

OLIGOPOLIO EN LOS MERCADOS DE ENERGIA: CASO COL...

Oligopolios en los mercados de energía eléctrica: caso Colombia

Iván Darío Gómez Rodríguez y John Sebastián Galvis González

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electricista

Director

Iván David Serna Suárez

Doctor Ingeniero Electricista

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisico-Mecanicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2025

Contenido

	Pág.
Introducción	8
1. Marco teórico	10
1.1 Oligopolio.	10
1.2 Poder de mercado.....	10
1.2.1 Índice De Herfindahl.Hirschman.	10
1.2.2 Índice de Lerner.	11
1.3 Correlación cruzada.	12
2.Extracción, selección y análisis de los datos de Sinergox Colombia.	13
2.1 Extracción de la información de Sinergox.....	13
2.1.1 Instalación de Python Y Vsc.....	13
2.2.1 Desarrollo del código de extracción de datos	14
2.2 Selección de los datos.	16
2.3 Estudio estadístico del mercado eléctrico.	22
3. Estudio de la influencia de la generación real y el precio de oferta sobre el precio de bolsa mediante correlación cruzada	24
3.1 Análisis de generación real vs precio de bolsa.	25
3.2 Análisis de precio de oferta vs precio de bolsa.....	32
3.3 Inspección de recursos más influyentes.....	38
4. Evolución temporal de los índices de Lerner y Herfindahl-Hirschman: análisis gráfico y clasificación por dominancia del mercado.....	41
4.1 Análisis del índice de Lerner.	41
4.2 Estudio del índice de Herfindahl-Hirschman.....	43

4.3 Clasificación de los índices.....	45
5. Conclusiones.....	47
6. Recomendaciones	48
Referencias Bibliográficas.....	50

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Ejemplo de las métricas extraíbles de la API</i>	15
Figura 2. <i>Aporte de energía por caudal a través del año</i>	20
Figura 3. <i>Correlación cruzada entre el aporte de caudal y el precio de bolsa</i>	21
Figura 4. <i>Cantidad de generadoras por agente</i>	22
Figura 5. <i>Capacidad total por agente</i>	23
Figura 6. <i>Comparación entre PPA4 y TVL1 en el mes de abril 2023</i>	25
Figura 7. <i>Comparación entre PPA4 y TVL1 en el mes de mayo 2023</i>	26
Figura 8. <i>Comparación entre PPA4 y TVL1 en el mes de junio 2023</i>	27
Figura 9. <i>Comparación entre PPA4 y TVL1 en el mes de julio 2023</i>	28
Figura 10. <i>Correlación de chivor</i>	29
Figura 11. <i>Comparación entre CHBG y TRM1 en el mes de enero 2023</i>	32
Figura 12. <i>Comparación entre CHBG y TRM1 en el mes de febrero 2023</i>	33
Figura 13. <i>Comparación entre CHBG y TRM1 en el mes de marzo 2023</i>	34
Figura 14. <i>Comparación entre CHBG y TRM1 en el mes de abril 2023</i>	35
Figura 15. <i>Correlaciones de san Carlos</i>	36
Figura 16. <i>Comparaciones del índice de lerner</i>	42
Figura 17. <i>Evolución temporal del índice de herfindahl-hirschman por recurso</i>	44
Figura 18. <i>Evolución temporal del índice de herfindahl-hirschman por agente</i>	45
Figura 19. <i>Porcentaje de participación de cada uno de los agentes del mercado</i>	46

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Recursos</i>	17
Tabla 2. <i>Recursos más influyentes en el mercado eléctrico</i>	39

Resumen

Título: Oligopolio en los mercados de energía eléctrica: caso Colombia*

Autor: John Sebastián Galvis González & Iván Darío Gómez Rodríguez**

Palabras Clave: Oligopolio, Poder de Mercado, Teoría de Juegos, Mercados de Energía Eléctrica, Tarifación

Descripción:

En los mercados actuales, es común que pocas empresas dominen sectores clave, como el energético, lo que puede afectar la competencia y los precios. Este proyecto tiene como objetivo identificar si el mercado energético colombiano presenta características oligopolistas al aplicar indicadores para medir el poder de mercado.

El análisis se alimentó de los datos disponibles a través de la API en Python de Sinergox. La plataforma centralizada de información del mercado mayorista colombiano de energía eléctrica, administrada por XM. Luego, se empleó R para evaluar los recursos energéticos y estudiar las correlaciones cruzadas, buscando patrones que indicaran concentración de mercado. Se utilizaron índices de poder de mercado, como el índice de Herfindahl-Hirschman (HHI) y el índice de Lerner, para medir la capacidad de las empresas de influir en el precio de bolsa y evaluar su control sobre la oferta energética, además se analizó la participación de cada agente en el mercado de energía eléctrica.

Los resultados indicaron que el mercado eléctrico colombiano tiende hacia una estructura oligopolista, donde pocas empresas controlan la mayoría de la generación eléctrica. Este control podría estar siendo utilizado para maximizar sus beneficios, lo que plantea preocupaciones sobre el impacto en los precios y la competencia. Este hallazgo resalta la importancia de una regulación más estricta para garantizar un mercado más competitivo y equilibrado.

*Trabajo de grado

**Facultad de Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: Iván David Serna Suárez. Doctor Ingeniero Electricista.

Abstract

Title: Oligopoly in electricity markets: the case of Colombia *

Author: John Sebastián Galvis González, Iván Darío Gómez Rodríguez **

Key Words: Oligopoly, Market Power, Game Theory, Electricity Markets, Tariffing

Description:

In today's markets, it is common for a few companies to dominate key sectors, such as energy, which can affect competition and pricing. This project aims to identify if the Colombian energy market exhibits oligopolistic characteristics by applying indicators to measure market power.

The analysis was based on data accessed through the Python API of Sinergox, the centralized information platform for Colombia's wholesale electricity market. R was then used to evaluate energy resources and study cross-correlation, seeking patterns that indicate market concentration. Market power indices, such as the Herfindahl-Hirschman Index (HHI) and the Lerner Index, were employed to measure companies' ability to influence the spot price and assess their control over energy supply. Additionally, the market share of each agent in the electricity market was analyzed.

The results indicated that the Colombian electricity market tends toward an oligopolistic structure, where a few companies control most of the electricity generation. This control may be used to maximize their profits, raising concerns about its impact on prices and competition. This finding underscores the importance of stricter regulation to ensure a more competitive and balanced market.

*Degree work

** Faculty of Physics and Mechanics. School of Electrical, Electronic and Telecommunication Engineering. Electrical Engineering. Director: Iván David Serna Suárez. Doctor of Electrical Engineering.

Introducción

En el mundo post pandemia, el análisis de los oligopolios se ha convertido en un tema de gran relevancia tanto en el ámbito político como social; este fenómeno conlleva impactos en diversos aspectos de la vida cotidiana de los ciudadanos de economías en desarrollo, así como en economías desarrolladas.

En primer lugar, es crucial comprender qué implica el concepto de oligopolio en el contexto del mercado de energía eléctrica colombiano. Se hace referencia a la concentración del poder de mercado en manos de unas pocas empresas, que dominan la generación y distribución de energía eléctrica en el país. Esta concentración plantea desafíos significativos y puede tener repercusiones negativas ya que, como dice el catedrático en economía (Palazuelos, 2019), “los oligopolios son una deformación de las condiciones naturales de competencia, que genera distorsiones en la economía y provoca un deterioro en los resultados productivos” (p.21).

Una de las problemáticas más evidentes es la falta de competencia real en el mercado eléctrico. Las barreras para que nuevas empresas ingresen y compitan en igualdad de condiciones son altas, lo que limita la diversidad de opciones para la comercialización y transmisión de energía. Además, esta falta de competencia puede obstaculizar la innovación en el sector, ya que las empresas establecidas pueden carecer de incentivos para invertir en tecnologías más eficientes y sostenibles.

Otro aspecto crítico es el impacto en los precios de la energía eléctrica. Las empresas que conforman el oligopolio tienen un alto grado de poder para influir en los precios y tomar decisiones estratégicas en beneficio propio. Esto puede resultar en costos más elevados para los consumidores, quienes se ven afectados directamente en sus finanzas.

Es debido a estas implicaciones económicas y sociales que es necesario identificar y analizar las causas de esta manipulación de precios en el mercado de energía eléctrica y evidenciar si existen empresas que puedan estar ejerciendo poder de mercado. Este trabajo de grado representa un paso hacia un sistema eléctrico más transparente y equitativo, esperando que la detección temprana de estas prácticas permita la implementación de medidas más efectivas por parte de las autoridades reguladoras.

1. Marco teórico

En este capítulo, se hará una exposición sobre los conceptos fundamentales para comprender el trabajo de grado. Este resulta necesario, no solamente como punto de partida de la teoría, sino también como fase inicial del proceso que se debía emprender para dar forma y coherencia a la investigación. Aquí se delinearán los pilares teóricos y metodológicos que sustentan el enfoque, así como los antecedentes necesarios para contextualizar el estudio.

1.1 Oligopolio.

El oligopolio es el tipo de mercado donde solo unas pocas empresas controlan un determinado producto o en su caso productos similares. En esta se presentan problemas como lo es el poder de mercado, ya que cada empresa ejerce cierto grado de poder sobre los precios o la cantidad producida. En este tipo de mercado, una empresa al bajar sus precios para obtener clientes afecta directamente a sus competidores, y el éxito de su estrategia depende de cómo estas respondan.

1.2 Poder de mercado.

Capacidad que tiene una empresa o un conjunto de empresas de aumentar o disminuir valores como el precio o la cantidad producida, además de influir en otras condiciones del mercado. La presencia de esta puede surgir de factores como la concentración del mercado, las barreras de entrada y el control sobre los recursos claves. A continuación, se presentarán dos índices que pueden ser utilizados para medir cuantitativamente el poder de mercado.

1.2.1 Índice De Herfindahl.Hirschman.

Este mide la distribución de participación de las empresas en el campo de acción. En este se pueden identificar formas de hallar la concentración como es el índice de Herfindahl-Hirschman

(HHI), este en resumen se calcula con la sumatoria de los cuadrados de las participaciones de mercado de las empresas líderes.

$$HHI = \sum_{i=1}^N s_i^2 \quad (1)$$

Donde s_i representa la participación de mercado de la empresa i .

El HHI presenta muchas ventajas, como proporcionar una medida precisa de la concentración y su fácil interpretación. Las agencias generalmente clasifican la concentración de mercado en 3 tipos:

- Baja concentración: HHI inferiores a 1500
- Concentración moderada: HHI entre 1500 y 2500
- Alta concentración: HHI superiores a 2500

Ahora un ejemplo sería el siguiente, un mercado con 6 empresas con participaciones del 35%, 25%, 25%, 8%, 4% y 3%, su HHI sería del 2564 una alta concentración. Algo que debería ser regulado. Estos datos fueron obtenidos del *Merger Guidelines* (U.S. Department of Justice & Federal Trade Commission, 2010).

1.2.2 Índice de Lerner.

Con este índice se miden los beneficios de una empresa con relación al precio del producto en el mercado. Es calculado como la diferencia entre el precio y el costo marginal, dividida por el precio. Es de aclarar que entre mayor sea su valor, más poder ejerce está en el mercado.

$$L_i = \frac{P - MC}{P} \quad (2)$$

Donde P es el precio y MC es el costo marginal.

El índice tiene ventajas como su sencillez de cálculo y proporciona una indicación clara del poder de mercado de una empresa: donde valores cercanos a cero indican una baja capacidad

para fijar precios por encima del costo marginal, lo que sugiere un mercado más competitivo. En cambio, valores próximos a uno reflejan un alto poder de mercado, permitiendo establecer precios muy por encima del costo marginal.

Un ejemplo sobre Lerner sería, una empresa oferta un producto a \$1000 y su costo marginal es \$600, el índice de Lerner nos daría 0,4, lo que significa que la empresa tiene un 40% del poder de fijar el precio por encima del costo marginal. Parte de esto se obtuvo del libro *The Concept of Monopoly and the Measurement of Monopoly Power* (Lerner, 1934)

1.3 Correlación cruzada.

La correlación cruzada mide la similitud entre dos series temporales en función de un desfase o lag. Permite identificar como los cambios de una variable se asocian a los cambios en otra, desplazada en el tiempo. Matemáticamente, es definida como:

$$\rho_{XY}(k) = \frac{Cov(X_t, Y_{t-k})}{\sigma X * \sigma Y} \quad (3)$$

Donde X_t y Y_t son las dos series temporales, k es el lag, $Cov(X_t, Y_{t-k})$ es la covarianza entre X y Y con desplazamiento k , y σX y σY son las desviaciones estándar respectivas. Su uso es fundamental para estudiar relaciones de liderazgo o rezago entre variables económicas (Cryer & Chan, 2010).

Los valores claves pertenecientes son las magnitudes de la correlación que representan la fuerza de la relación entre las series, donde los valores van de 1 a -1 donde 1 significa una correlación fuerte positiva, -1 una correlación fuerte negativa y 0 sugiere poca correlación. Además, algo de igual importancia es el rango del lag donde para el proyecto se tomarán con mayor importancia los datos cercanos al lag 0.

2.Extraccion, selección y análisis de los datos de Sinergox Colombia.

Este capítulo presentara el desarrollo de los primeros pasos necesario para el desarrollo de los objetivos planteados en este trabajo de grado. El primer paso consiste en la extracción de información de las diversas entidades que participan en la bolsa del mercado eléctrico colombiano. Este proceso se llevó a cabo utilizando el lenguaje de programación Python, seleccionado por su compatibilidad con la API de Sinergox, la base de datos del mercado eléctrico administrada por XM. Una vez obtenida la información, se avanzó en el desarrollo de los objetivos planteados.

En la fase inicial, se empleó el lenguaje R para la búsqueda, selección y organización de los datos a fin de facilitar su análisis. Posteriormente, se procedió a separar los datos según distintas métricas consideradas relevantes. En los siguientes subcapítulos, se detallan los pasos realizados para alcanzar estos objetivos.

2.1 Extracción de la información de Sinergox

Este subcapítulo presenta todos los procedimientos necesarios para extraer la información sobre el mercado eléctrico colombiano de Sinergox utilizando su API a través de Python. Estos procedimientos abarcaran desde la instalación de Python, hasta la creación del código que permite organizar la información relevante para el proyecto en diferentes carpetas, para posteriormente ser usadas para realizar los respectivos análisis por medio del lenguaje R.

2.1.1 Instalación de Python Y Vsc

El proceso de extracción de datos comenzó en la instalación de Python y el editor de código fuente Visual Studio Code. La instalación de Python se llevó a cabo accediendo a su sitio web oficial, donde se descargó la versión más reciente disponible. Además, para el manejo de los scripts se dio uso de Vsc. La instalación de igual manera es sencilla, solo buscándolo en la web y dando

descarga a su versión más actual. Una vez completada la instalación de ambos programas, se procede con el desarrollo de la programación.

2.2.1 Desarrollo del código de extracción de datos

Para la implementación del código, se plantearon dos cuestiones iniciales. La primera consistió en determinar la clase de los datos proporcionados por Sinergox, determinando que correspondían a un Dataframe, resultando conveniente, ya que R es compatible con esta clase de datos. La segunda cuestión fue establecer el método para transferir los datos de Python a R. Para resolver esto, se investigaron diferentes bibliotecas de Python, donde se concluyó que la más adecuada para esta tarea era msgpack, a continuación se explica la base del código, el código completo se encuentra en el anexo A.1 “datos.py”.

Con estas cuestiones resueltas, el desarrollo del código comenzó, con la importación de las bibliotecas necesarias, iniciando con pydataxm, la API usada para conectar y extraer datos desde Sinergox, seguida de pandas, datetime y msgpack. Una vez importadas, se procedió a asignar los datos extraídos mediante pydataxm a una variable denominada objetoAPI, de la siguiente manera:

➤ `objetoAPI=pydataxm.ReadDB()`

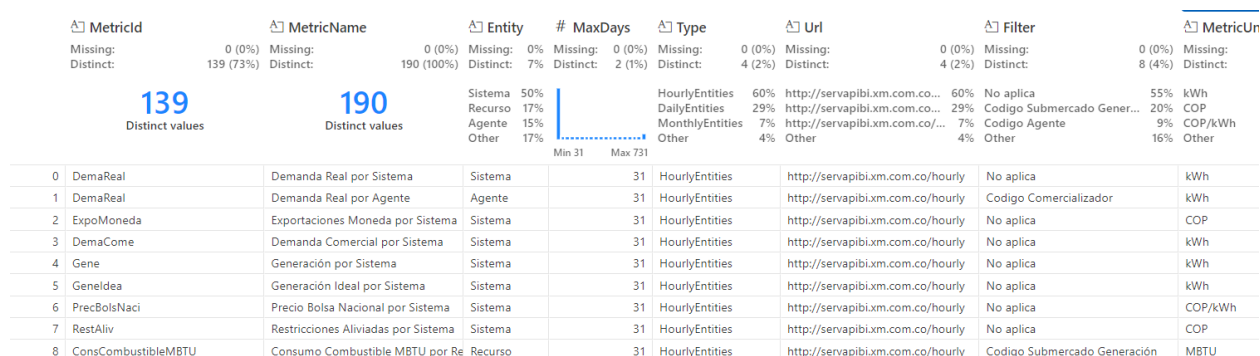
Sin embargo, este formato no es visualizable a través de Python, y solo sirve para extraer los datos dependiendo de los parámetros que se consulten. En consecuencia, se hizo necesario almacenar la información en una variable tipo DataFrame utilizando el siguiente comando:

➤ `df=objetoAPI.get_collections()`

De esta manera, es posible mediante las capacidades de visualización de VisualCode inspeccionar fácilmente la Dataframe, ver Figura 1.

Figura 1.

Ejemplo de las métricas extraíbles de la API.



Nota: Ejemplo de las primeras 9 métricas contenidas en la base de datos de Sinergox.

Con el Conocimiento de las métricas disponibles para consulta, se procedió a generar los parámetros necesarios para realizar la consulta en los datos contenido en objetoAPI mediante el siguiente comando:

```
➤ df_precioOferta=objetoAPI.request_data('precioOfertaDesp', 'Recurso', FechaInicio, FechaFinal)
```

Donde el precio de oferta se utilizará como ejemplo y además seguirá siendo referenciado a lo largo de esta sección. Los parámetros incluían el nombre de identificación de la métrica, el tipo de entidad, la fecha inicial y la fecha final. Para la identificación y la entidad, se empleo el dataframe previamente visualizado en la Figura 1. Las fechas se crearon mediante el uso de la librería datetime, como se muestra en el siguiente ejemplo:

```
➤ df_precioOferta['Date']=df_precioOferta['Date'].dt.strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')
```

Las cuales abarcarían desde septiembre del 2022 hasta el septiembre de 2023, cubriendo un año completo de datos. Sin embargo, es importante destacar que las fechas debían ajustarse para cada mes del año analizado. Además, se agregaron dos líneas de código destinadas a

modificar el formato como se muestra la fecha, además de eliminar una columna contenida por las métricas llamada 'Id', con el fin de evitar problemas en los procedimientos que ocasionaba.

Para concluir con el proceso de extracción de datos, se empleó msgpack para almacenar las métricas de los meses consultados, de la siguiente manera:

```
➤ file_name='PrecioOfertaAgo23.msgpack'  
➤ with open(file_name, 'wb') as f:  
    f.write(msgpack.packb(df_PrecioOferta.to_dict(orient='records')))
```

Donde se visualiza la forma de nombrar el archivo combinando el nombre de la métrica, el mes y el año, además de darle la terminación msgpack. Posteriormente, se hace la escritura del archivo, que se guarda en la carpeta correspondiente según su mes y año, carpeta encontrada en el anexo A.2.

2.2 Selección de los datos.

En el mercado eléctrico colombiano, existen distintas empresas que desempeñan un papel fundamental en la comercialización, transmisión y generación de energía. Ejemplos notables incluyen empresas como EPM y ENEL, que tienen una influencia significativa en el suministro eléctrico nacional. Como es evidente, la mayoría de estas empresas, tienen bajo su dominio diferentes generadoras que son esenciales para cumplir su papel en la generación del país. Para este estudio específico, se enfocará en analizar detalladamente cada una de estas generadoras que participan en la bolsa nacional.

Los datos proporcionados por Sinergox ofrecen una visión completa de las 72 generadoras analizadas dentro del rango de tiempo considerado, que se encontraban enlistadas en la bolsa que participan en el mercado mayorista de energía. Estas generadoras se dividen en dos categorías principales: hidroeléctricas y termoeléctricas. La Tabla 1, que se presenta a continuación, enumera

estas generadoras y las empresas a las que pertenecen, junto a otros parámetros relevantes. Dado que en Sinergox las generadoras son nombradas Recursos, se usará este mismo nombre para los procedimientos, de igual manera para las empresas dirigen dichos recursos, que se nombraran agentes. Por último, una aclaración importante es que hay 4 recursos que no contaban con información dentro de la API, pero hacían parte de los recursos que ofertaban en la bolsa; por esto se tomaron en cuenta y se usaron líneas para denotar la falta de información de estos.

Tabla 1.*Recursos.*

Codigo Del Recurso	Nombre Del Recurso	Tipo De Recurso	Capacidad Del Recurso (Kw)	Codigo Del Agente	Nombre Del Agente
2QEK	Salto Ii	Hidraulica	35000	ENDG	Enel Colombia
2R22	Laguneta	Hidraulica	18000	ENDG	Enel Colombia
3ENA	Tesorito	Termica	200000	EPSG	Celsia
ALBG	Alban	Hidraulica	427000	EPSG	Celsia
CHBG	Betania	Hidraulica	540000	ENDG	Enel Colombia
CHVR	Chivor	Hidraulica	1000000	CHVG	Aes Colombia & Cia
CLL1	Carlos Lleras	Hidraulica	78000	HDPG	Hidroelectrica Del Alto Porce
CLMG	Calima	Hidraulica	132000	EPSG	Celsia
CTG1	Cartagena 1	Termica	52000	NTCG	Nitro Energy Colombia
CTG2	Cartagena 2	Termica	60000	NTCG	Nitro Energy Colombia
CTG3	Cartagena 3	Termica	66000	NTCG	Nitro Energy Colombia
CUC1	Cucuana	Hidraulica	56000	EPSG	Celsia
DVS1	Dario Valencia Samper	Hidraulica	150000	ENDG	Enel Colombia
ESMR	Esmeralda	Hidraulica	30000	EPMG	Empresas Publicas De Medellin
GE32	Gecelca 32	Termica	273000	GECG	Generadora Y Comercializadora De Energia Del Caribe

GEC3	Gecelca 3	Termica	164000	GECG	Generadora Y Comercializadora De Energia Del Caribe
GTPE	Guatape	Hidraulica	560000	EPMG	Empresas Publicas De Medellin
GTRG	Guatron	Hidraulica	512000	EPMG	Empresas Publicas De Medellin
GVIO	Guavio	Hidraulica	1250000	ENDG	Enel Colombia
HMIN	Escuela Minas	Hidraulica	55000	HDPG	Hidroelectrica Del Alto Porce
HMLG	Miel I	Hidraulica	396000	ISGG	Isagen
JAG1	---	---	---	---	---
JAGS	Jaguas	Hidraulica	170000	ISGG	Isagen
LTSJ	La Tasajera	Hidraulica	306000	EPMG	Empresas Publicas De Medellin
MOY1	Amoya La Esperanza	Hidraulica	80000	ISGG	Isagen
MRL1	Merilectrica 1	Termica	164000	EPSG	Celsia
PES1	Ituango	Hidraulica	580000	EPMG	Empresas Publicas De Medellin
PGUG	Pagua	Hidraulica	600000	ENDG	Enel Colombia
PLYS	Playas	Hidraulica	207000	EPMG	Empresas Publicas De Medellin
PPA1	Paipa 1	Termica	36000	HIMG	Gestion Energetica
PPA2	Paipa 2	Termica	72000	HIMG	Gestion Energetica
PPA3	Paipa 3	Termica	70000	HIMG	Gestion Energetica
PPA4	Paipa 4	Termica	165000	SOCG	Compañía Electrica De Sochagota
PRC2	Porce Ii	Hidraulica	405000	EPMG	Empresas Publicas De Medellin
PRC3	Porce Iii	Hidraulica	700000	EPMG	Empresas Publicas De Medellin
PRDO	Prado	Hidraulica	51000	EPSG	Celsia
PRG1	Proelectrica 1	Termica	45000	PRIG	Proelectrica
PRG2	Proelectrica 2	Termica	45000	PRIG	Proelectrica
QUI1	El Quimbo	Hidraulica	400000	ENDG	Enel Colombia
RUB1	---	---	---	---	---
SLVJ	Salvajina	Hidraulica	315000	EPSG	Celsia
SMI1	San Miguel	Hidraulica	50000	ISGG	Isagen
SNCR	San Carlos	Hidraulica	1240000	ISGG	Isagen
SNFR	San Francisco	Hidraulica	135000	EPMG	Empresas Publicas De Medellin
SOG1	Sogamoso	Hidraulica	819000	ISGG	Isagen

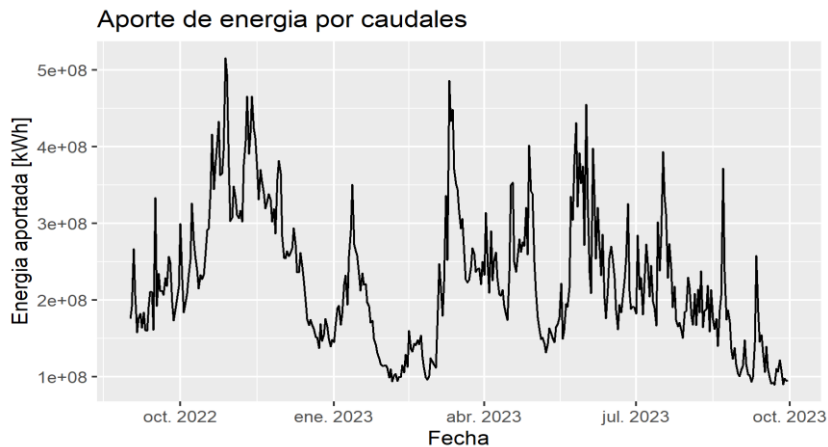
TBQ3	Barranquilla 3	Termica	60000	TBSG	Termobarranquilla
TBQ4	Barranquilla 4	Termica	60000	TBSG	Termobarranquilla
TBST	Tebsab Cc	Termica	791000	TBSG	Termobarranquilla
TCD1	---	---	---	---	---
TCD2	---	---	---	---	---
TDR1	Termodorada 1	Termica	51000	EPMG	Empresas Publicas De Medellin
TEC1	Termoemcali Cc	Termica	229000	TEMG	Termoemcali
TFL1	Flores I Cc	Termica	160000	TMFG	Prime Termoflores
TFL4	Flores 4 Cc	Termica	445000	TMFG	Prime Termoflores
TGJ1	Guajira 1	Termica	151000	GECG	Generadora Y Comercializadora De Energia Del Caribe
TGJ2	Guajira 2	Termica	145000	GECG	Generadora Y Comercializadora De Energia Del Caribe
TRM1	Termocentro Cc	Termica	272000	TCNG	Generadora Termocentro
TRN1	Termonorte	Termica	88000	TMNG	Termonorte
TSJ1	Tasajero 1	Termica	165000	TRMG	Termotasajero
TSJ2	Tasajero 2	Termica	170000	TERG	Termotasajero Dos
TSR1	Termosierra Cc	Termica	428000	EPMG	Empresas Publicas De Medellin
TVL1	Termovalle	Termica	241000	TMVG	Prime Termovalle
TYP1	Termoyopal 1	Termica	8000	TYPG	Termoyopal Generacion 2
TYP2	Termoyopal 2	Termica	28000	TYPG	Termoyopal Generacion 2
TYP3	Termoyopal 3	Termica	50000	TYPG	Termoyopal Generacion 2
TYP4	Termoyopal 4	Termica	50000	TYPG	Termoyopal Generacion 2
TYP5	Termoyopal 5	Termica	50000	TYPG	Termoyopal Generacion 2
URA1	Urra	Hidraulica	338000	EMUG	Empresa Urra
ZPA2	Zipaemg 2	Termica	36000	ENDG	Enel Colombia
ZPA3	Zipaemg 3	Termica	63000	ENDG	Enel Colombia
ZPA4	Zipaemg 4	Termica	64000	ENDG	Enel Colombia
ZPA5	Zipaemg 5	Termica	63000	ENDG	Enel Colombia

Nota: tabla con cada uno de los recursos que ofertan en la bolsa.

Se observa que la bolsa de energía del país está controlada en su totalidad por hidroeléctricas y termoeléctricas. Esto se debe en parte a la dependencia del país de fuentes renovables, especialmente los recursos hídricos. Sin embargo, las termoeléctricas también intervienen cuando el caudal es bajo. A continuación, se presentan 2 maneras en la que se observa como el caudal afecta la generación entre las hidroeléctricas y las termoeléctricas, iniciando por la Figura 2. El cual muestra los cambios en el caudal a través de un año.

Figura 2.

Aporte de energía por caudal a través del año.



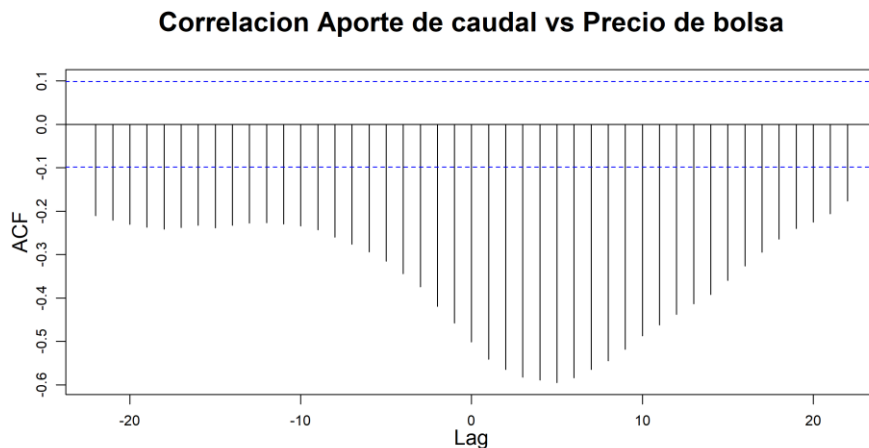
Nota: gráfico del caudal a lo largo de un año.

Estos cambios muestran los momentos en donde las hidroeléctricas más pueden generar como son en los puntos más altos del gráfico y en los bajos cuando las termoeléctricas deben generar. Esto es de gran importancia, ya que, al realizar los futuros análisis, es probable que las diferentes gráficas que se examinen muestren este tipo de tendencias en el suministro eléctrico, especialmente en las plantas termoeléctricas, las cuales experimentarán mayores demandas en ciertos momentos específicos del año, mientras que en otros es posible que ni siquiera produzcan energía.

La segunda manera corresponde a la correlación cruzada entre el caudal y el precio de bolsa que se observa en la Figura 3, donde se muestra cómo el aporte de caudal afecta el precio de bolsa. En esta figura, se presta especial atención a los valores cercanos a 0 en el eje X, ya que son los más relevantes para mostrar la influencia directa entre ambas métricas. En este caso, se observa que entre un lag de -3 a 4, es decir, entre 3 días antes y 4 días después, la relación entre el aporte del caudal y el precio de bolsa es considerablemente alta de una manera inversamente proporcional. Esto sugiere que un mayor aporte de caudal tiende a reducir el precio de bolsa, o viceversa, un menor caudal está asociado a un aumento del precio. Esta relación inversamente proporcional es esperada, dado que las hidroeléctricas generan electricidad a un costo menor que las termoeléctricas; por lo tanto, cuando las hidroeléctricas pueden aumentar su generación, el precio de la energía tiende a disminuir, mientras que una reducción en su generación provoca un incremento en los precios.

Figura 3.

Correlación cruzada entre el aporte de caudal y el precio de bolsa.



Nota: correlación que muestra el cambio del precio de bolsa en relación con el caudal.

Es importante señalar para futuros análisis que, al realizar las gráficas, se agregaron líneas de referencia, las cuales delimitan un umbral llamado intervalo de confianza, de modo que solo aquellos datos que lo superen serán considerados relevantes para el análisis.

2.3 Estudio estadístico del mercado eléctrico.

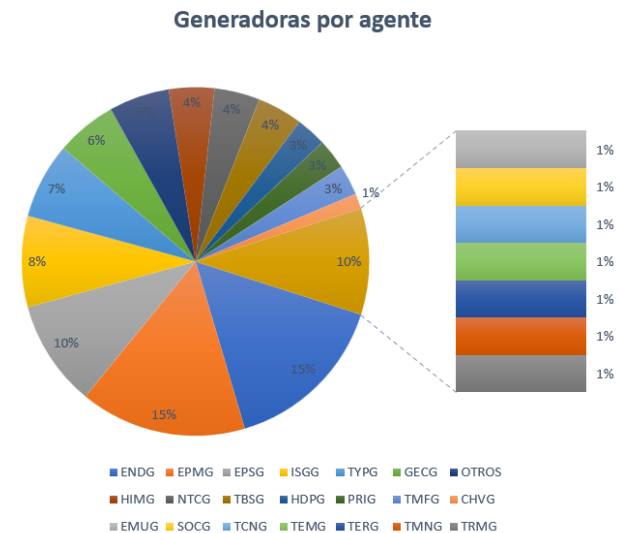
Como parte de los objetivos, se planteó realizar un análisis estadístico del mercado eléctrico. Para ello, se generaron diversas tablas y gráficos que facilitan la visualización de los datos más relevantes presentados en el subcapítulo anterior. En este análisis, se distinguieron dos factores principales: el número de generadoras por agente y la capacidad total por agente.

A continuación, se presenta una tabla y un gráfico correspondientes al número de generadoras por agente (ver Figura 4).

Figura 4.

Cantidad de generadoras por agente.

CODIGO DEL AGENTE	CANTIDAD
ENDG	11
EPMG	11
EPSG	7
ISGG	6
TYPG	5
GECG	4
OTROS	4
HIMG	3
NTCG	3
TBSG	3
HDPG	2
PRIG	2
TMFG	2
CHVG	1
EMUG	1
SOCG	1
TCNG	1
TEMG	1
TERG	1
TMNG	1
TRMG	1



Nota: tabla con las generadoras por cada agente y su grafico porcentual.

En el mercado actual, el 48% de la cantidad de generadoras del país es controlada por un grupo reducido de agentes. Entre ellos, destacan ENEL (ENDG) y EPM (EPMG), con un 15% de las generadoras cada una, mientras que CELSIA (EPSG) controla un 10% e ISAGEN (ISGG) un 8% de las generadoras. Esto demuestra que, de los 20 agentes presentes en la generación de Colombia, estas cuatro empresas concentran una parte considerable del poder en el sector eléctrico, al controlar cerca de la mitad de las generadoras del país.

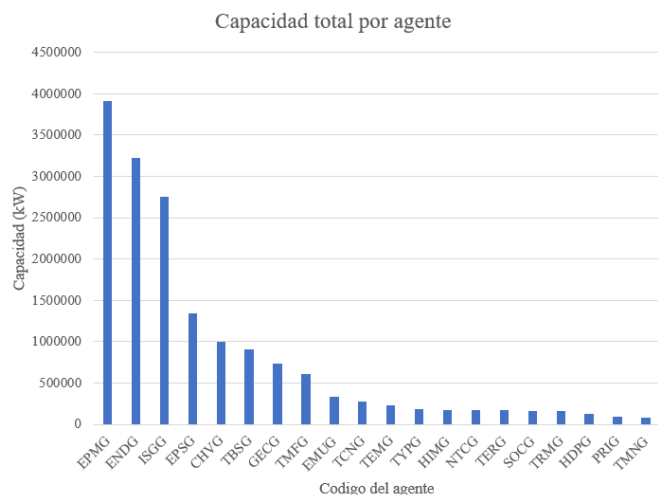
En los análisis posteriores, se tendrán en cuenta estos datos, ya que es razonable suponer que los recursos de estos cuatro agentes podrían estar ejerciendo un poder de mercado significativo, debido a la gran influencia que tienen en el sector.

El siguiente factor para analizar es la capacidad controlada por cada agente, la cual se presenta en el diagrama de barras de la Figura 5.

Figura 5.

Capacidad total por agente.

CODIGO DEL AGENTE	CAPACIDAD DEL AGENTE (kW)
EPMG	3914000
ENDG	3219000
ISGG	2755000
EPSG	1345000
CHVG	1000000
TBSG	911000
GECG	733000
TMFG	605000
EMUG	338000
TCNG	272000
TEMG	229000
TYPG	186000
HIMG	178000
NTCG	178000
TERG	170000
SOCG	165000
TRMG	165000
HDPG	133000
PRIG	90000
TMNG	88000



Nota: tabla con la capacidad de cada agente y gráfico de barras.

La capacidad, como era de esperarse, está principalmente en manos de los agentes con mayor número de generadoras, como EPM (23%), ENEL (19%), ISAGEN (17%) y CELSIA (8%), cada una superando los 1000 MW. Además, resulta notable el caso de Chivor, que también alcanza este umbral de capacidad.

El diagrama de barras muestra claramente la superioridad de estos agentes en el mercado eléctrico, estimándose que controlan el 67% de la generación total. Aunque en el país existen 20 agentes que participan en la generación del país, solo cuatro dominan la mayor parte de la capacidad de generación. Esto subraya la importancia de analizar los recursos de estas empresas, ya que podrían estar ejerciendo un poder significativo en el mercado.

3. Estudio de la influencia de la generación real y el precio de oferta sobre el precio de bolsa mediante correlación cruzada

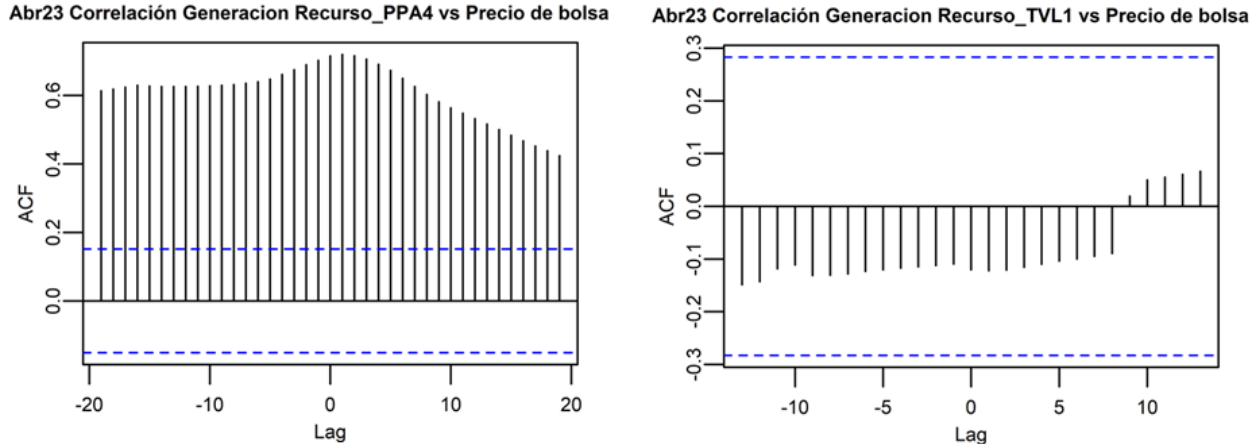
Con el entendimiento de los datos obtenidos a través de Sinergox, el siguiente paso consistió en observar cómo estas generadoras afectan el precio de bolsa, ya que esta es una de las formas de identificar cuáles de ellas podrían estar utilizando el poder de mercado en su beneficio. Para esta sección, se llevarán a cabo dos análisis principales: la comparación de la generación real y el precio de oferta de las generadoras con el precio de la bolsa en un gráfico, y el uso de la correlación cruzada, que será la herramienta más importante para este análisis. Todo este análisis se llevó a cabo utilizando un código desarrollado en RStudio. Cabe destacar que todas las imágenes correspondientes a las correlaciones se encuentran en los Anexos B y C.

3.1 Análisis de generación real vs precio de bolsa.

En este subcapítulo se realizarán comparaciones entre diferentes generadoras para observar su comportamiento en términos de uso de poder de mercado. Para ello, se emplearon correlaciones cruzadas entre la generación real y el precio de bolsa, aclarando que la generación real corresponde al valor que generó el recurso en ese momento. Como ejemplo inicial, se utilizarán las generadoras Paipa4 (PPA4) y Termovalle (TVL1), ambas termoeléctricas. Se analizarán figuras correspondientes a cuatro meses del año, tomados como muestra para el trabajo de grado. El código utilizado para la generación de estas figuras se encuentra en el anexo A.1 “líderes por mes”. La Figura 6

Figura 6.

Comparación entre PPA4 y TVL1 en el mes de abril 2023.



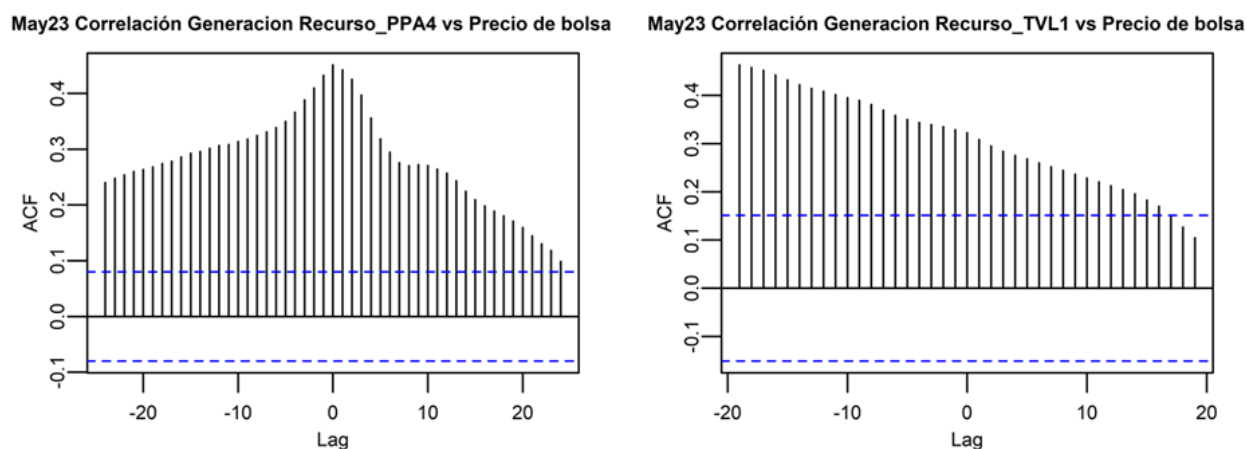
Nota: Gráficos de correlación cruzada de la generación real vs el precio de bolsa, de los recursos PPA4 y TVL1 del mes de abril del 2023.

Como se puede observar en la Figura 6, se evidencian dos comportamientos muy diferentes entre ambas generadoras. Claramente, Paipa4 (PPA4) tiene un impacto significativamente mayor en el precio de bolsa, mostrando valores positivos muy altos que afectan tanto a las horas anteriores

como a los posteriores y especialmente en lags cercanos al cero. Este comportamiento genera un mayor precio en la bolsa. En contraste, Termovalle (TVL1) no representa un impacto significativo en el precio de bolsa; aunque muestra valores algo elevados, estos no superan el umbral de confianza, por lo que no son representativos. Por esta razón, Termovalle(TVL1) podría ser considerado un objetivo para descartar en los análisis realizados por lo menos en este mes.

Figura 7.

Comparación entre PPA4 y TVL1 en el mes de mayo 2023 .



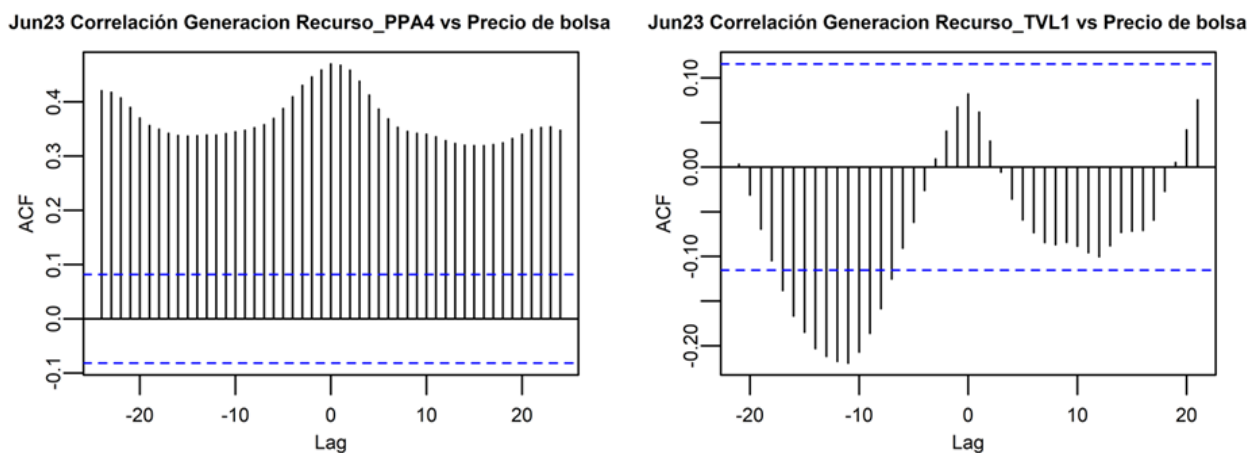
Nota: Gráficos de correlación cruzada de la generación real vs el precio de bolsa, de los recursos PPA4 y TVL1 del mes de mayo del 2023.

Ahora al analizar el mes de mayo (ver Figura 7), se observan cambios significativos en ambas correlaciones. En primer lugar, Paipa4 (PPA4) mantiene un impacto similar al del mes anterior, superando en todo momento el umbral, lo que indica que afectó el precio de bolsa, incrementándolo a lo largo de las horas. Es notable que su mayor punto de correlación positiva se dio cerca del lag cero, lo que demuestra un impacto directo en el precio de bolsa y puede interpretarse como un indicio de poder de mercado. En contraste, Termovalle (TVL1) muestra un cambio en su impacto, ya que ahora también supera el umbral y mantiene valores positivos. Esto

sugiere que ha contribuido al aumento del precio de bolsa. Sin embargo, el mayor umbral lo presenta en los lag negativos lo cual indica que más que el afectar al mercado, el mercado le afecta a él, siendo el quien debe adaptarse.

Figura 8.

Comparación entre PPA4 y TVL1 en el mes de junio 2023.

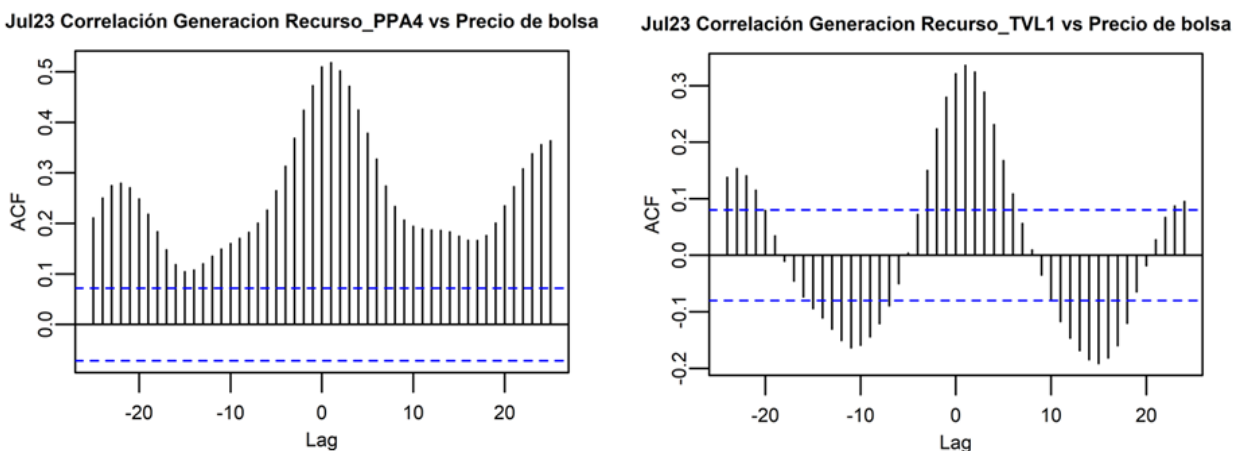


Nota: Gráficos de correlación cruzada de la generación real vs el precio de bolsa, de los recursos PPA4 y TVL1 del mes de junio del 2023.

En el mes de junio (ver Figura 8), Paipa4 (PPA4) se mantuvo en un rango de valores similar al de los meses anteriores, lo que indica que tiende a provocar un aumento en el precio de bolsa después de su generación. Es importante destacar que sigue mostrando la misma tendencia de incrementar el precio en sus lags cercanos a 0. Por otro lado, Termovalle (TVL1) experimentó un cambio notable con respecto al mes anterior, ya que dejó de representar un problema para el precio. En general, sus valores en lags cercanos a 0 no superan el umbral, lo que sugiere que su impacto es insignificante.

Figura 9.

Comparación entre PPA4 y TVL1 en el mes de julio 2023.



Nota: Gráficos de correlación cruzada de la generación real vs el precio de bolsa, de los recursos PPA4 y TVL1 del mes de julio del 2023.

En el mes de julio, como se muestra en la Figura 9, Paipa4 (PPA4) continuó manteniéndose en un rango de valores similar al de los meses anteriores, que es generalmente positivo. Este mes presentó la tendencia más alta en el lag 0, lo que representa un impacto directo en el precio de bolsa. Por otro lado, Termovalle (TVL1) experimentó un mayor impacto este mes y se observa cómo generó un efecto directo en el precio de bolsa en los momentos en que apenas generó.

Terminado el análisis, se ve la diferencia entre la correlación de un recurso que tiene un alto impacto general, como es Paipa4 (PPA4), y otro que puede tener un impacto moderado, como Termovalle (TVL1), en el precio de bolsa. Paipa4 (PPA4) muestra una influencia constante durante los cuatro meses analizados, mientras que Termovalle (TVL1) solo presenta impactos en algunas ocasiones, los cuales, en general, presenta una correlación débil.

El siguiente procedimiento utilizado para esta parte del análisis se realizó con cada uno de los recursos para entender su influencia dentro del mercado, como ejemplo se seleccionó para el caso del estudio a una hidroeléctrica representativa, Chivor (CHVR), por su capacidad de

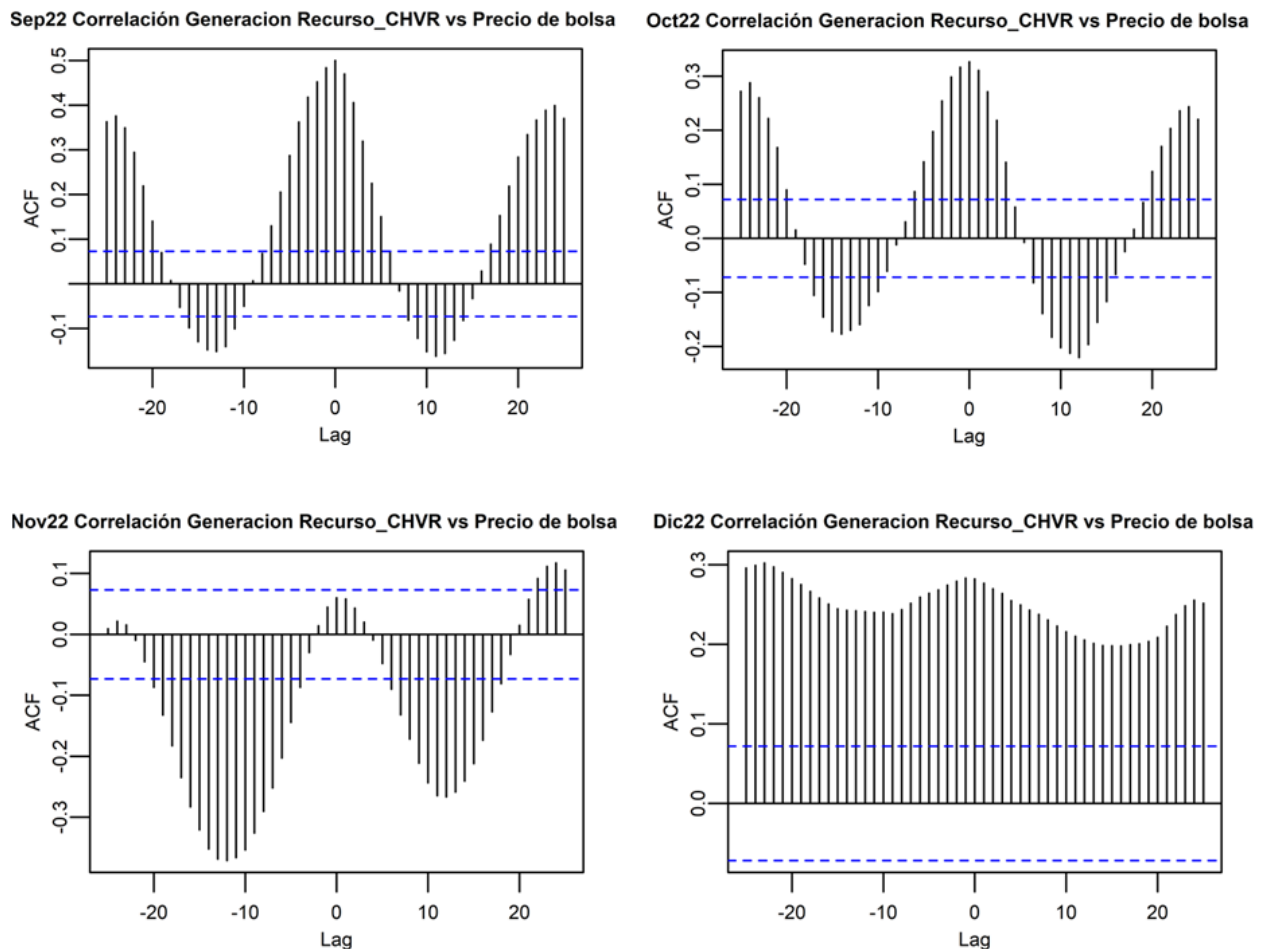
generación. Es importante recalcar la relevancia de lo que se realizará a continuación, ya que permitirá identificar los recursos más influyentes mercado. Para ello, se analiza su comportamiento a lo largo de un año, desde septiembre de 2022 hasta agosto de 2023.

- **Chivor (CHVR).**

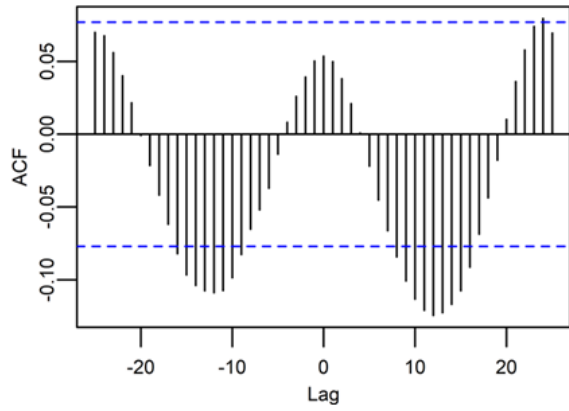
Como se mencionó anteriormente, se considerará un rango de un año que va desde septiembre de 2022 hasta agosto de 2023. La Figura 10 presenta los gráficos analizados y se centran en la correlación cruzada entre la generación real, y el precio de bolsa.

Figura 10.

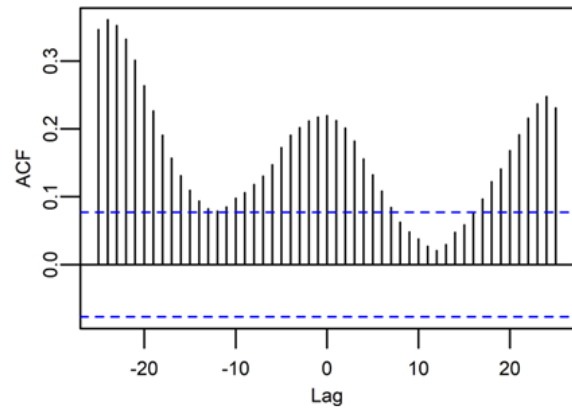
Correlación de chivor.



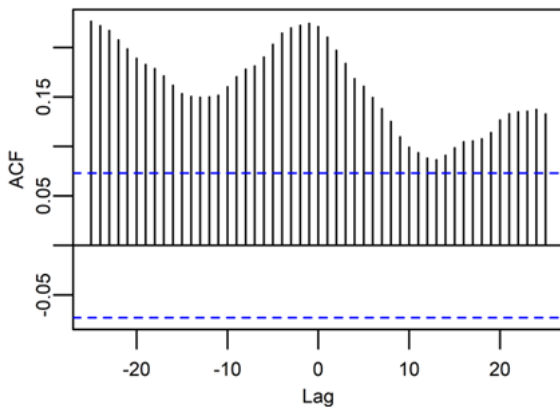
Ene23 Correlación Generacion Recurso_CHVR vs Precio de bolsa



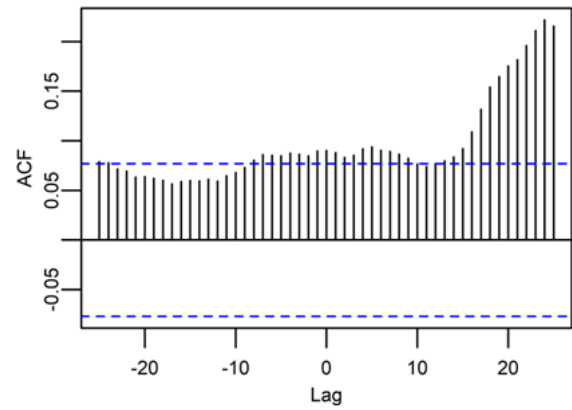
Feb23 Correlación Generacion Recurso_CHVR vs Precio de bolsa



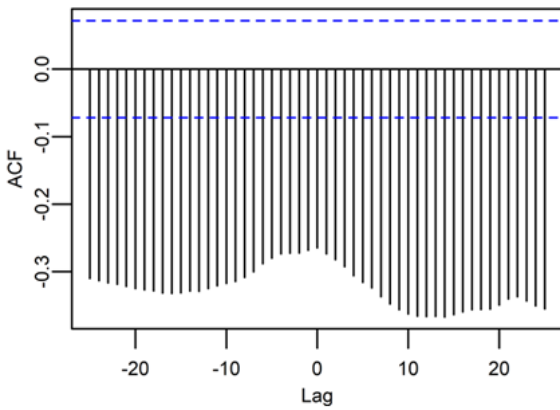
Mar23 Correlación Generacion Recurso_CHVR vs Precio de bolsa



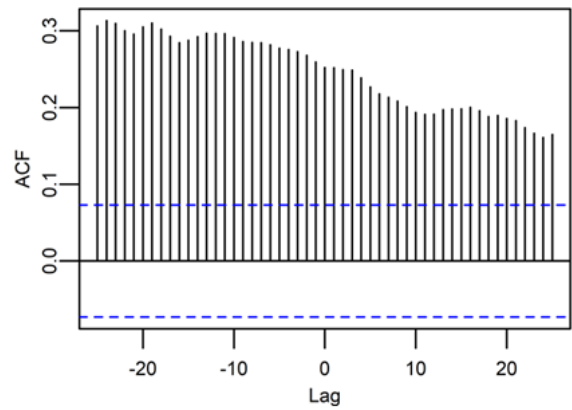
Abr23 Correlación Generacion Recurso_CHVR vs Precio de bolsa

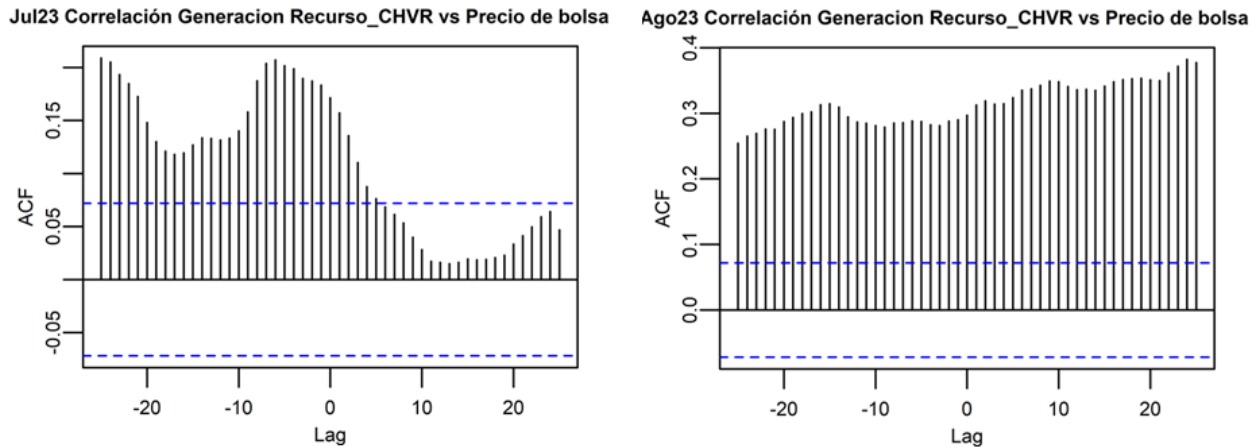


May23 Correlación Generacion Recurso_CHVR vs Precio de bolsa



Jun23 Correlación Generacion Recurso_CHVR vs Precio de bolsa





Nota: gráficos de correlación cruzada entre la demanda real y el precio de bolsa de la hidroeléctrica de Chivor a lo largo de un año.

Chivor (CHVR) muestra un comportamiento cuyos valores, en promedio mensual, son positivos, lo que implica que, en todo el rango de los días correspondientes al lag, genera un impacto de alza en el precio de bolsa. Específicamente, se buscan valores de correlación fuertes, tanto proporcionales como inversos, cercanos al lag 0, donde generalmente Chivor (CHVR) exhibe este comportamiento positivo. Esto significa que su precio de oferta incrementa el precio de bolsa. Sin embargo, también mostró un comportamiento inversamente proporcional, específicamente en el mes de mayo, lo que podría indicar que al generar pudo disminuir el precio de oferta, lo cual puede verse como algo positivo, el otro posible análisis es que el precio sube cuando genera en menores cantidades para este mes en específico, por lo cual Chivor (CHVG) es un ejemplo de un recurso influyente en el mercado eléctrico.

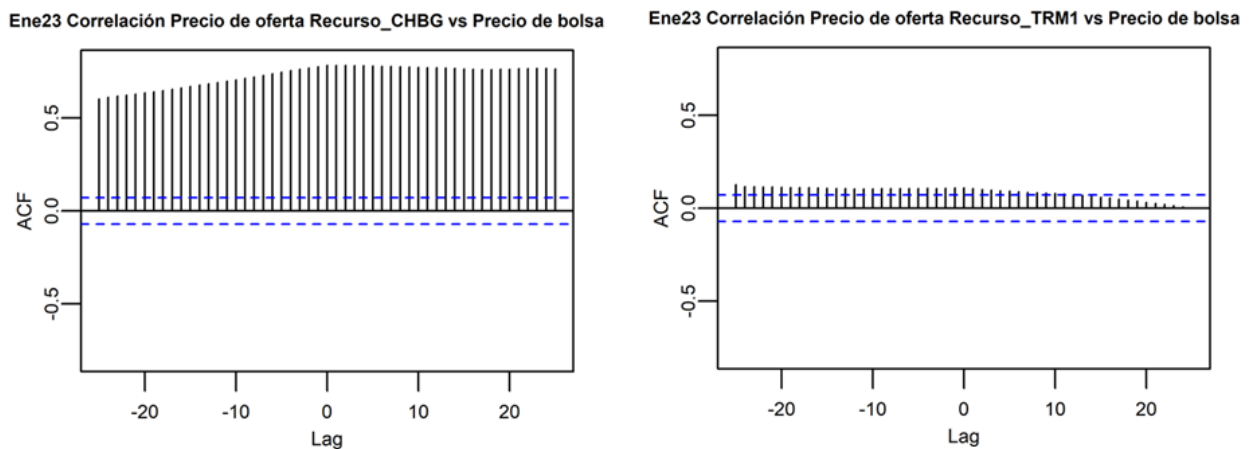
Resultados similares se dieron en la gran parte de los recursos con mayor capacidad donde la generación por parte de estos recursos afectaba el precio de manera directa o indirectamente proporcional como se puede ver en el Anexo B

3.2 Análisis de precio de oferta vs precio de bolsa.

En este análisis se seguirá el mismo procedimiento utilizado previamente con la demanda, pero en este caso se enfocará en el precio de oferta. Se revisaron dos generadoras diferentes: Betania (CHBG), una hidroeléctrica, y Termocentro (TRM1), una termoeléctrica (ver Figura 11). Se tomó una muestra de cuatro meses para esta comparación con el objetivo de mostrar las diferencias entre un recurso de alto impacto y otro que mostro un impacto generalmente bajo, similar a lo observado en la comparación de demanda, el código para generar las gráficas en encuentra en el anexo A.1 “líderes por mes”.

Figura 11.

Comparación entre CHBG y TRM1 en el mes de enero 2023.



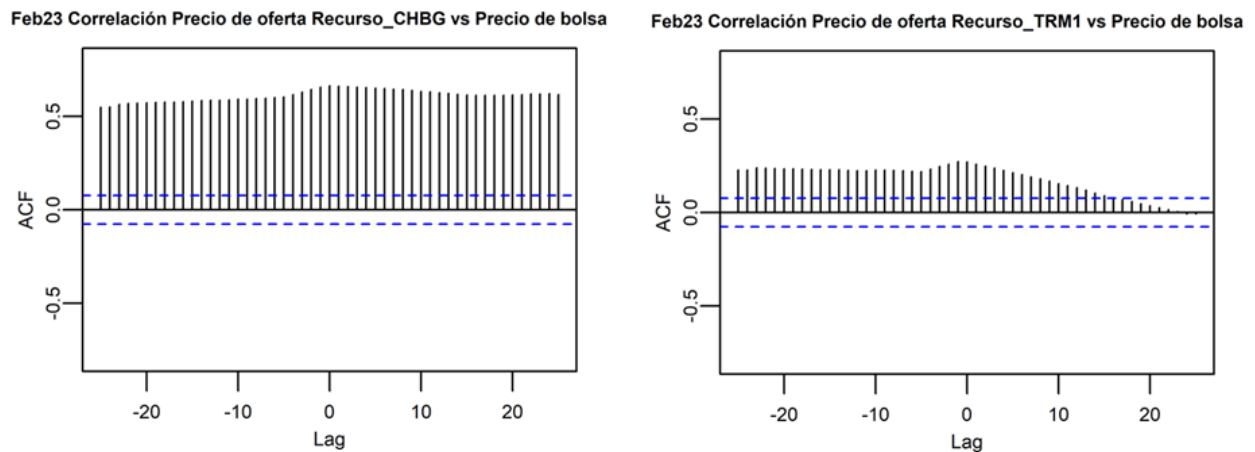
Nota: Graficos de correlación cruzada entre el precio de oferta vs el precio de bolsa, de los recursos CHBG y TRM1 del mes de enero del 2023.

En este primer mes, se pueden observar claras diferencias entre estos dos recursos. Comenzando con Betania (CHBG), este presenta valores positivos muy altos a lo largo del tiempo, se puede decir que este recurso provoca aumentos en el precio de bolsa y hace que se mantenga

elevado. Por otro lado, Termocentro (TRM1) muestra valores positivos, pero en su caso, estos son tan bajos no superan el umbral.

Figura 12.

Comparación entre CHBG y TRM1 en el mes de febrero 2023.

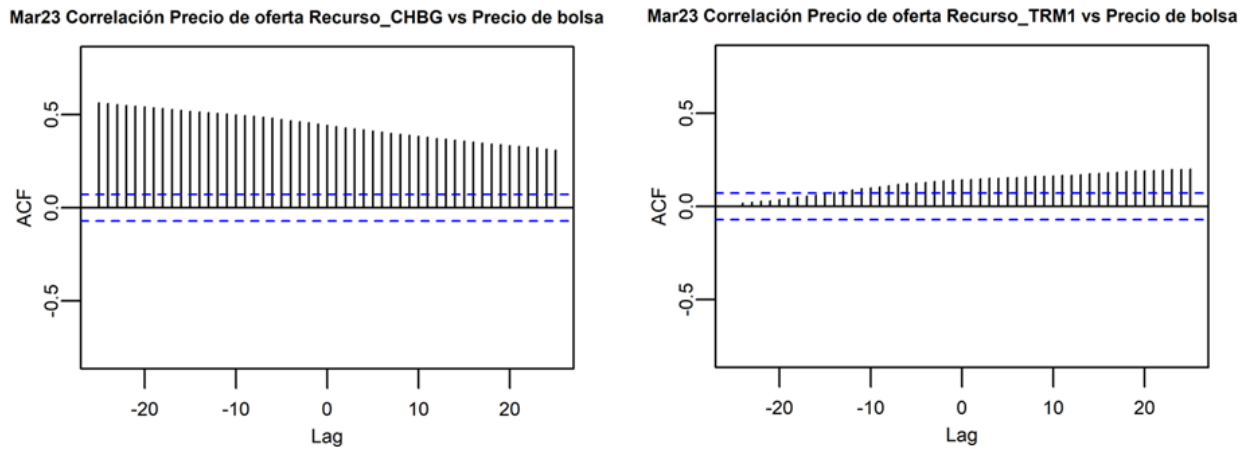


Nota: Graficos de correlación cruzada entre el precio de oferta vs el precio de bolsa, de los recursos CHBG y TRM1 del mes de febrero del 2023.

En el segundo mes (ver Figura 12), ambos recursos mantuvieron un comportamiento en general similar al del mes anterior. Betania (CHBG) continuó mostrando valores positivos que impactan significativamente el precio de bolsa y sus valores cercanos al lag 0 son altos. En cambio, aunque el impacto de Termocentro (TRM1) aumentó respecto al mes anterior, se visualiza un aumento en el momento que genera, pero, tiempo después este disminuye.

Figura 13.

Comparación entre CHBG y TRM1 en el mes de marzo 2023.

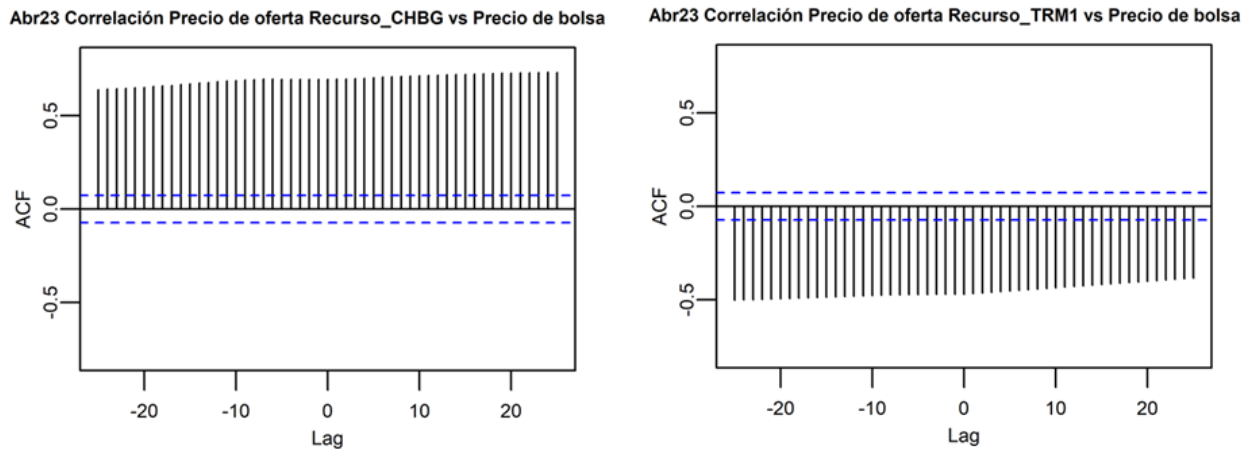


Nota: Graficos de correlación cruzada entre el precio de oferta vs el precio de bolsa, de los recursos CHBG y TRM1 del mes de marzo del 2023.

En el mes de marzo (ver Figura 13), al igual que los anteriores, mantuvo una tendencia similar. Aunque el impacto de Betania (CHBG) disminuyó en comparación con el mes anterior, sigue siendo significativo. En cambio, el impacto de Termocentro (TRM1) presentó una tendencia de elevación del precio.

Figura 14.

Comparación entre CHBG y TRM1 en el mes de abril 2023.



Nota: Graficos de correlación cruzada entre el precio de oferta vs el precio de bolsa, de los recursos CHBG y TRM1 del mes de abril del 2023.

Finalmente, el mes de abril (ver Figura 14) presenta que Betania (CHBG) mantiene un alto impacto positivo a lo largo del tiempo. Con estas muestras, se concluye que es un recurso que afecta consistentemente el precio de bolsa, lo que muestra que es un recurso con un alto impacto. Por otra parte, Termocentro (TRM1) aumentó considerablemente su impacto en este mes. Sus valores cercanos al lag 0 muestran una relación inversamente proporcional, lo que sugiere que su oferta tiende a disminuir el precio de bolsa o que el precio de bolsa disminuye su oferta. En general, parece que Termocentro (TRM1) no impacta en la mayoría de sus meses de manera negativa el precio de bolsa.

El siguiente procedimiento utilizado para esta parte del análisis corresponde al estudio de la hidroeléctrica San Carlos (SNCR). Esta sección es clave, ya que se aplicó el mismo procedimiento a cada uno de los recursos para verificar su impacto, como se hizo en el subcapítulo

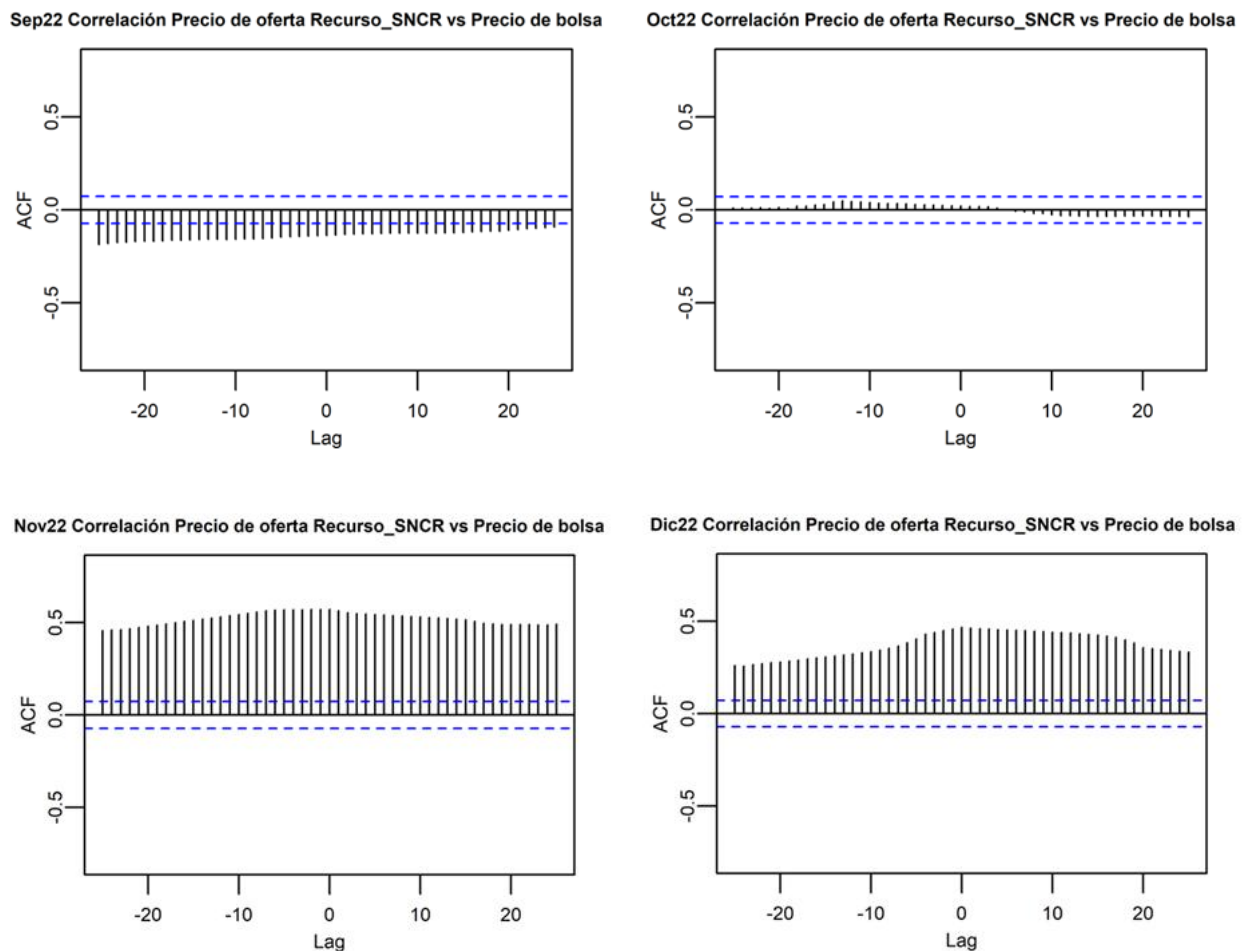
anterior. Se analizará su comportamiento a lo largo de un año completo, desde septiembre de 2022 hasta agosto de 2023. Los resultados se presentarán a continuación.

- **San Carlos (SNCR).**

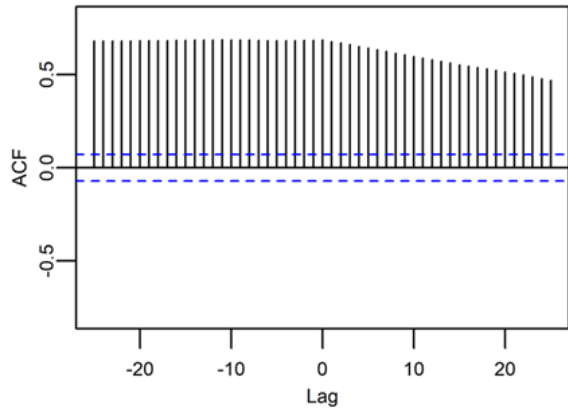
El estudio abarcará un período de un año, desde septiembre de 2022 hasta agosto de 2023. Se realizará una comparación entre el precio de oferta y el precio de bolsa durante este intervalo. La Figura 15 presenta las correlaciones entre el precio de oferta y el precio de bolsa desde septiembre del 2022 hasta agosto del 2023.

Figura 15.

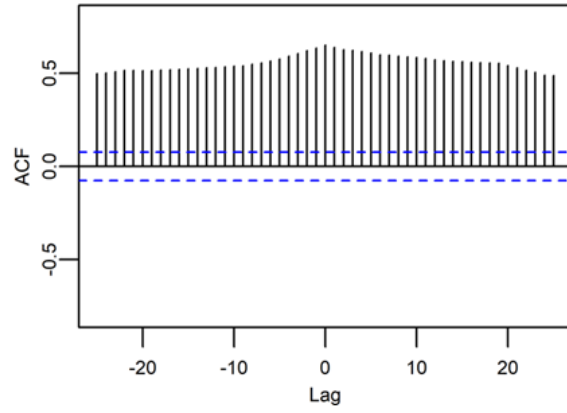
Correlaciones de san Carlos.



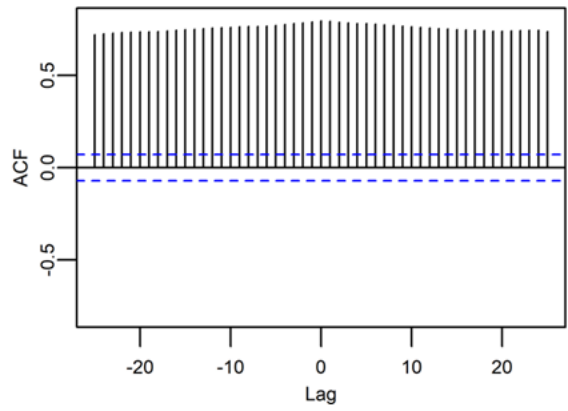
Ene23 Correlación Precio de oferta Recurso_SNCR vs Precio de bolsa



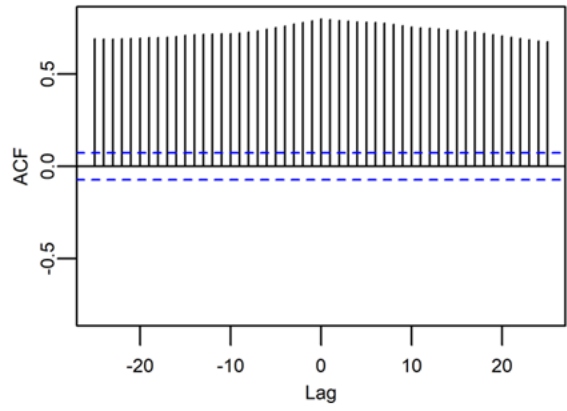
Feb23 Correlación Precio de oferta Recurso_SNCR vs Precio de bolsa



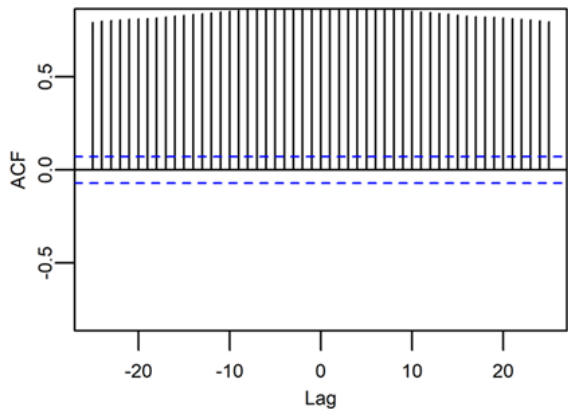
Mar23 Correlación Precio de oferta Recurso_SNCR vs Precio de bolsa



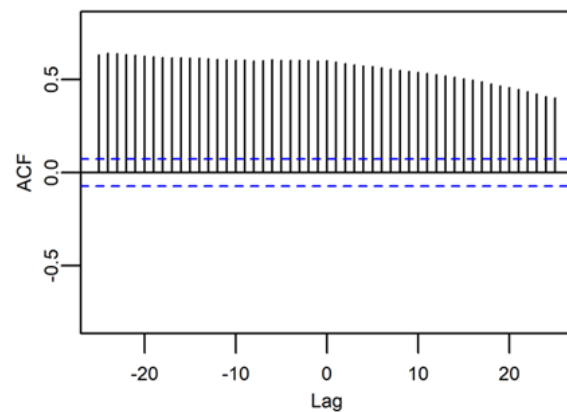
Abr23 Correlación Precio de oferta Recurso_SNCR vs Precio de bolsa

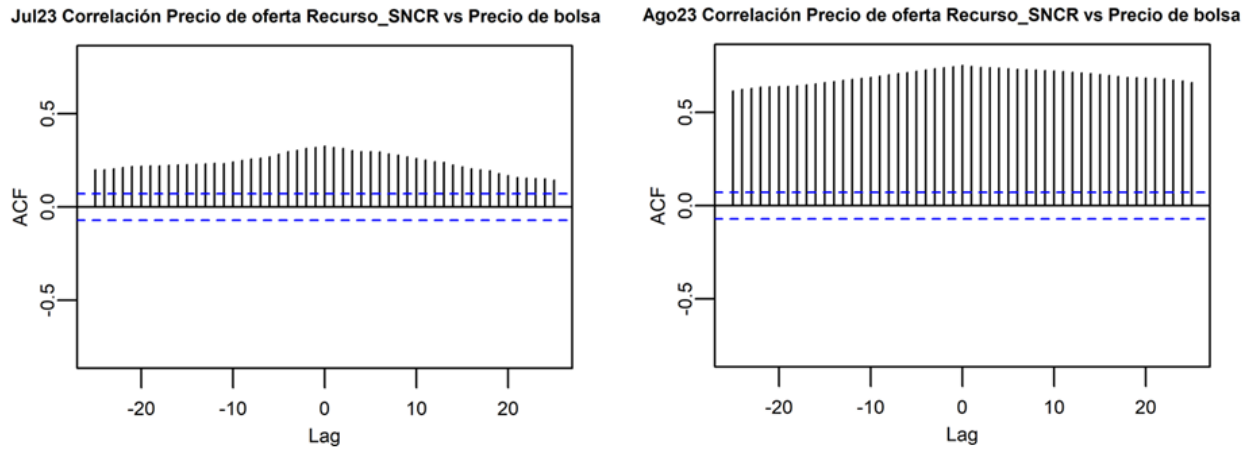


May23 Correlación Precio de oferta Recurso_SNCR vs Precio de bolsa



Jun23 Correlación Precio de oferta Recurso_SNCR vs Precio de bolsa





Nota: gráficos de correlación cruzada entre el precio de oferta y el precio de bolsa de la hidroeléctrica San Carlos a lo largo de un año.

La hidroeléctrica San Carlos (SNCR) muestra una relación positiva con el precio de bolsa, destacándose valores elevados principalmente en los lags cercanos a 0. Esto indica que su oferta tiende a ejercer un efecto de incremento sobre el precio de bolsa. Aunque el impacto generado no es de gran magnitud en términos absolutos, se observa un cambio consistente que contribuye al aumento del precio. En general, la hidroeléctrica San Carlos (SNCR) se consolida como otro claro ejemplo de un recurso que influye significativamente en la dinámica del precio de bolsa.

3.3 Inspección de recursos más influyentes

Entendidos los procedimientos utilizados para clasificar la influencia de los recursos en el precio de bolsa, como se realizó con Chivor(CHVR) y San Carlos(SNCR), se tomó en cuenta cada uno de los meses del año tomado como muestra para observar si su impacto se manifestaba en gran parte del período analizado. Luego de realizar es respectivo análisis a cada uno de los recursos. En la Tabla 2 se ordenan los recursos de generación de energía eléctrica para los agentes del mercado.

Tabla 2.*Recursos más influyentes en el mercado eléctrico.*

CODIGO DEL RECURSO	NOMBRE DEL RECURSO	NOMBRE DEL AGENTE	CAPACIDAD DEL RECURSO (kW)
ESMR	ESMERALDA	EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN	30000
GTPE	GUATAPE	EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN	560000
GTRG	GUATRON	EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN	512000
LTSJ	LA TASAJERA	EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN	306000
PLYS	PLAYAS	EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN	207000
PRC2	PORCE II	EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN	405000
PRC3	PORCE III	EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN	700000
2QEK	SALTO II	ENEL COLOMBIA	35000
CHBG	BETANIA	ENEL COLOMBIA	540000
DVS1	DARIO VALENCIA SAMPER	ENEL COLOMBIA	150000
GVIO	GUAVIO	ENEL COLOMBIA	1250000
PGUG	PAGUA	ENEL COLOMBIA	600000
QUI1	EL QUIMBO	ENEL COLOMBIA	400000
ZPA2	ZIPAEMG 2	ENEL COLOMBIA	36000
ZPA3	ZIPAEMG 3	ENEL COLOMBIA	63000
HMLG	MIEL I	ISAGEN	396000
JAGS	JAGUAS	ISAGEN	170000
MOY1	AMOYA LA ESPERANZA	ISAGEN	80000
SMI1	SAN MIGUEL	ISAGEN	50000
SNCR	SAN CARLOS	ISAGEN	1240000
SOG1	SOGAMOSO	ISAGEN	819000
3ENA	TESORITO	CELSIA	200000
ALBG	ALBAN	CELSIA	427000
CLMG	CALIMA	CELSIA	132000
CUC1	CUCUANA	CELSIA	56000
PRDO	PRADO	CELSIA	51000

SLVJ	SALVAJINA	CELSIA	315000
GE32	GECELCA 32	GENERADORA Y COMERCIALIZADORA DE ENERGIA DEL CARIBE	273000
TGJ1	GUAJIRA 1	GENERADORA Y COMERCIALIZADORA DE ENERGIA DEL CARIBE	151000
TGJ2	GUAJIRA 2	GENERADORA Y COMERCIALIZADORA DE ENERGIA DEL CARIBE	145000
CLL1	CARLOS LLERAS	HIDROELECTRICA DEL ALTO PORCE	78000
HMIN	ESCUELA MINAS	HIDROELECTRICA DEL ALTO PORCE	55000
TYP3	TERMOYOPAL 3	TERMOYOPAL GENERACION 2	50000
TYP4	TERMOYOPAL 4	TERMOYOPAL GENERACION 2	50000
CHVR	CHIVOR	AES COLOMBIA & CIA	1000000
PPA4	PAIPA 4	COMPAÑIA ELECTRICA DE SOCHAGOTA	165000
URA1	URRA	EMPRESA URRA	338000
PPA3	PAIPA 3	GESTION ENERGETICA	70000
TFL1	FLORES I CC	PRIME TERMOFLORES	160000
PRG1	PROELECTRICA 1	PROELECTRICA	45000
TBST	TEBSAB CC	TERMOBARRANQUILLA	791000
TRN1	TERMONORTE	TERMONORTE	88000
TSJ1	TASAJERO 1	TERMOTASAJERO	165000
TSJ2	TASAJERO 2	TERMOTASAJERO DOS	170000

Nota: tabla con cada uno de los recursos, ordenados por agentes con mayor cantidad de recursos.

Los recursos enumerados en la Tabla 2, han mostrado tener la mayor influencia en el precio de bolsa. En general, se observa que la mayoría de estos recursos pertenecen a los agentes más grandes del mercado eléctrico en Colombia, junto con otros agentes que, debido a su capacidad, también ejercen un impacto significativo en el precio de bolsa.

Tal como se anticipaba en el estudio estadístico, este resultado era previsible, dado el considerable control que estas empresas ejercen en el sector. Esto les permite, en cierta medida, aprovechar su poder de mercado para obtener mayores beneficios.

Con el análisis gráfico finalizado, es posible intuir qué agentes podrían estar generando un posible oligopolio. Sin embargo, esto no es suficiente para confirmar su existencia, por lo que será necesario aplicar otros métodos que permitan determinar si los datos encontrados realmente reflejan un uso del poder de mercado.

4. Evolución temporal de los índices de Lerner y Herfindahl-Hirschman: análisis gráfico y clasificación por dominancia del mercado

Para la finalización del desarrollo de este trabajo, se realizarán cálculos de los índices de poder de mercado. Estos se compondrán de dos indicadores diferentes: el índice de Lerner y el índice de Herfindahl-Hirschman. Además, se llevará a cabo una clasificación de estos. El cálculo de estos índices es clave para medir el poder de mercado y la concentración del mercado eléctrico. A través de gráficos, se podrá observar cómo los recursos y los agentes que controlan estos fluctúan con el tiempo, lo que permitirá identificar patrones y tendencias.

4.1 Análisis del índice de Lerner.

Como se mencionó en el marco teórico, este índice refleja el poder de mercado que posee una empresa; en el caso de estudio, se analiza este poder en relación con los recursos.

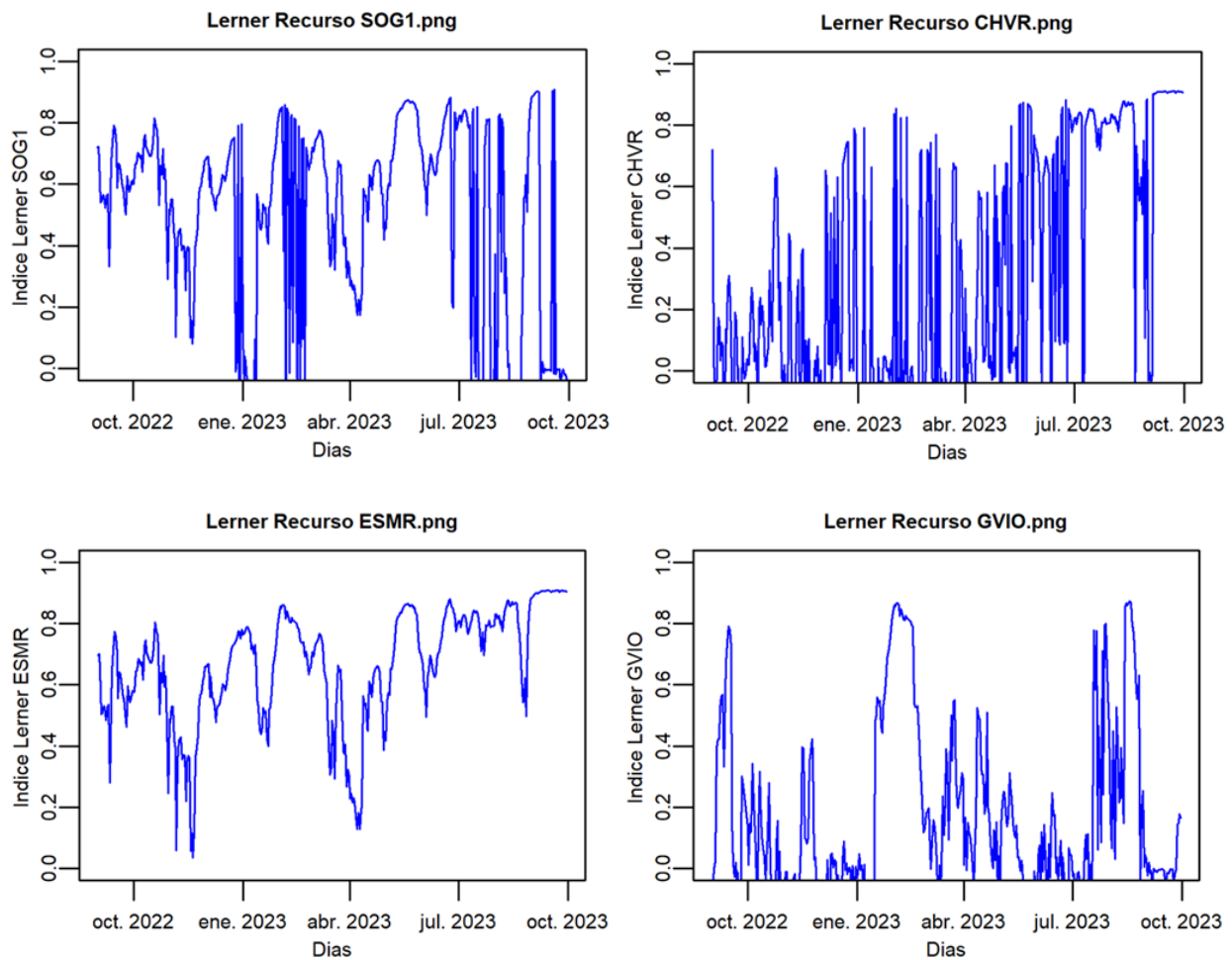
A través del entorno de programación RStudio, se generaron las gráficas correspondientes al índice de Lerner para cada uno de los recursos en cada uno de los días del análisis, graficas que se encuentran en el Anexo D. Para calcular este índice, se realizó la diferencia entre el precio de

bolsa y el precio de oferta del recurso, considerándolo como el costo marginal, y se dividió esta diferencia entre el precio de bolsa. Este procedimiento arrojó resultados variados para cada recurso analizado.

Ahora, como parte del análisis, se procederá a comparar los recursos que muestran diferentes variaciones en su índice de Lerner como veremos se muestra en la Figura 16.

Figura 16.

Comparaciones del índice de lerner.



Nota: figura que muestra la evolución temporal del índice de Lerner en 4 recursos tomados al azar como prueba.

Las gráficas muestran los días del año seleccionados para el análisis. En el eje Y se representan los valores del índice de Lerner, que oscilan entre 0 y 1. Se observa una alta variabilidad entre los índices, aunque en general tienden a presentar valores elevados, lo que sugiere un posible poder de mercado por parte de las generadoras. Sin embargo, al profundizar en el análisis, se identificó que las generadoras con menor capacidad tienden a tener valores más bajos, mientras que la mayoría mantiene índices altos a lo largo del período estudiado.

Estos resultados podrían indicar que la mayoría de las generadoras tienen poder de mercado. No obstante, la variabilidad en los resultados pone en entredicho la confiabilidad del índice de Lerner para este caso específico, razón por la cual no se consideró como un resultado concluyente del trabajo de grado, aunque sí se incluyó como parte del proceso metodológico realizado.

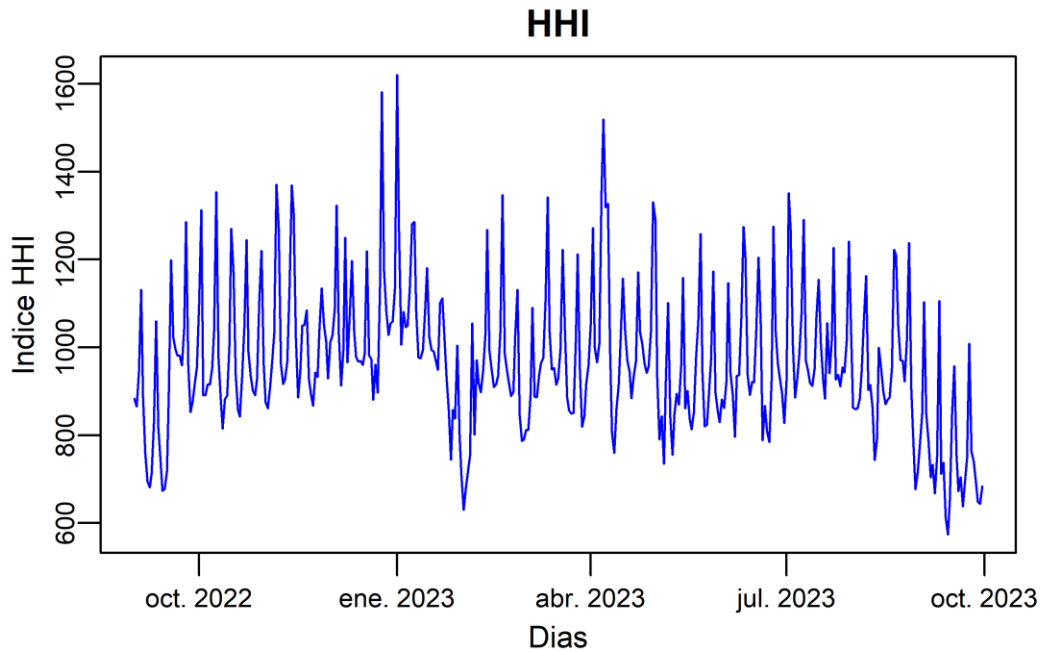
4.2 Estudio del índice de Herfindahl-Hirschman.

Este índice se utilizará para medir la concentración en el mercado, lo cual se realiza a través de la sumatoria del cuadrado de la participación de todas las empresas que conforman, el mercado eléctrico colombiano. Como parte del análisis, se emplearon dos métodos para calcularlo: uno basado en la participación de cada recurso de manera individual en el mercado y el otro centrado en el análisis por agente. Ambos enfoques arrojaron resultados interesantes que se analizarán a continuación.

Iniciando con el análisis por recurso, se realizó un estudio individual de cada uno, tal como se mencionó anteriormente. Se generó un gráfico que muestra su evolución temporal durante el año analizado, como se muestra en la Figura 17.

Figura 17.

Evolución temporal del índice de herfindahl-hirschman por recurso.



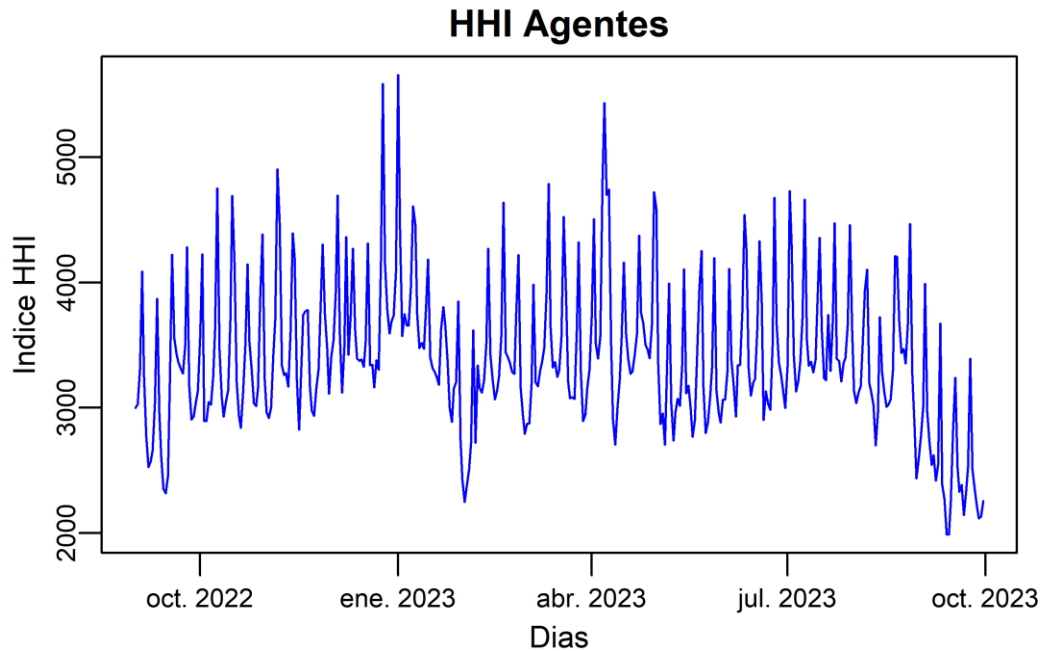
Nota: Gráfico de evolución temporal del año muestreado para el índice de herfindahl-hirschman de todos los recursos que conforman el mercado eléctrico colombiano.

La Figura 17, muestra valores que varían entre 600 y 1600 en general, abarcando todo el año analizado en el trabajo de grado. Como se describió en el marco teórico, el rango de valores manejados en este caso sugiere que el mercado en general tiene una baja concentración, lo cual implica que es competitivo y no presenta problemas oligopolistas.

Por otra parte, se realizó el análisis considerando a los agentes y agrupando los recursos que les pertenecen. La Figura 18 muestra el resultado obtenido.

Figura 18.

Evolución temporal del índice de herfindahl-hirschman por agente.



Nota: Gráfico de evolución temporal del año muestreado para el índice de herfindahl-hirschman que tomando los agentes del mercado eléctrico colombiano.

Como se observa el cambio entre los 2 análisis es bastante significativo, en este caso se encuentran valores que van desde los 2000 a 5000 de manera general. También se encuentran momentos en donde estos pueden sobrepasar estos límites pero en promedio se mantienen sobre estos, en este caso es interesante resaltar que en este rango de valores hay indicios de que los agentes si presentan entre ellos una concentración de mercado muy alta, lo cual significa que entre ellas hay una baja competitividad y que hay indicios de prácticas oligopolistas.

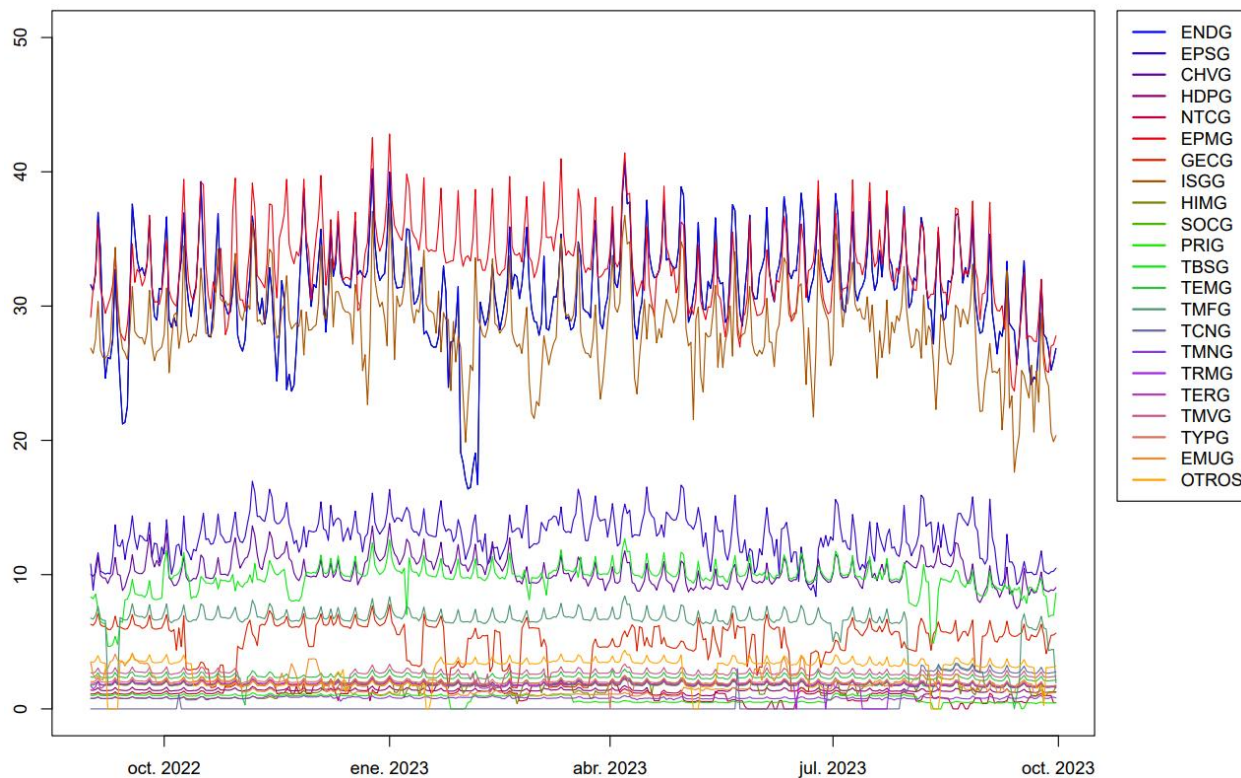
4.3 Clasificación de los índices.

Como parte de la clasificación, se decidió considerar únicamente el índice de Herfindahl-Hirschman, ya que proporciona una forma práctica de clasificar a los agentes y evaluar el control

que cada uno ejerce en el mercado. Para ello, se elaboró una gráfica que muestra la participación de cada agente, la cual se presenta en la Figura 19.

Figura 19.

Porcentaje de participación de cada uno de los agentes del mercado.



Nota: Grafico que muestra el porcentaje de participación en el mercado de cada uno de los agentes que conforman el mercado eléctrico colombiano.

Aunque el mercado eléctrico colombiano cuenta con 20 agentes, la capacidad combinada de solo cuatro de ellos sería suficiente para suplir la demanda energética. Esto genera una evidente concentración en el mercado. Sin embargo, debido a las limitaciones inherentes a los sistemas de transmisión y distribución, estos agentes no suelen operar a su capacidad máxima, lo que permite

la participación de otros recursos de generación. A pesar de ello, la concentración sigue presente, otorgando a este grupo reducido de agentes un poder significativo para influir en los precios y las condiciones del mercado. Esta situación puede propiciar prácticas anticompetitivas, como la manipulación de precios o la limitación de la oferta. Así, a pesar de la cantidad de actores en el mercado, este podría comportarse como un oligopolio, donde las decisiones de los agentes dominantes impactan de manera significativa la dinámica general del sector.

5. Conclusiones

El mercado eléctrico colombiano está mayormente controlado por un grupo reducido de empresas, como Enel, EPM, Isagen y Celsia, que gestionan más de la mitad de la generación eléctrica del país. Esto les otorga un alto poder en el mercado, limitando la capacidad de otras generadoras para competir significativamente. Este control fue evidente en los análisis realizados a lo largo del trabajo de grado, donde se utilizaron diversas herramientas estadísticas, como el lenguaje R, que resultó ser muy eficiente para manejar grandes volúmenes de datos y métricas analizadas durante un año completo.

La correlación cruzada se destacó como un método clave, al relacionar variables como la generación y el precio de oferta con el precio de bolsa. Este análisis permitió identificar patrones de comportamiento de los recursos, mostrando cómo los más representativos pertenecen a las cuatro principales empresas, reforzando la idea de un alto poder de mercado. Esto fue confirmado por el índice de Herfindahl-Hirschman, que reveló que, si bien el mercado parecía no concentrado al analizarse por recurso, al hacerlo por agentes se evidenció una fuerte concentración. Pese a la

gran cantidad de recursos, la mayoría pertenecen a un pequeño grupo de empresas, lo que provoca una concentración de poder en estas.

En resumen, los datos obtenidos confirman que el mercado eléctrico colombiano está bajo un oligopolio, donde unos pocos agentes tienen un alto dominio del mercado y demuestran una correlación altamente presente en el precio de bolsa.

Es importante tener en cuenta que, el mercado de la energía eléctrica tiende naturalmente hacia una estructura oligopólica, debido a las numerosas barreras de entrada que lo caracterizan. En Colombia, las principales formas de competir en este mercado son a través de la generación hidráulica o térmica, las cuales requieren inversiones de capital significativamente elevadas. Este nivel de inversión está fuera del alcance de un competidor promedio que no forme parte de una gran empresa, ya sea pública o privada. Estas barreras limitan la posibilidad de nuevos participantes y refuerzan la concentración del mercado en manos de un pequeño grupo de agentes establecidos.

Finalmente, resulta fundamental resaltar la importancia de las herramientas tecnológicas disponibles para la programación y las metodologías empleadas en el tratamiento de datos. En este trabajo de grado, la transferencia de datos entre Python y R se llevó a cabo de manera eficiente mediante el uso de bibliotecas como msgpack, la cual desempeñó un papel clave en la ejecución de los análisis realizados.

6. Recomendaciones

En proyectos futuros relacionados, se recomienda profundizar en el análisis del funcionamiento del mercado eléctrico y en las razones que explican su tendencia hacia un modelo

oligopólico. También sería pertinente explorar otros métodos para analizar este mercado, además de los ya aplicados en esta investigación.

Otro aspecto relevante sería realizar comparaciones con los mercados eléctricos de países desarrollados y en vías de desarrollo. Esto permitiría identificar diferencias clave y comprender cómo factores específicos influyen en cada contexto, contribuyendo a una visión más global del funcionamiento y las tendencias del mercado eléctrico internacional.

Finalmente, se destaca la importancia de que se use información proveniente de fuentes confiables, como fue el caso de Sinergox, la base de datos administrada por XM. La transparencia y confiabilidad de estos datos resultan esenciales para realizar análisis sobre el sistema eléctrico nacional, además de ofrecer una amplia variedad de parámetros que pueden aprovecharse en futuros estudios.

Referencias Bibliográficas.

Creti, A., & Fontini, F. (2019). *Economics of electricity: Markets, competition and rules*. Cambridge university press.

Cryer, J. D., & Chan, K. S. (2010). *Times series analysis: With applications in R (2a ed.)*. Springer.

Lerner, A. P. (1934). The concept of monopoly and the measurement of monopoly power Vol. 1, No. 3 (Jun., 1934), pp. 157-175. Wiley-Blackwell.

Palazuelos, E. (2019). El oligopolio que domina el sistema eléctrico. Ediciones Akal.

Stoft, S. (2002). *Power system economics: Designing markets for electricity*. John Wiley & Sons.

U.S. Department of Justice & Federal Trade Commission. (2010). Obtenido de <https://www.justice.gov/atr/horizontal-merger-guidelines-08192010>