \cdot \sigma[F_2] \cdot (1 - \rho_{1,2})}{(\sigma[F_1] + \sigma[F_2])^2}} \quad (5)$$

- Debe estar en el rango  $0 \leq \phi_s(F_1, F_2) \leq 1$  y  $\rho_{1,2}$  es la correlación de Pearson expresada en la ecuación (1).
- Es simétrico.
- Puede aplicarse solo a dos series.
- Considera la escala de las variables.

*Interpretación de las métricas evaluadas*

En la literatura se puede evidenciar distintas interpretaciones de las diferentes métricas expuestas anteriormente. La interpretación se enfoca en otorgar significado cualitativo a los coeficientes de correlación numérica. En esta sección se ha planteado la **TABLA I** y **TABLA II**, que es una interpretación para evaluar los resultados obtenidos a partir de estudios que han utilizado las métricas expuestas para medir complementariedad de fuentes de energía hídricas, solares y eólicas. [17]-[20].

Para evaluar la complementariedad, los índices Pearson y Kendall se interpretan usando la TABLA I.

TABLA I. INTERPRETACIÓN DE MÉTRICAS

| Magnitud de asociación | Pearson y Kendall. |
|------------------------|--------------------|
| Muy débil              | (0, -0.1)          |

## COMPLEMENTARIEDAD DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS

---

|          |              |
|----------|--------------|
| Débil    | [-0.1, -0.3) |
| Moderado | (-0.3, -0.5) |
| Fuerte   | [-0.5, -1]   |

---

Para evaluar la complementariedad, el índice de desviación estándar se interpreta usando la TABLA II.

TABLA II. INTERPRETACIÓN MÉTRICA DESVIACIÓN ESTÁNDAR

| Magnitud de asociación | Desviación estándar |
|------------------------|---------------------|
| Muy débil              | (0, 0.1)            |
| Débil                  | [0.1, 0.3)          |
| Moderado               | [0.3, 0.5)          |
| Fuerte                 | [0.5, 1]            |

---

## IV. METODOLOGÍA

### *Metodología para el cálculo de la energía hidráulica mensual*

Para el cálculo de la energía hidráulica mensual se debe usar la siguiente ecuación:

$$E_{i,mes} \left( \frac{MWh}{mes} \right) = \min(CEN_i \cdot IHF \cdot 24h \cdot dias_{mes}, F_{c,i} \cdot Q_{r,i} \cdot 24h \cdot dias_{mes}) \quad (6)$$

Donde:

$E_{i,mes}$  : Energía hidráulica para la planta  $i$  en el mes  $\left( \frac{MWh}{mes} \right)$

$CEN_i$  : Capacidad Efectiva Neta para la planta  $i$  (MW)

$IHF$  : Indisponibilidad Histórica Forzada

$F_{c,i}$  : Factor conversión de la planta  $i$   $\left( \frac{MW}{\frac{m^3}{s}} \right)$

$Q_{r,i}$  : Caudal de agua del rio  $r$  que aporta a la planta  $i$   $\left( \frac{m^3}{s} \right)$

Para llevar a cabo el cálculo de las correlaciones, es necesario primero calcular la energía hidráulica, solar y eólica de cada planta que se considerará en el estudio. Mediante la ecuación (6) se puede calcular la energía hidráulica mensual, y para la energía solar y eólica se debe seguir la metodología planteada en la resolución CREG 201 de 2017 y CREG 167 de 2017 respectivamente. Los parámetros que se requieren en la ecuación (6) y las ecuaciones planteadas en las anteriores resoluciones se obtienen a partir de los anexos de la circular 024 de 2019 de la CREG [3]. Allí se puede encontrar de manera general, la topología hidráulica de las principales plantas hídras del país, los aportes hídricos mensuales históricos (promedio) de los ríos correspondientes a dichas plantas, velocidades del viento e irradiación histórica mensual para las zonas donde se ubicarán los proyectos eólicos y solares.

A continuación, se agrupan las plantas elegidas para el estudio de acuerdo al departamento.

- **Antioquia:** Ituango, Guatapé, Porce 2 y 3, Guatrón, Tasajera, Jaguas, San Carlos y Playas (5000 MW)
- **Cundinamarca:** Guavio y Pagua (1850 MW)
- **Boyacá:** Chivor y Sogamoso (1820 MW)
- **Cauca:** Salvajina (315 MW)
- **Huila:** El Quimbo, Betania (940 MW)

## COMPLEMENTARIEDAD DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS

---

- **Córdoba:** Urra (340 MW)
- **Guajira (Eólicas):** Windpeshi, Tumawind y Chemesky (490 MW)
- **Cesar (Solares):** La Loma y El Paso (240 MW)

Se calculará la energía con datos históricos desde el año 2009 hasta el año 2017 y se comparan los resultados de los índices para dos semestres en el año, un semestre de invierno (abril – septiembre) y otro semestre de verano (octubre - marzo). Si bien la estación de invierno según la resolución 071 de 2006 de la CREG va desde mayo hasta noviembre [6]. En este caso se acomodan los meses de las estaciones para obtener dos periodos de análisis simétricos.

Se mostrarán las gráficas de los resultados de evaluación de correlación de la energía hidráulica total del departamento de Antioquia (5000 MW) y la energía total de las plantas FNCER (Guajira y Cesar – 730 MW) y la correlación entre la energía total del departamento de Córdoba (340 MW) y la energía total de las plantas FNCER consideradas. Adicionalmente, se presentará una tabla resumen con los resultados para el segundo semestre (verano) para las demás regiones.

V. RESULTADOS

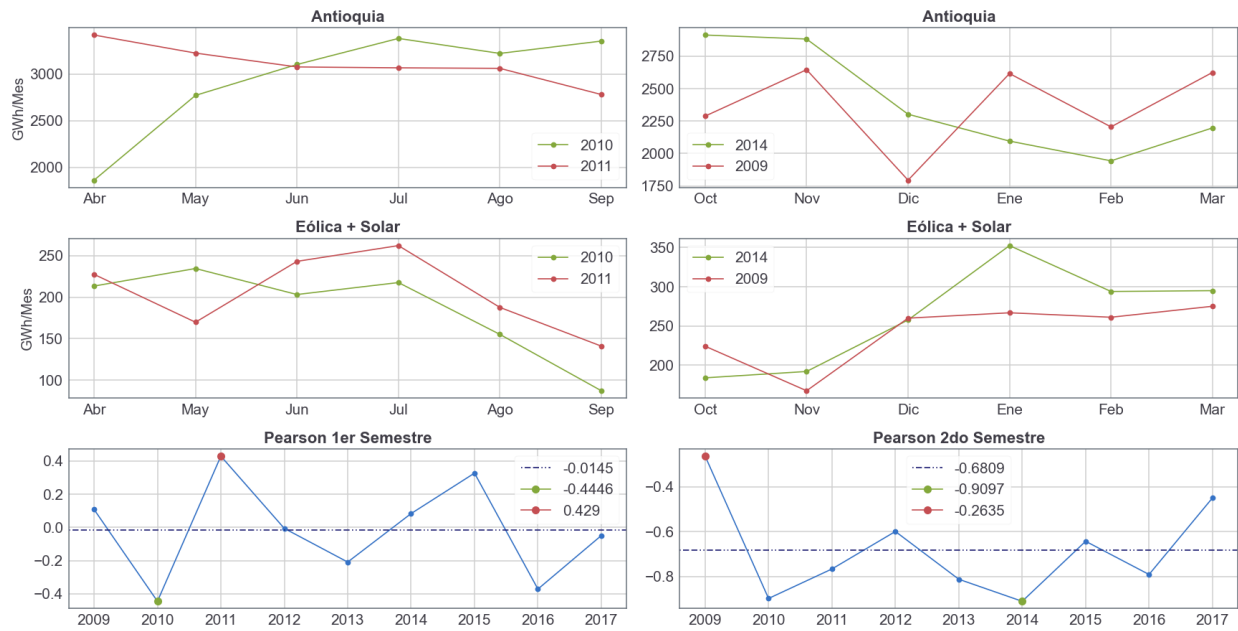


Fig. 2. Resultados Pearson Antioquia Vs FNCER Guajira y Cesar.

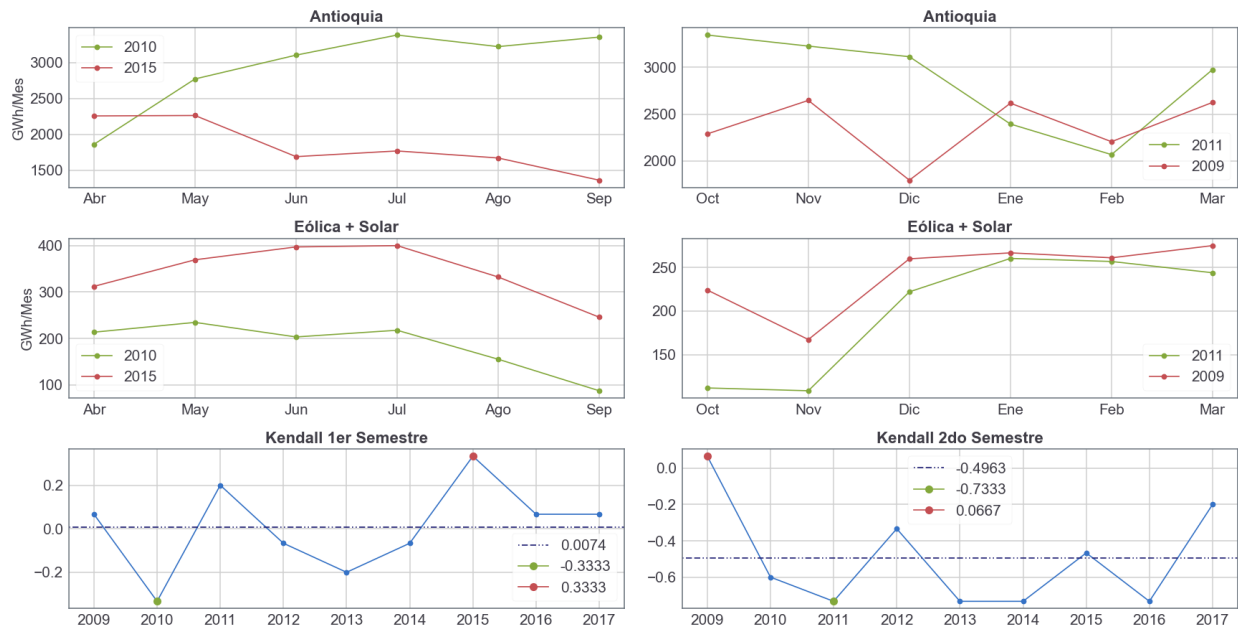


Fig. 3. Resultados Kendall Antioquia Vs FNCER Guajira y Cesar.

# COMPLEMENTARIEDAD DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS

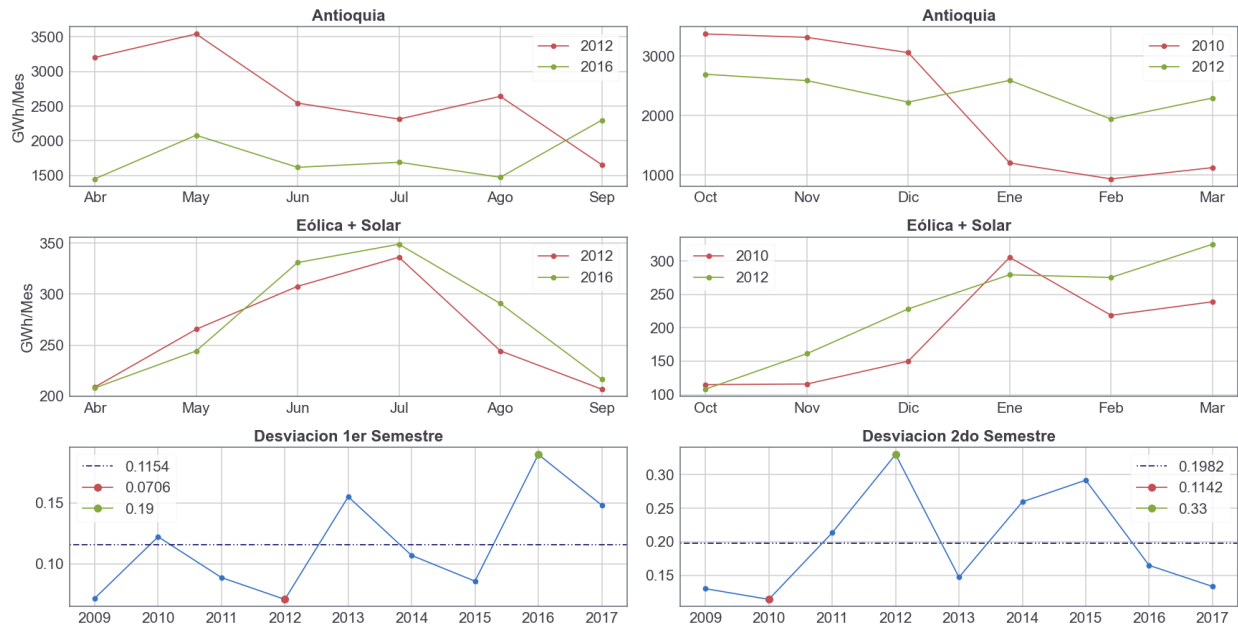


Fig. 4. Resultados Desviación estándar Antioquia Vs FNCER Guajira y Cesar.

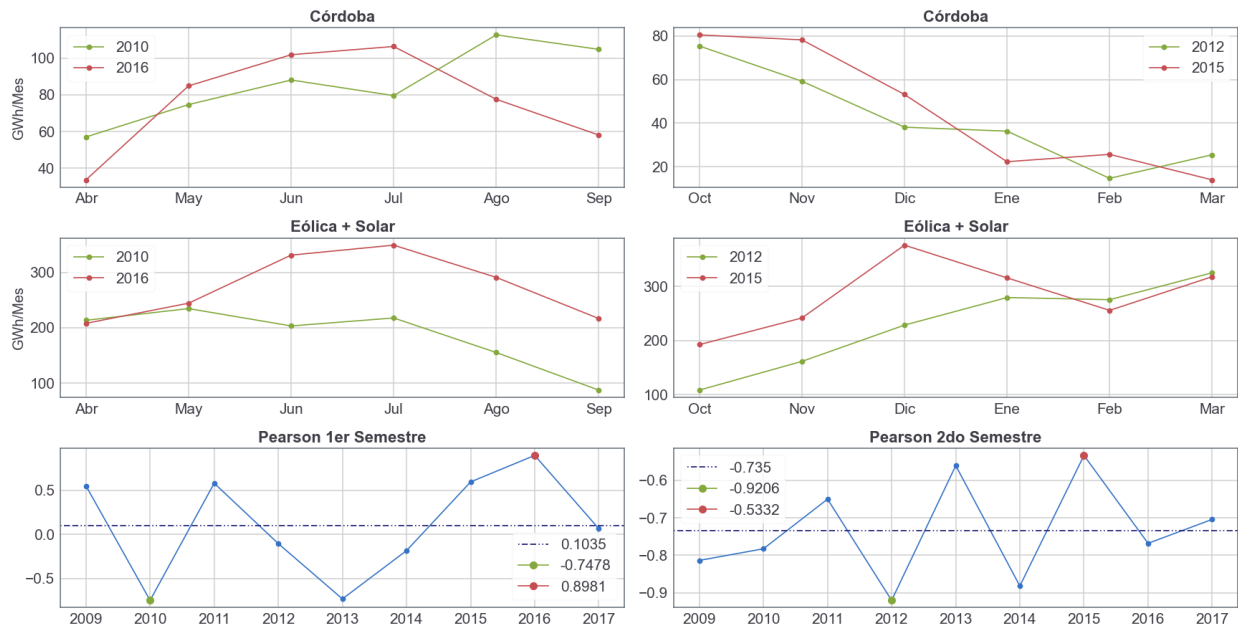


Fig. 5. Resultados Pearson Córdoba Vs FNCER Guajira y Cesar.

# COMPLEMENTARIEDAD DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS

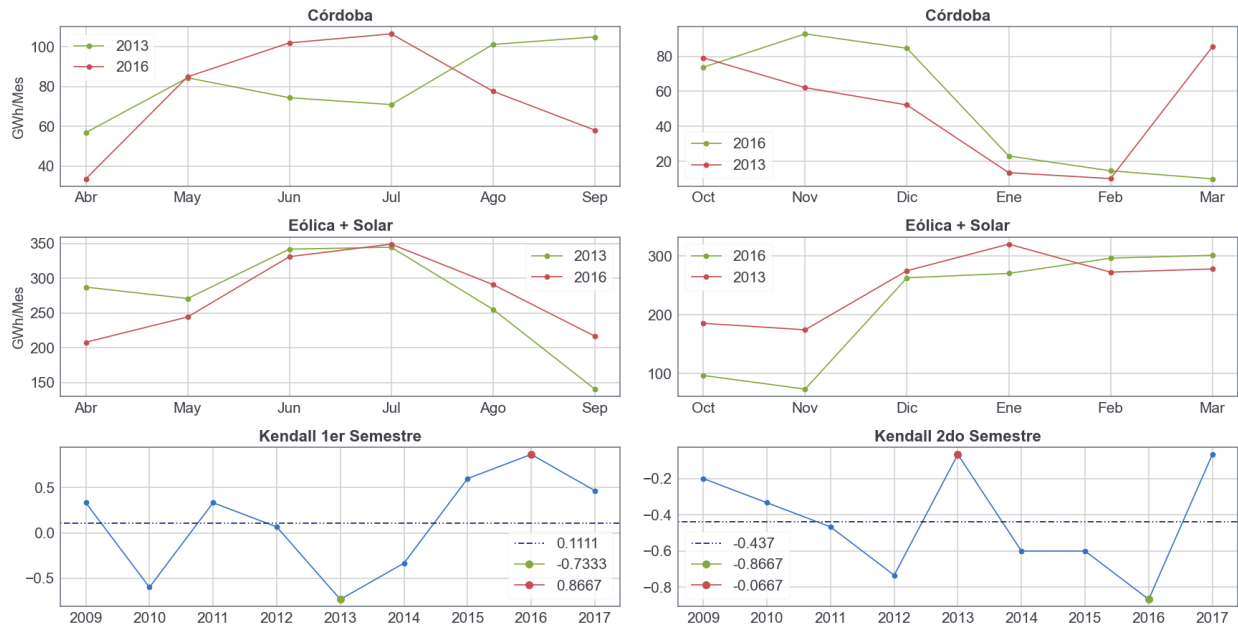


Fig. 6. Resultados Kendall Córdoba Vs FNCER Guajira y Cesar.



Fig. 7. Resultados Desviación estándar Córdoba Vs FNCER Guajira y Cesar.



# COMPLEMENTARIEDAD DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS

---

## TABLA III. RESULTADOS GENERALES

| Generación hidráulica vs total de generación solar y eólica (2do semestre) |           |       |              |        |         |        |        |        |         |        |         |        |  |
|--|-----------|-------|--------------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|--|
| Métrica  | Antioquia |       | Cundinamarca |        | Boyacá  |        | Cauca  |        | Huila   |        | Córdoba |        |  |
|  | Prom      | Desv  | Prom         | Desv   | Prom    | Desv   | Prom   | Desv   | Prom    | Desv   | Prom    | Desv   |  |
| Pearson  | -0.681    | 0.221 | -0.5992      | 0.2815 | -0.7091 | 0.212  | 0.1987 | 0.4404 | -0.2413 | 0.5293 | -0.735  | 0.127  |  |
| Kendall  | -0.497    | 0.329 | -0.437       | 0.2333 | -0.4667 | 0.3205 | 0.1259 | 0.4314 | -0.1852 | 0.4927 | -0.437  | 0.2724 |  |
| Desviación   | 0.198     | 0.072 | 0.3862       | 0.1048 | 0.3451  | 0.0604 | 0.1967 | 0.1526 | 0.3411  | 0.1616 | 0.4865  | 0.0758 |  |

### VI. ANÁLISIS

Los resultados obtenidos y presentados en la sección anterior corresponden a la evaluación de las métricas descritas anteriormente aplicadas a la generación por departamentos contra la generación de las plantas no convencionales de energía renovable.

En la **Fig. 2** y **Fig. 3**, se implementan las métricas de correlación de Pearson y Kendall para el departamento de Antioquia y los departamentos Guajira y Cesar (FNCER), estas métricas no son sensibles a la escala, es decir, solo miden el comportamiento de crecimiento y decrecimiento de las series en periodos de tiempo sin tener en cuenta la magnitud de estos. Se tienen dos columnas en las figuras, una para el primer semestre (invierno) y otra para el segundo semestre (verano). En las dos primeras gráficas de cada columna, se tiene la generación del departamento y la generación de las plantas renovables respectivamente, donde se muestran dos gráficas, una de color verde y otra de color rojo. El color de estas gráficas indica la mejor y peor relación entre las series de energía, por ejemplo, en el segundo semestre para la **Fig. 2**, la gráfica roja indica que en el año 2009 las series de energía tuvieron una peor complementariedad, es decir, un índice de la métrica mayor, y la gráfica color verde indica que para el año 2014 fue el año en el que hubo mejor complementariedad para ese mismo semestre, es decir, se obtuvo un valor de la métrica cercano a -1, es por eso por lo que la gráfica de color verde para Antioquia y las plantas renovables tienden a ser una el espejo de la otra, puede observarse que cuando en Antioquia la generación de energía disminuye desde octubre hasta enero, la generación renovable incrementa su generación, lográndose así una relación inversa de generación de energía. En la última gráfica de la **Fig. 2**, se observa para ambos semestres un comportamiento histórico de la métrica a lo largo de los años analizados para cada semestre, donde se observa con un punto verde el mínimo valor (más cercano a -1) y en un punto rojo el máximo valor de la métrica (más alejado a -1), y finalmente, una línea punteada azul indica el promedio de la métrica para ese semestre durante los años analizados. El mismo análisis aplica para la **Fig. 3**, **Fig. 5** y **Fig. 6**, ya que la métrica de Kendall es una métrica que tampoco es sensible a la escala y tiene el mismo dominio de posibles resultados que la métrica de Pearson.

## COMPLEMENTARIEDAD DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS

---

En el caso de la evaluación de la métrica de desviación estándar para el departamento de Antioquia y Córdoba (**Fig. 4** y **Fig. 7** respectivamente) el análisis es igual al anterior solo que en este caso, la métrica si es sensible a la escala y los valores más cercanos a 1 indican mejor complementariedad, es decir, una relación más inversa.

Observando las Figuras con los resultados y la **TABLA III**, y teniendo en cuenta la **TABLA I** y **TABLA II** que muestran unos rangos de sensibilidad de interpretación de las métricas, se puede concluir lo siguiente:

- La métrica de Pearson indica complementariedad promedio fuerte con todas las regiones excepto con Cauca y Huila, siendo Boyacá y Córdoba los departamentos con mejor valor obtenido (más cercano a -1).
- La métrica de Kendall indica complementariedad moderada con todos los departamentos excepto con Cauca y Huila, siendo Antioquia y Boyacá los departamentos con mejor valor obtenido (más cercano a -1).
- La métrica de desviación estándar presenta una relación moderada con los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Huila y Córdoba, siendo este último departamento el que obtuvo un valor de la métrica más alto.

### VII. CONCLUSIONES

En este estudio, se ha desarrollado una metodología para evaluar la complementariedad entre los recursos de energía renovable no convencional (FNCER) y los recursos hidráulicos en el sistema eléctrico colombiano. El enfoque se basa en el cálculo de diversas métricas, incluyendo el coeficiente de correlación de Pearson, el coeficiente de correlación de Kendall y el índice de complementariedad de la desviación estándar, con el fin de comprender mejor cómo estas fuentes de energía pueden trabajar juntas para garantizar la confiabilidad del suministro eléctrico en el país.

Los resultados del estudio revelan patrones interesantes de complementariedad en la generación de energía en Colombia. En general, existe una complementariedad fuerte o moderada entre las fuentes de energía evaluadas en la mayoría de las regiones. Esto significa que, en momentos en que una fuente de energía puede experimentar limitaciones o fluctuaciones en su generación, otras fuentes pueden compensar esa variabilidad, lo que contribuye a la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico.

Un hallazgo clave es que la combinación de recursos FNCER, como la energía solar y eólica, con los recursos hidráulicos tradicionales puede ser especialmente beneficiosa para el sistema eléctrico colombiano. En particular, las plantas FNCER en las regiones de Guajira (eólicas) y Cesar (solares) muestran una complementariedad notable con la generación hidráulica en los departamentos de Antioquia, Boyacá y Córdoba. Este resultado sugiere que la inversión en FNCER en estas regiones puede contribuir significativamente a la confiabilidad del sistema eléctrico colombiano, especialmente durante los períodos de estiaje en los que la generación hidráulica puede ser insuficiente.

Sin embargo, también se observan algunas excepciones en el análisis. Por ejemplo, las regiones de Cauca y Huila, que dependen en gran medida de la generación hidráulica, muestran una complementariedad limitada con otras fuentes de energía. Esto destaca la importancia de considerar las características específicas de cada región al planificar la expansión de la capacidad de generación.

## COMPLEMENTARIEDAD DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS

---

El estudio también subraya la necesidad de realizar análisis detallados de complementariedad en el diseño de políticas energéticas y estrategias de inversión. La complementariedad puede reducir los riesgos asociados con la variabilidad de la generación de energía y garantizar un suministro eléctrico confiable, lo que es esencial para el desarrollo sostenible y la resiliencia del sistema eléctrico colombiano.

Además, es importante destacar que las métricas de complementariedad utilizadas en este estudio, como el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de correlación de Kendall, ofrecen una base sólida para evaluar la idoneidad de diferentes combinaciones de fuentes de energía en un sistema. Estas métricas son herramientas valiosas para los planificadores energéticos y reguladores en Colombia y en otras regiones que buscan optimizar la integración de recursos de energía renovable en sus sistemas eléctricos.

En resumen, el estudio contribuye al conocimiento sobre la complementariedad de las fuentes de energía en el contexto colombiano y destaca la importancia de considerar estrategias de diversificación en la generación eléctrica. Estas estrategias pueden desempeñar un papel fundamental en la transición hacia un sistema eléctrico más sostenible, confiable y resistente a las variaciones climáticas y de demanda.

### REFERENCIAS

- [1] Python, «python,» Python Software Foundation, 1991. [En línea]. Available: <https://www.python.org/>. [Último acceso: Julio 2023].
- [2] IRENA, «IRENA,» Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.irena.org/publications/2017/May/Adapting-Market-Design-to-High-Shares-of-Variable-Renewable-Energy>. [Último acceso: 5 Julio 2023].
- [3] CREG, «apolo creg,» 8 Marzo 2019. [En línea]. Available: <http://apolo.creg.gov.co>. [Último acceso: 8 Julio 2023].
- [4] CREG, «GESTOR NORMATIVO - ALEJANDRIA,» 27 Diciembre 2017. [En línea]. Available: [https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_0201\\_2017.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0201_2017.htm). [Último acceso: Julio 2023].
- [5] CREG, «GESTOR NORMATIVO - ALEJANDRIA,» 14 Noviembre 2017. [En línea]. Available: [https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_0167\\_2017.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0167_2017.htm). [Último acceso: Julio 2023].
- [6] CREG, «apolo creg,» 19 Octubre 2007. [En línea]. Available: <http://apolo.creg.gov.co>. [Último acceso: Julio 2023].
- [7] CRENTRIO DE ENERGÍA, «Centro de Energía FCFM,» Julio 2017. [En línea]. Available: [https://energia.gob.cl/sites/default/files/2017\\_acera\\_estudio\\_potencia\\_de\\_suficiencia.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/2017_acera_estudio_potencia_de_suficiencia.pdf). [Último acceso: Julio 2023].
- [8] Battle, Mastropietro, Rodilla y Pérez, «THE SYSTEM ADEQUACY PROBLEM: LESSONS LEARNED FROM THE AMERICAN CONTINENT,» p. 32, 2015.
- [9] Clifford Chance, «Clifford Chance,» 30 Noviembre 2015. [En línea]. Available: [https://www.cliffordchance.com/briefings/2015/11/capacity\\_market\\_anemrprimer.html](https://www.cliffordchance.com/briefings/2015/11/capacity_market_anemrprimer.html). [Último acceso: Julio 2023].

- [10] National Grid, «nationalgridESO,» 25 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.emrdeliverybody.com/Prequalification>. [Último acceso: Julio 2023].
- [11] NYISO, «NYISO,» [En línea]. Available: <https://www.nyiso.com/>. [Último acceso: Julio 2023].
- [12] F. Pierry, «argus,» 9 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.argusmedia.com/en/news/2223251-brazil-begins-path-toward-power-capacity-market>. [Último acceso: Julio 2023].
- [13] Wikipedia, «Wikipedia La enciclopedia libre,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Correlaci%C3%B3n>. [Último acceso: Agosto 2023].
- [14] Wikipedia, «Wikipedia La enciclopedia libre,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente\\_de\\_correlaci%C3%B3n\\_de\\_Pearson](https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_correlaci%C3%B3n_de_Pearson). [Último acceso: Agosto 2023].
- [15] Wikipedia, «Wikipedia La enciclopedia libre,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente\\_de\\_correlaci%C3%B3n\\_de\\_rango\\_de\\_Kendall](https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_correlaci%C3%B3n_de_rango_de_Kendall). [Último acceso: Agosto 2023].
- [16] Henao, Vite, Rodriguez, Gomez y Dyner, «Annual and interannual complementarities of renewable energy sources in Colombia,» *ELSEVIER*.
- [17] S. Han, «Quantitative evaluation method for the complementarity of wind–solar–hydro power and optimization of wind–solar ratio,» *Apply Energy*, vol. 236, pp. 973-984, 2019.
- [18] B. Prado, «Complementariedad energética entre los recursos eólico y solar para la región Caribe colombiana,» Repositorio unal, 2020.
- [19] Statics Laerd, «statics Laerd,» [En línea]. Available: <https://statistics.laerd.com/statistical-guides/pearson-correlation-coefficient-statistical-guide.php>. [Último acceso: Agosto 2023].
- [20] Statics Laerd, «statics Laerd,» [En línea]. Available: <https://statistics.laerd.com/statistical-guides/spearmans-rank-order-correlation-statistical-guide-2.php>. [Último acceso: Agosto 2023].