



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Modelo de previsión de precios a largo plazo de las
Garantías de Origen renovable

Autor: Jimena Martinez Diaz

Director: Clara Fernández-Aceytuno Marugán

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título *Modelo de previsión de precios a largo plazo de las Garantías de Origen renovable* en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2023-2024 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Jimena Martinez Diaz

Fecha: 15/07/2024

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Clara Fernández-Aceytuno Marugán

Fecha: 15/07/2024



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Modelo de previsión de precios a largo plazo de las
Garantías de Origen renovable

Autor: Jimena Martinez Diaz

Director: Clara Fernández-Aceytuno Marugán

Madrid

MODELO DE PREVISIÓN DE PRECIOS A LARGO PLAZO DE LAS GARANTÍAS DE ORIGEN RENOVABLE

Autor: Martínez Díaz, Jimena.

Director: Fernández-Aceytuno Marugán, Clara.

Entidad Colaboradora: Qualitas Energy.

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente trabajo busca dar visibilidad al mercado de Garantías de Origen (GdO) a través de un modelo de previsión de precios a largo plazo. Se prevé que los precios de las GdO europeas oscilen entre 0.12 y 4.02 €/MWh para el año 2050, según la generación de electricidad renovable, el crecimiento de la demanda y la disposición a pagar.

Palabras clave: Garantía de Origen, electricidad renovable, modelo, demanda, precio, disposición a pagar, Europa

1. Introducción

Hoy en día, los consumidores interesados en comprar electricidad renovable tienen tres opciones: certificados de atributos energéticos (EAC), contratos de compraventa de energía e inversiones en instalaciones de autoconsumo. Entre estas opciones, los EAC son la alternativa más popular entre consumidores industriales y domésticos. En concreto, las GdO se introdujeron en la Unión Europea en 2001 y son el EAC más utilizado en esta región [1].

Las GdO son certificados electrónicos que autentifican la producción de 1 MWh de energía a partir de fuentes renovables o de cogeneración de alta eficiencia [2]. Su finalidad es aumentar la transparencia sobre el origen de la producción de electricidad en Europa [1]. Actualmente, las GdO son certificadas por un sistema nacional, así como por AIB, una asociación que desarrolla y promueve un sistema europeo normalizado de certificación energética. A finales de 2023, AIB contaba con 36 miembros de 28 países europeos, todos ellos autorizados por el gobierno de cada país para administrar un sistema de GdO [3]. En España, hay dos organismos encargados de la gestión de las GdO: la CNMC, responsable del sistema de GdO para la electricidad, y Enagás GTS, responsable del sistema de GdO para gases renovables.

En la mayoría de los países europeos las GdO se pueden comercializar libremente y, desde su introducción, ha surgido un mercado específico para el comercio de estos certificados, independiente del mercado de la electricidad. El mercado de GdO se caracteriza por un comercio bilateral, poco transparente [4]. La información pública disponible es muy limitada, por lo que la mayoría de los productores, consumidores e inversores carecen de un precio de referencia válido para tomar decisiones informadas. Además, históricamente, los precios de las GdO han estado sujetos a una gran volatilidad [4], fruto de un comportamiento oportunista de la demanda. La evolución aparentemente errática de los precios plantea la cuestión de cuál es el límite hasta cuál los consumidores están dispuestos a pagar.

2. Definición del proyecto

El presente proyecto busca dar visibilidad al mercado de GdO. En primer lugar, se ofrece una visión general del marco regulatorio que gobierna las energías renovables y las GdO a nivel europeo y nacional. La comprensión del contexto normativo es crucial para analizar de

manera efectiva el mercado de GdO, ya que las regulaciones moldean la producción, certificación y comercialización de energía verde. En siguiente lugar, se analiza la literatura sobre la evolución histórica de los precios de las GdO. Además, se estudian los desafíos actuales del sistema, más allá de la falta de transparencia, y el posible impacto de la evolución prevista de las políticas y los mercados. El objetivo es situar el problema en un contexto histórico que facilite una comprensión más profunda del mercado.

La principal contribución de este proyecto es un modelo para predecir los precios de las garantías a largo plazo en condiciones de mercado no transparentes, como las que prevalecen actualmente. El primer paso para lograr este objetivo es realizar un análisis exploratorio que permita identificar los fundamentales que constituyen el precio de las GdO. El análisis se centra en los volúmenes históricos de GdO, la relación entre las GdO expedidas y la generación renovable y los precios de subastas públicas nacionales.

Todas las variables de entrada del modelo están sometidas a una gran incertidumbre. Por ello, para capturar las posibles evoluciones del mercado de GdO, se plantean diferentes escenarios de oferta y demanda. Más allá, se incluye un análisis de sensibilidad que proporciona una comprensión más completa de la incertidumbre asociada al modelo. Finalmente, el modelo se valida mediante un *backtesting*, una estrategia que consiste en probar un modelo predictivo con datos históricos para evaluar su precisión y confiabilidad.

3. Descripción del modelo

El modelo elaborado predice los precios de las GdO europeas hasta 2050. Como se muestra en la ilustración 1, el precio viene determinado por el punto de equilibrio entre la oferta y la demanda. Por un lado, para modelar la oferta de las GdO, se han considerado dos variables fundamentales, la generación renovable y la tasa de expedición de GdO. La generación renovable determina la cantidad máxima teórica de certificados que se pueden expedir en un periodo concreto, mientras que la tasa de expedición captura la normativa nacional que aplica a la expedición de las garantías. Además, se ha considerado que el mercado de GdO opera en un entorno de competencia monopolística y que la oferta es perfectamente inelástica.

Por otro lado, las dos variables clave que modelan la demanda de GdO son la demanda de electricidad renovable y la disposición a pagar por este producto (DAP). Los consumidores de GdO se dividen en industriales y domésticos, y cada uno de estos grupos se subdivide en categorías más específicas. La literatura sugiere que no todos los consumidores están dispuestos a pagar por electricidad verde. En el caso de los consumidores industriales, la división se ha realizado según los sectores del NACE y la DAP se ha cuantificado en base a los ingresos y a la de concienciación medioambiental [2]. En el caso de los consumidores domésticos, la subdivisión se ha realizado según el tipo de hogar y la DAP se ha determinado en base a la literatura y al precio medio de la factura de electricidad.

Hoy en día, los consumidores de GdO pueden adquirir los certificados en cualquier país que cumpla con la normativa EECS. Además, el análisis exploratorio sugiere que las diferencias de precios según la tecnología son mínimas. Por tanto, se ha modelado una única curva de

la oferta y la demanda para todos los países y tecnologías. Posteriormente, los precios se han ajustado ligeramente con factores que capturan las preferencias de los consumidores.

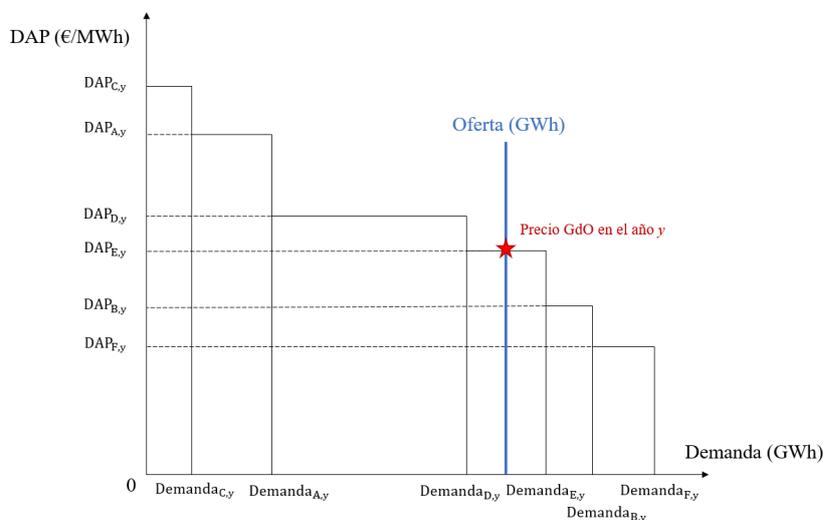


Ilustración 1 - Relación entre la curva de la oferta y la demanda de GdO para un año y

4. Resultados

Los resultados del modelo revelan que los precios de las GdO estarán determinados por el desequilibrio entre la oferta y la demanda. Si aumenta el desequilibrio, los precios tenderán a subir, y viceversa. La generación renovable y el crecimiento de la demanda se destacan como las variables más influyentes. Si aumenta la oferta de renovables los precios bajarán, mientras que, si la demanda crece más rápidamente, los precios subirán.

Para capturar las posibles evoluciones del mercado de GdO se plantean diferentes escenarios. En un escenario básico, fundamentado en las políticas actuales declaradas por los países europeos, la demanda crece más lentamente que la oferta y, por tanto, los precios tienden a bajar (escenario 1). Si se asume un desarrollo más sostenible del sistema energético y de la demanda, la DAP y el desequilibrio crecen, dando lugar a una subida de los precios (escenario 2). Por último, en un escenario pesimista, la DAP y la demanda interesada en GdO disminuyen a medida que el sistema se vuelve cada vez más verde. Esto resulta en una bajada sostenida de los precios (escenario 3).

Los precios obtenidos con el modelo fluctúan entre los 0.12 y los 4.02 €/MWh (véase ilustración 2), un rango de valores que ya se ha observado previamente en el mercado. Durante la pandemia, los precios de las GdO cayeron drásticamente, situándose en torno a 0.1€/MWh. En contraste, durante la segunda mitad de 2022, los precios crecieron, alcanzando valores de hasta 10 €/MWh. Aunque esta cifra fue puntual (récord histórico), el promedio de precios en 2022 se situó alrededor de los 4 €/MWh.

Por último, los resultados del *backtesting* han sido satisfactorios. Los precios predichos por el modelo desde 2018 hasta 2022 son muy similares a los precios reales de las GdO nórdicas hidráulicas, lo que indica que el modelo es capaz de capturar las fluctuaciones de precio,

fruto del comportamiento oportunista de la demanda. Considerando la incertidumbre de los datos y la opacidad del mercado, se puede afirmar que el modelo es sólido y realista.

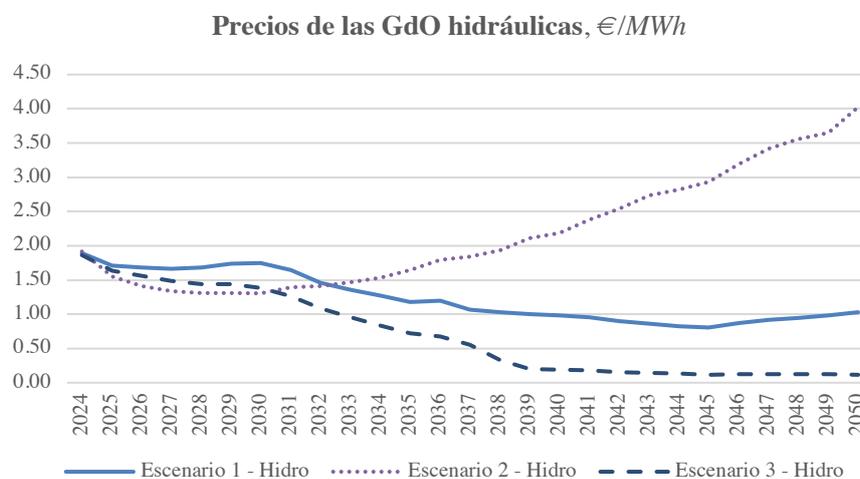


Ilustración 2 – Precios de las GdO hidráulicas según el modelo

5. Conclusiones

El mercado de GdO actual se enfrenta a numerosos desafíos entre los que destacan la falta de visibilidad, adicionalidad y confianza, y la volatilidad de los precios. En condiciones de mercado no transparentes, como las que prevalecen actualmente, se espera que los precios de las GdO europeas oscilen entre 0.12 y 4.02 €/MWh para el año 2050, según la generación de electricidad renovable, el crecimiento de la demanda y la disposición a pagar.

En el futuro, factores como la prohibición de expedir GdO a electricidad subsidiada, cambios en los miembros de la AIB, la introducción de GdO para gases renovables o la creación de un Marketplace europeo podrían transformar el mercado, aumentando la presión al alza sobre los precios. Además, las políticas de la UE influyen significativamente en este mercado, y cualquier cambio en los objetivos de descarbonización podría afectar a los volúmenes de GdO ofertados y demandados, alterando los precios.

6. Referencias

- [1] Wimmers, A., & Madlener, R. (2020). The European Market for Guarantees of Origin for Green Electricity: A Scenario-Based Evaluation of Trading under Uncertainty. Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3830442>
- [2] Ana. (2023, 17 enero). Garantías de origen renovable: cómo saber si la energía que consumes es verde. Good New Energy. <https://goodnewenergy.enagas.es/sostenibles/garantias-de-origen-renovable-como-saber-si-la-energia-que-consumes-es-verde/>
- [3] Home | AIB. (s. f.). <https://www.aib-net.org/>
- [4] Giorgi, M. (2023, 13 julio). Previsiones del mercado de garantías de origen hacia 2024 y 2029 - Energía Estratégica España - Noticias. Energía Estratégica España - Noticias sobre energías renovables del mercado ibérico. <https://energiaestrategica.es/mercado-de-garantias-de-origen/>

LONG-TERM PRICE FORECASTING MODEL FOR RENEWABLE GUARANTEES OF ORIGIN

Author: Martínez Díaz, Jimena.

Supervisor: Fernández-Aceytuno Marugán, Clara.

Collaborating Entity: Qualitas Energy.

ABSTRACT

The present study aims to enhance visibility in the Guarantees of Origin (GO) market through a long-term price prediction model. European GO prices are expected to range between 0.12 and 4.02 €/MWh by 2050, depending on renewable electricity generation, demand growth, and willingness to pay (WTP).

Keywords: Guarantee of Origin, renewable electricity, model, demand, price, willingness to pay, Europe

1. Introduction

Nowadays, consumers interested in purchasing renewable electricity have three options: energy attribute certificates (EACs), power purchase agreements (PPAs), and investments in self-consumption installations. Between these options, EACs are the most popular choice among industrial and domestic consumers. Specifically, Guarantees of Origin (GOs) were introduced in the European Union in 2001 and are the most widely used EAC in this region [1].

GOs are electronic certificates that authenticate the production of 1 MWh of energy from renewable sources or high-efficiency cogeneration [2]. Their purpose is to increase transparency regarding the origin of electricity production in Europe [1]. Currently, GOs are certified by a national system as well as by AIB, an association that develops and promotes a standardized European energy certification system. By the end of 2023, AIB had 36 members from 28 European countries, all authorized by their respective governments to manage a GO system [3]. In Spain, there are two organizations responsible for managing GOs: the CNMC, responsible for the GO system for electricity, and Enagás GTS, responsible for the GO system for renewable gases.

In most European countries, GOs can be freely traded, and since their introduction, a specific market for trading these certificates has emerged, independent of the electricity market. The GO market is characterized by bilateral, non-transparent trading [4]. The publicly available information is very limited, so most producers, consumers, and investors lack a valid reference price to make informed decisions. Additionally, GO prices have historically been very volatile due to opportunistic demand behavior [4].

2. Project definition

The present project aims to bring visibility to the GO market. Firstly, it provides an overview of the regulatory framework governing renewable energy and GOs at both European and national levels. Understanding the regulatory context is crucial for effectively analyzing the GO market, as regulations shape the production, certification, and commercialization of green energy. Next, the literature on the historical evolution of GO prices is reviewed.

Additionally, the current system challenges beyond the lack of price transparency, along with the potential impacts of anticipated policy and market developments, are examined. The aim is to provide a historical context to facilitate a deeper understanding of the market.

The main contribution of this project is a model to predict long-term guarantee prices under non-transparent market conditions, such as those currently prevailing. The first step to achieve this goal is to conduct an exploratory analysis to identify the fundamentals that constitute the price of GOs. The analysis focuses on historical GO volumes, the relationship between issued GOs and renewable generation, and national public auction prices.

All model inputs are subject to significant uncertainty. Therefore, in order to capture the possible evolutions of the GO market, several supply and demand scenarios are proposed. Furthermore, the paper includes a sensitivity analysis that provides a more comprehensive understanding of the uncertainty associated with the model. Finally, the model is validated through back testing, a strategy that consists of testing a predictive model with historical data to evaluate its accuracy and reliability.

3. Description of the model

The developed model predicts the prices of European GOs until 2050. As shown in illustration 1, the price is determined by the equilibrium point between supply and demand. On the supply side, two fundamental variables have been considered: renewable generation and GO issuance rate. Renewable generation determines the theoretical maximum number of certificates that can be issued in a specific period, while the issuance rate captures the national regulations applicable to the issuance of guarantees. Additionally, it is considered that the GO market operates in a monopolistic competition environment and that the supply is perfectly inelastic.

On the demand side, the two key variables are the demand for renewable electricity and the WTP for this product. GO consumers are divided into industrial and domestic users, with each group further divided into more specific categories. The literature suggests that not all consumers are willing to pay for green electricity. For industrial consumers, the division is made according to NACE sectors, and the WTP is quantified based on income and environmental awareness [2]. For domestic consumers, the subdivision is based on household type, and WTP is determined from the literature and the average electricity bill.

Today, GO consumers can purchase certificates in any country that complies with the EECS standards. Furthermore, the exploratory analysis suggests that price differences based on technology are minimal. Therefore, a single supply and demand curve has been modeled for all countries and technologies. Subsequently, prices have been slightly adjusted with factors that capture consumer preferences.

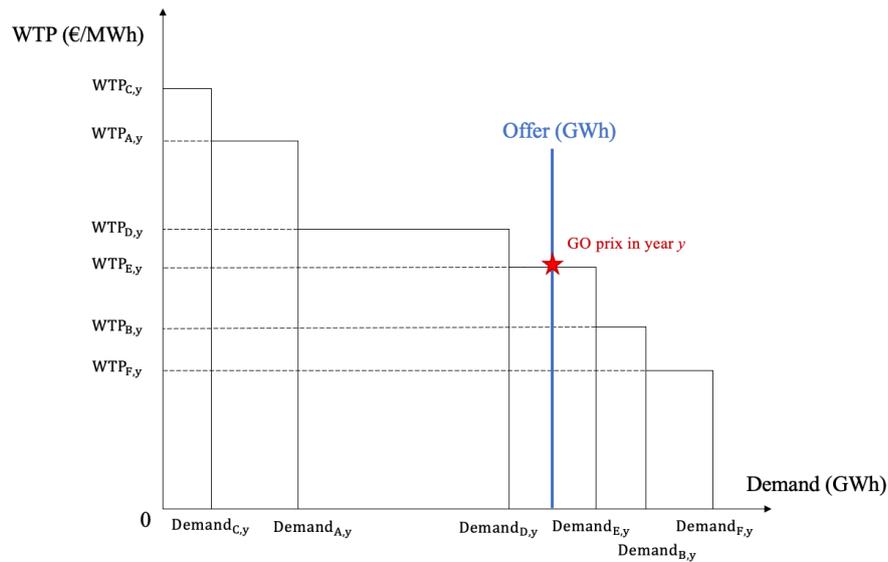


Illustration 1 - Relationship between the supply and demand curve for GOs for year y

4. Results

The model results reveal that GO prices will be determined by the imbalance between supply and demand. If the imbalance increases, prices will tend to rise, and vice versa. Renewable generation and demand growth stand out as the most influential variables. If the supply of renewables increases, prices will drop, while if demand grows more rapidly, prices will rise.

To capture the possible evolutions of the GO market, different scenarios are proposed. In a basic scenario, based on the current policies declared by European countries, demand grows more slowly than supply, and therefore, prices tend to fall (scenario 1). If a more sustainable development of the energy system and demand is assumed, the WTP and the imbalance increase, leading to a rise in prices (scenario 2). Lastly, in a pessimistic scenario, the WTP and demand for GOs decrease as the system becomes more green, resulting in a sustained drop in prices (scenario 3).

The prices obtained with the model fluctuate between 0.12 and 4.02 €/MWh (see illustration 2), a range of values previously observed in the market. During the pandemic, GO prices fell drastically, settling around 0.1 €/MWh. In contrast, during the second half of 2022, prices rose, reaching values of up to 10 €/MWh. Although this was a one-time record high, the average price in 2022 was around 4 €/MWh.

Finally, the back testing results have been satisfactory. The prices predicted by the model from 2018 to 2022 are very similar to the actual prices of Nordic hydro GOs, indicating that the model is capable of capturing price fluctuations resulting from opportunistic demand behavior. Considering the data uncertainty and market opacity, it can be stated that the model is robust and realistic.

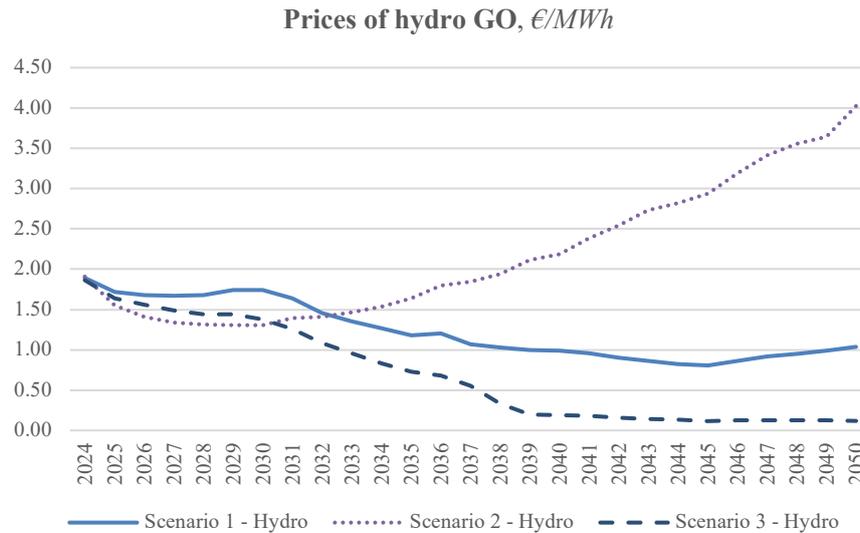


Illustration 2 - Prices of hydro GO according to the model

5. Conclusions

The current GO market faces numerous challenges, including a lack of visibility, additionality, and trust, as well as price volatility. Under non-transparent market conditions, as currently prevailing, European GO prices are expected to fluctuate between 0.12 and 4.02 €/MWh by 2050, depending on renewable electricity generation, demand growth, and WTP.

In the future, factors such as the prohibition of issuing GOs for subsidized electricity, changes in AIB members, the introduction of GOs for renewable gases, or the creation of a European marketplace could transform the market, increasing upward pressure on prices. Additionally, EU sustainability policies significantly influence this market, and changes in decarbonization targets could affect the volumes of GOs supplied and demanded, thus modifying prices.

6. References

- [1] Wimmers, A., & Madlener, R. (2020). The European Market for Guarantees of Origin for Green Electricity: A Scenario-Based Evaluation of Trading under Uncertainty. Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3830442>
- [2] Ana. (2023, 17 enero). Garantías de origen renovable: cómo saber si la energía que consumes es verde. Good New Energy. <https://goodnewenergy.enagas.es/sostenibles/garantias-de-origen-renovable-como-saber-si-la-energia-que-consumes-es-verde/>
- [3] Home | AIB. (s. f.). <https://www.aib-net.org/>
- [4] Giorgi, M. (2023, 13 julio). Previsiones del mercado de garantías de origen hacia 2024 y 2029 - Energía Estratégica España - Noticias. Energía Estratégica España - Noticias sobre energías renovables del mercado ibérico. <https://energiaestrategica.es/mercado-de-garantias-de-origen/>

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Motivación del proyecto	10
Capítulo 2. Marco regulatorio.....	13
2.1 Marco regulatorio de las energías renovables a nivel europeo	13
2.1.1 Directivas sobre fuentes de energía renovables	14
2.1.2 Pacto verde Europeo.....	14
2.2 Marco regulatorio de las energías renovables en España.....	15
2.2.1 Normativa y principales agentes del MIBEL.....	15
2.2.2 Regulación de las energías renovables en España	18
2.3 Marco regulatorio de las GdO.....	19
2.3.1 Diferencias de regulación entre los distintos países de Europa.....	22
2.3.2 Regulación de GdO en España	26
Capítulo 3. Tendencias sostenibles	29
3.1 DAP por la electricidad verde	29
3.2 Planes de descarbonización de grandes empresas.....	32
3.3 Movimientos contra las políticas y productos verdes	35
Capítulo 4. Revisión bibliográfica de las GdO	38
4.1 Literatura sobre la evolución histórica de los precios de las GdO.....	38
4.2 Obstáculos del mercado de GdO.....	40
4.3 Posibles efectos de la evolución prevista de las políticas y los mercados en los precios de las GdO	43
4.3.1 Prohibición de expedición de GdO a los productores subvencionados.....	43
4.3.2 Cambios en los miembros de AIB	43
4.3.3 Creación de un nuevo marketplace.....	44
4.3.4 Demanda de GdO para gases renovables.....	45
Capítulo 5. Análisis exploratorio de Fundamentales.....	47
5.1 Histórico de volúmenes de GdO	47
5.1.1 Volúmenes de GdO por país.....	48
5.1.2 Volúmenes de GdO por tipo de tecnología	52

5.2	Relación entre las GdO expedidas y la generación renovable	56
5.3	Precios históricos de países con subasta pública.....	58
5.3.1	<i>Precios de GdO francesas</i>	58
5.3.2	<i>Precios de GdO italianas</i>	62
5.3.3	<i>Comparativa entre los precios de GdO italianas y francesas</i>	64
5.4	Histórico de cotización de GdO	65
Capítulo 6. Base teórica del modelo.....		67
6.1	Oferta de GdO	67
6.2	Demanda de GdO.....	68
6.3	Determinación del precio	70
6.4	Limitaciones.....	72
6.5	Código.....	73
Capítulo 7. Inputs del modelo		74
7.1	Inputs para modelar la oferta de GdO	74
7.1.1	<i>Pronóstico de generación renovable</i>	74
7.1.2	<i>Tasa de expedición de GdO</i>	75
7.1.3	<i>Resumen de los inputs y bases de datos</i>	76
7.2	Inputs para modelar la demanda de GdO	76
7.2.1	<i>Demanda de electricidad renovable</i>	76
7.2.2	<i>Disposición a pagar por una GdO</i>	80
7.2.3	<i>Resumen de los inputs y bases de datos</i>	86
7.3	Escenarios	87
Capítulo 8. Análisis de resultados.....		90
8.1	Equilibrio entre la oferta y la demanda de GdO	90
8.2	Precios del modelo	92
Capítulo 9. Backtesting y análisis de sensibilidad.....		95
9.1	Backtesting.....	95
9.2	Análisis de sensibilidad.....	97
9.2.1	<i>Análisis univariante</i>	97
9.2.2	<i>Análisis multivariante</i>	99
Capítulo 10. Conclusiones y futuros desarrollos.....		102

<i>Capítulo 11. Bibliografía.....</i>	<i>106</i>
<i>ANEXO I – Tablas y figuras adicionales.....</i>	<i>113</i>
<i>ANEXO II – Código.....</i>	<i>121</i>
<i>ANEXO III – Alineamiento del proyecto con los ODS.....</i>	<i>123</i>
<i>ANEXO IV – Detalle de los resultados.....</i>	<i>125</i>

Índice de figuras

Figura 1. Relación histórica entre el precio de la electricidad y el precio de las GdO [9]	10
Figura 2. Cronología de los mercados y Procesos del MIBEL [18]	17
Figura 3. Marco regulatorio de las GdO [7]	21
Figura 4. Países / Regiones miembros de la AIB [8].....	22
Figura 5. DAP media por país y continente [40]	31
Figura 6. Precios medios históricos de las GdO por trimestre [9].....	39
Figura 7. GdO expedidas anualmente por dominio, estructurado por periodo de transacción.....	49
Figura 8. Evolución histórica de las GdO expedidas por tipo de tecnología.....	53
Figura 9. Representación de cada país en el volumen de GdO expedido en 2023 para cada tipo de tecnología	56
Figura 10. Proceso de subasta de GdO en Francia [87].....	59
Figura 11. Precio de las GdO vs. Volumen subastado y volumen vendido en Francia (2020-2023).....	60
Figura 12. Precio de la electricidad vs. Precio de las GdO en Francia desde 2020 hasta 2023.....	61
Figura 13. Precio y volumen de las GdO subastadas en Francia por tipo de tecnología desde 2020 hasta 2023	62
Figura 14. Precio de la electricidad vs. Precio de las GdO en Italia desde 2020 hasta 2023	64
Figura 15. Precio de la electricidad y de las GdO subastadas en Italia vs. Francia.....	65
Figura 16. Histórico de cotización de las GdO desde 2022 hasta 2024.....	66
Figura 17. Relación entre el índice de ingresos, el índice de concienciación ambiental y la DAP por GdO ...	69
Figura 18. Modelo – Relación entre la curva de la oferta y la demanda de GdO para un año y	71
Figura 19. Metodología y bases de datos utilizadas para modelar la oferta de GdO.....	76
Figura 20. Metodología y las bases de datos utilizadas para modelar la demanda industrial de GdO	86
Figura 21. Metodología y las bases de datos utilizadas para modelar la demanda doméstica de GdO	86
Figura 22. Equilibrio entre la oferta y la demanda de GdO para cada escenario	92
Figura 23. Precios de las GdO hidráulicas para los distintos escenarios, según el modelo.....	94
Figura 24. Resultados del backtesting vs. precios reales de las GdO hidráulicas nórdicas.....	96
Figura 25. Análisis de sensibilidad univariante	98
Figura 26. Resultados del análisis de sensibilidad multivariante	101
Figura 27. GdO importadas anualmente por dominio, estructurado por periodo de transacción.....	116
Figura 28. GdO exportadas anualmente por dominio, estructurado por periodo de transacción.....	117
Figura 29. GdO canceladas anualmente por dominio, estructurado por periodo de transacción.....	118
Figura 30. Evolución histórica del precio de la electricidad en los dominios analizados	119

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de países miembros de EECS en función del sistema de GdO introducido	23
Tabla 2. Comportamiento comercial de los países miembros de EECS (2019-2023) [29, 3]	25
Tabla 3. Procedimientos relacionados con la gestión de GdO en España [35].....	28
Tabla 4. DAP por electricidad verde en función del tipo de fuente renovable [42]	31
Tabla 5. Volumen y porcentaje de las transacciones realizadas en 2023 por tipo de transacción para los dominios europeos más importantes.....	50
Tabla 6. Volumen de GdO españolas (CNMC) por tipo de transacción desde 2019 hasta 2023	51
Tabla 7. Relación entre el volumen de exportación de GdO certificadas por la CNMC y el volumen de expedición de GdO EECS según AIB, desde 2020 hasta 2023	52
Tabla 8. Porcentaje de las GdO expedidas en 2023 por tipo de tecnología en cada país	55
Tabla 9. Tasa de expedición de GdO por país y tecnología para los años 2021, 2022 y 2023.....	57
Tabla 10. Factores de corrección según la tecnología	71
Tabla 11. Tasa de expedición de GdO media por país y tecnología.....	75
Tabla 12. Demanda industrial - Sectores del NACE analizados	78
Tabla 13. Demanda de electricidad cubierta por GdO (incluye únicamente los 9 dominios de análisis) *Estimación propia	79
Tabla 14. Índice de ingresos según el excedente medio de explotación del sector (Estimación propia)	81
Tabla 15. Índice de exposición del sector NACE a consumidores preocupados por el medio ambiente [3] ...	83
Tabla 16. DAP por electricidad verde de los hogares en función del país	84
Tabla 17. Factores de corrección de la DAP por electricidad verde según el tipo de hogar	84
Tabla 19. Escenarios planteados.....	87
Tabla 19. Oferta y demanda de GdO para cada escenario.....	91
Tabla 20. Inputs para el backtesting	95
Tabla 22. Condiciones impuestas para la negociación, vencimiento y cancelación de GdO por los distintos miembros de AIB.....	115
Tabla 22. Factores de correlación para predecir el precio de la electricidad.....	119
Tabla 23. Factores de correlación para predecir la generación hidráulica.....	119
Tabla 24. Factores de correlación para predecir la generación solar.....	120
Tabla 25. Factores de correlación para predecir la generación eólica.....	120
Tabla 26. Precios de las GdO para los 4 escenarios principales.....	125
Tabla 27. Precios de las GdO para el escenario 1 y los dos subescenarios con condiciones meteorológicas adversas y favorables	126

Tabla 28. Precios de las GdO para el escenario 2 y los dos subescenarios con condiciones meteorológicas adversas y favorables	126
Tabla 29. Precios de las GdO para el escenario 3 y los dos subescenarios con condiciones meteorológicas adversas y favorables	126
Tabla 30. Precios de las GdO para el escenario 4 y los dos subescenarios con condiciones meteorológicas adversas y favorables	127

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Durante los años noventa, la Unión Europea (UE) y los países miembros decidieron liberalizar los mercados nacionales de electricidad y gas natural, todavía monopolísticos. Desde 2003, los consumidores industriales y particulares pueden elegir libremente a su proveedor de electricidad entre un amplio abanico de competidores [1]. En teoría, los usuarios podrían seleccionar activamente proveedores de “electricidad verde”, es decir, electricidad procedente de fuentes renovables como la eólica, la solar o la biomasa. No obstante, en la práctica esto es más complejo porque la electricidad es un bien homogéneo y no es posible determinar el origen de un MegaWatio-hora (MWh) concreto de la red [2]. A pesar de esta limitación, hoy en día los consumidores interesados en comprar electricidad renovable tienen tres opciones: certificados de atributos energéticos (EAC), contratos de compraventa de energía (*Power Purchase Agreement – PPA*) e inversiones en instalaciones de autoconsumo. Entre estas opciones, los EAC son la alternativa más popular entre consumidores industriales y domésticos. En concreto, las garantías de origen (GdO) se introdujeron en la UE en 2001 y actualmente, son el EAC más utilizado en esta región [3].

Las GdO son certificados electrónicos que autentifican la producción de 1 MWh de energía a partir de fuentes renovables, como la solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica, biomasa, etc [4, 5]. Gracias al sistema de GdO, las comercializadoras pueden acreditar que la energía suministrada a sus clientes durante un período específico proviene de fuentes renovables o de cogeneración de alta eficiencia. De esta forma, los usuarios disponen de la información necesaria para tomar una decisión responsable sobre a quién compran la energía que consumen.

Las GdO pueden comercializarse libremente en la mayoría de los países europeos, y desde su introducción ha surgido un mercado específico para estos certificados. En el mercado europeo de GdO, por cada MWh de electricidad verde que un productor vierte a la red, este puede solicitar la expedición de una GdO en el registro nacional correspondiente. Durante su periodo de validez, la GdO puede transferirse entre empresas, comerciantes y

proveedores nacionales o internacionales hasta que se cancele, una vez se hayan vendido los MWh correspondientes de electricidad verde y se haya comunicado al consumidor. Si la GdO no se cancela dentro de un tiempo limitado¹ desde el momento de producción correspondiente, expira y se elimina del registro. En tal caso, los MWh siguen inyectándose a la red, pero la etiqueta de “electricidad verde” se pierde.

Actualmente, las GdO son certificadas por un sistema nacional, así como por AIB, una asociación que desarrolla y promueve un sistema europeo, armonizado y normalizado de certificación energética: el Sistema Europeo de Certificación Energética (EECS). EECS se basa en estructuras y procedimientos que garantizan el funcionamiento fiable de los sistemas de certificación energética en Europa. Estos sistemas cumplen criterios de objetividad, no discriminación, transparencia y rentabilidad, con el fin de facilitar el intercambio internacional de las GdO [6, 7].

A finales de 2023, AIB contaba con 36 miembros procedentes de 28 países europeos. Todos ellos son Organismos Emisores autorizados por el gobierno del país para administrar un sistema de GdO para la electricidad y/o los gases renovables [8]. En España, hay dos organismos, miembros de AIB, encargados de la expedición y gestión de las GdO que son la Comisión Nacional de los mercados y la Competencia (CNMC) y Enagás GTS. La CNMC es la institución responsable del sistema de GdO para la electricidad, mientras que Enagás GTS es la entidad responsable de emitir las GdO para gases renovables como el hidrógeno verde, el biometano o el biogás.

El mercado de GdO opera de manera independiente del mercado de electricidad, ya que con las GdO solo se negocia el origen verde de la electricidad [3]. Este mercado se caracteriza por un comercio bilateral poco transparente que tiene lugar o bien mediante negociaciones privadas o bien a través de plataformas de pago como *Green Power Hub*. En el futuro, lo ideal sería contar con una plataforma pública de subasta para aumentar la

¹ En todos los países europeos que pertenecen a AIB el periodo de validez de las GdO es de 12 meses desde el momento de producción, excepto en Irlanda y Lituania que son 18 meses.

transparencia, la visibilidad y la liquidez del mercado. A pesar de los esfuerzos realizados hasta la fecha, la información pública disponible sobre los precios de las GdO es muy limitada. Asimismo, los precios de estos certificados están sujetos a una gran volatilidad y a comportamientos oportunistas, como se analizará en este trabajo. Todos esos desafíos han dado lugar a una importante asimetría de la información, reflejada en la evolución del mercado observada tanto en 2018 como en la segunda mitad de 2022.

En 2018, el mercado experimentó aumentos de precios sin precedentes debido a las previsiones de bajos niveles en los embalses hidroeléctricos noruegos, lo que generó expectativas de reducción en el suministro de GdO. Una vez quedó claro que la producción se mantendría estable, los precios volvieron a los niveles anteriores a 2018. En 2022 se observó una evolución similar de los precios. De acuerdo con un informe publicado por un asesor de mercado de reconocido prestigio [9], los precios de las GdO en 2022 alcanzaron máximos históricos debido a un descenso del 23% en la generación hidroeléctrica y a los altos precios de la electricidad. Por un lado, la producción hidroeléctrica es la mayor fuente de GdO en Europa, suministrando más del 50% del total de estas certificaciones. La disminución de la generación hidroeléctrica en 2022, fruto de la sequía que sufrieron los países nórdicos y el sur de Europa, tuvo un impacto significativo en la oferta de GdO, provocando una gran subida de los precios. Las GdO hidroeléctricas nórdicas alcanzaron un récord de 10 €/MWh a finales de noviembre de 2022. Por otro lado, la Figura 1 refleja la fuerte correlación histórica entre los precios de las GdO y los precios de la electricidad. Especialmente en los años en que los precios de la electricidad eran más altos, los precios de las GdO representaban un porcentaje más elevado del precio básico de la electricidad.

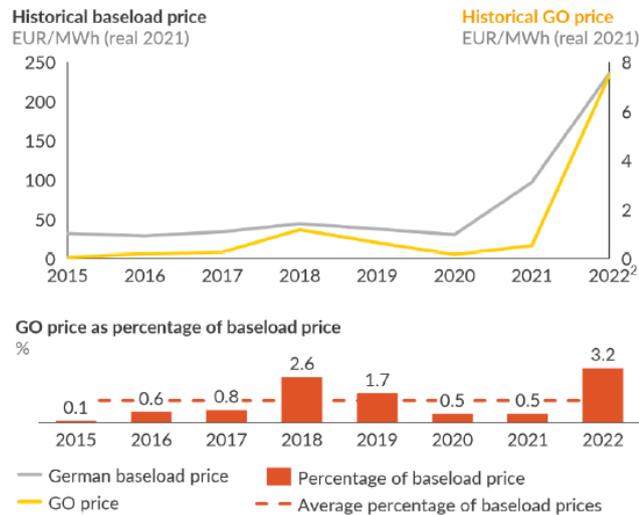


Figura 1. Relación histórica entre el precio de la electricidad y el precio de las GdO [9]

La inestabilidad de los precios, la falta de transparencia y otros problemas, como la información insuficiente para los consumidores o la doble contabilidad, han suscitado críticas hacia el sistema de GdO. Este sistema se percibe más como un instrumento comercial que como un mecanismo político adicional para fomentar la generación de energía verde.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

El mercado de GdO tiene un gran potencial, impulsado por las directrices del Pacto Verde Europeo, así como por la creciente concienciación social en materia de sostenibilidad. Los consumidores dan cada vez más importancia al impacto ambiental que tienen los productos que compran, y esto se refleja también en el ámbito energético. En el caso de España, todas las comercializadoras están obligadas a mostrar el etiquetado de electricidad en sus facturas a fin de que los consumidores puedan tomar decisiones informadas sobre qué empresa contratar [10]. Esta etiqueta se determina comparando el mix energético que la comercializadora, en particular, ha suministrado al conjunto de sus clientes, con el mix de generación nacional. Gracias al sistema de GdO, las comercializadoras pueden acreditar ante sus clientes un porcentaje de energías renovables o de cogeneración de alta eficiencia superior al de otras empresas del sector.

El creciente interés por las GdO se refleja en la solidez de la demanda y en la disposición de los consumidores a pagar un extra para obtener la acreditación. No obstante, el mercado de GdO se enfrenta a desafíos, entre los que destacan la volatilidad de los precios y la falta de transparencia [11]. Por un lado, la fluctuación histórica de los precios de las GdO plantea la cuestión de cuál es el límite hasta el cual los clientes están dispuestos a pagar. Este debate adquiere relevancia en el contexto de las actuales protestas de los agricultores en Europa. Cientos de tractores han invadido ciudades como Madrid, París, Roma o Berlín, en señal de protesta contra la política agraria y ambiental de la UE. Los agricultores se manifiestan porque las políticas del Pacto Verde resultan en un incremento de los costes de producción, que perjudica la rentabilidad del sector y les ponen en desventaja frente a competidores de otros países. De forma análoga, las GdO suponen un suplemento en el coste de la energía para las comercializadoras, empresas y otros clientes, con el fin de demostrar que están cumpliendo con las políticas del Pacto Verde europeo. En este sentido, cabe cuestionarse la disposición de los clientes a pagar tanto más por estas acreditaciones.

Por otro lado, la negociación a través de contratos bilaterales resulta en una falta de transparencia que impide a consumidores e inversores tener un precio de referencia válido. Esta opacidad supone un gran desafío a la hora de predecir la evolución del mercado de las GdO, predicción necesaria por los productores de electricidad para minimizar los riesgos y maximizar las ganancias.

En este marco, el presente proyecto busca dar visibilidad al mercado de GdO. Su esencia radica en comprender a fondo los factores que influyen en los precios de las GdO, justificando su evolución histórica en varias regiones de Europa. La principal contribución es un modelo para predecir los precios del GdO a largo plazo en condiciones de mercado no transparentes, como las que prevalecen hoy en día. Aunque algunos asesores de mercado ofrecen previsiones de precios de GdO, ninguno da información acerca del modelo empleado. Por ello, al modelizar explícitamente la oferta y la demanda de GdO, este trabajo aporta transparencia y nuevas perspectivas sobre los mecanismos del mercado actual.

El modelo desarrollado ofrecería una referencia de precio tanto para comercializadoras como para otros consumidores, facilitándoles la toma de decisiones informadas al adquirir GdO. Además, los inversores en plantas de energía renovable podrían emplear las proyecciones de precios para evaluar con mayor precisión la rentabilidad de sus proyectos. Finalmente, este modelo podría ayudar a los reguladores a identificar si es necesario reformar el mercado actual de GdO y en qué aspectos específicos realizar dicha reforma. Por el momento, conforme a lo acordado al inicio del proyecto, el modelo desarrollado es de uso exclusivo de Qualitas Energy, entidad colaboradora (de ahí que se use el condicional en las posibles aplicaciones del trabajo).

Capítulo 2. MARCO REGULATORIO

En este capítulo, se examina el marco regulatorio que gobierna las energías renovables y las GdO. Comprender este contexto normativo es crucial para analizar de manera efectiva el mercado de las GdO, ya que las regulaciones gubernamentales y sectoriales moldean la producción, certificación y comercialización de energía verde. Se destacan las regulaciones clave a nivel nacional y europeo, que proporcionan los fundamentos necesarios para entender la evolución histórica del precio de las GdO y predecir su valor a largo plazo.

2.1 MARCO REGULATORIO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES A NIVEL EUROPEO

El actual marco normativo que rige el sector eléctrico europeo se encuentra delineado por el «Paquete de energía limpia para todos los europeos», aprobado por la UE en 2016 con el objetivo de mantener el liderato mundial de energías renovables. Este paquete está compuesto por cuatro reglamentos y cuatro directivas. Según el Tratado de Funcionamiento de la UE, las directivas requieren ser incorporadas al ordenamiento jurídico nacional mediante una norma de rango legal, mientras que los reglamentos tienen aplicación directa [12].

Dentro del «Paquete de energía limpia para todos los europeos», dos elementos de especial interés son el Reglamento (UE) 2019/943 y la Directiva (UE) 2019/944, ambos promulgados el 5 de junio de 2019. El primero aborda el mercado interior de la electricidad, mientras que el segundo establece normas comunes para dicho mercado, modificando la Directiva 2012/27/UE.

2.1.1 DIRECTIVAS SOBRE FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES

En el ámbito de las fuentes de energía renovables, la Directiva original de 2009 estableció objetivos ambiciosos para la UE, marcando que el 20% del consumo final bruto de energía debería provenir de fuentes renovables para 2020. No obstante, en diciembre de 2018, la Directiva fue revisada como parte del paquete «Energía limpia para todos los europeos». Esta revisión estableció un nuevo objetivo vinculante del 32% de energía renovable para la UE hacia 2030. Para alcanzar estos objetivos, los Estados miembros debían presentar planes detallados, conocidos como planes nacionales a diez años en materia de energía y clima (PNEC), antes de marzo de 2023. Estos planes son sometidos a evaluación y seguimiento regular por parte de la Comisión Europea [13].

Posteriormente, la Directiva sobre fuentes de energía renovables experimentó tres modificaciones significativas [13]. La primera, en julio de 2021 como parte del paquete de medidas «Objetivo 55», elevó el objetivo de energía renovable al 40% para 2030, promoviendo el uso de combustibles renovables como el hidrógeno. La segunda enmienda, propuesta en mayo de 2022 como respuesta a la guerra entre Rusia y Ucrania, aumentó el objetivo al 45% para 2030, destacando la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles rusos. La tercera enmienda, en noviembre de 2022, aceleró el despliegue de energías renovables al considerarlas de interés público superior, simplificando los procedimientos de permisos.

En octubre de 2023, la Directiva fue actualizada nuevamente, estableciendo un objetivo de fuentes de energía renovable del 42.5% para 2030, pero instando a los Estados miembros a esforzarse por alcanzar el 45% [13]. Esta revisión agiliza los procedimientos de autorización para nuevas instalaciones de energía renovable y establece objetivos específicos para sectores clave como el transporte y la industria.

2.1.2 PACTO VERDE EUROPEO

Más allá de la directiva europea sobre fuentes de energía renovables cabe mencionar el Pacto Verde Europeo, presentado formalmente en diciembre de 2019. El objetivo de este

compromiso es lograr la neutralidad climática para 2050, conforme a lo establecido en el Acuerdo de París, mediante la transformación del sistema energético [14]. El paquete «Objetivo 55» implementó este pacto en 2021, revisando y actualizando la legislación de la UE en materia de energía, clima y biodiversidad. En 2022, este paquete quedó modificado por el plan REPowerEU a fin de eliminar gradualmente la dependencia de los combustibles fósiles, una medida particularmente relevante tras la invasión rusa de Ucrania.

2.2 MARCO REGULATORIO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN ESPAÑA

En España, hay diversos organismos y empresas que desempeñan un papel fundamental en el correcto funcionamiento del Mercado Ibérico de la Electricidad (MIBEL). Para una mejor comprensión del marco regulatorio de las energías renovables se va a realizar un breve resumen previo sobre los principales agentes del MIBEL y la normativa que regula este mercado.

2.2.1 NORMATIVA Y PRINCIPALES AGENTES DEL MIBEL

La principal normativa que regula las actividades del sector eléctrico en España es la Ley 24/2013. Esta ley confiere a Red Eléctrica (REE) la responsabilidad de llevar a cabo las actividades de transporte y operación del sistema eléctrico, así como la función de gestor de la red de transporte [15]. Aunque la Ley 24/2013 deroga en su mayoría la Ley 54/1997, mantiene la disposición adicional vigesimotercera de esta última, que establece la estructura societaria actual para las actividades de REE.

La retribución de las actividades de transporte de energía eléctrica y operación del sistema también está regulada. El Real Decreto-ley 1/2019 asigna a CNMC la competencia para aprobar la metodología, los parámetros retributivos, la base regulatoria de activos y la remuneración anual de las actividades de transporte y operación del sistema. En este sentido, la CNMC aprobó una serie de circulares (Circular 5/2019, Circular 2/2019, Circular 7/2019

y Circular 4/2019) para transmitir instrucciones y decisiones sobre la retribución de ambas actividades.

Por otro lado, la Orden IET/2732/2015 [16] al amparo de lo previsto en el Reglamento (UE) 2015/1222 de la Comisión, designa a OMIE (Operador del Mercado Ibérico de Energía) como el operador del mercado eléctrico para el acoplamiento único diario e intradiario en España y Portugal. En el mercado de electricidad, al igual que en cualquier otro mercado, se facilita la compraventa de electricidad entre diversos agentes, tales como productores, consumidores y comercializadoras. Este proceso se lleva a cabo mediante un sistema informático que permite la interacción simultánea de numerosos agentes. La plataforma facilita la gestión de diversas ofertas en un corto periodo de tiempo, garantizando transparencia y accesibilidad en la fijación de precios. Además, permite una ágil realización de las liquidaciones económicas, cerrando así el ciclo de transacciones del mercado.

Los procesos y mercados del MIBEL siguen la secuencia mostrada en la Figura 2. En primer lugar, tanto los contratos bilaterales como los contratos *forward* se cierran antes de que tenga lugar el mercado diario. Por un lado, los contratos *forward* son acuerdos a largo plazo entre un agente y OMIP para la entrega de una determinada cantidad de energía. El principal objetivo de estos acuerdos es reducir los riesgos relativos a la volatilidad de precios [17]. Por otro lado, los contratos bilaterales físicos son acuerdos de compraventa de energía que se establecen entre dos agentes del mercado, de forma paralela al mercado diario. La cantidad y el precio de la electricidad queda acordado por ambas partes, independientemente de la subasta pública. No obstante, estos acuerdos deben ser comunicados a OMIE después del mercado diario.

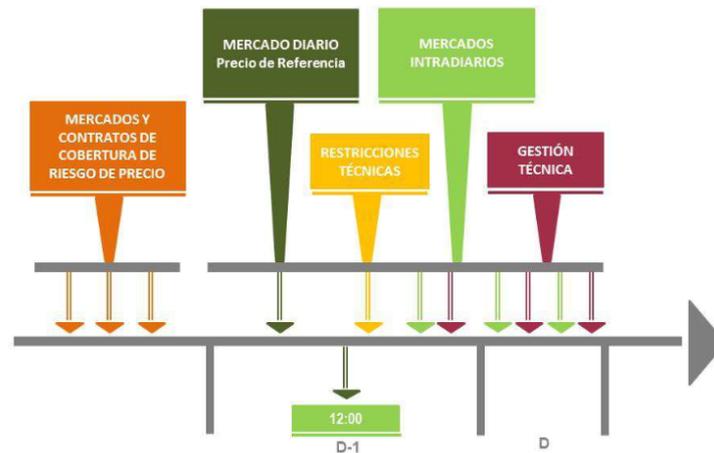


Figura 2. Cronología de los mercados y Procesos del MIBEL [18]

El mercado diario, activo durante todos los días del año, destaca como el principal escenario para la contratación de electricidad en la Península Ibérica. Siguiendo el modelo marginalista, el precio y el volumen de contratación por hora se determinan mediante el equilibrio entre la oferta y la demanda. Diariamente, hasta las 12:00 del mediodía, se reciben ofertas de compra y venta de energía eléctrica para el día siguiente. Estas ofertas se procesan junto con las de los operadores del MRC (*Market Coupling of Regions*) mediante el algoritmo europeo EUPHEMIA. Concluido este proceso, OMIE divulga públicamente los precios y la energía que se producirá y comprará en cada hora del día siguiente en el mercado ibérico.

Después del mercado diario, tiene lugar el proceso de restricciones técnicas, llevado a cabo por REE. Su finalidad es evitar sobrecargas, problemas de tensiones y diferencias de frecuencia. Cabe notar que las energías renovables tienen prioridad de despacho. A continuación, tienen lugar los mercados de ajustes, conocidos como mercados intradiarios. Aquí, compradores y vendedores pueden realizar ofertas para ajustar sus programas de producción y consumo según las previsiones en tiempo real. Se trata de mercados muy similares al mercado diario cuya finalidad es corregir errores de previsión, fallos de generadores y otros eventos inesperados.

Por último, tiene lugar la gestión técnica. REE se encarga de cubrir posibles desequilibrios entre la oferta y la demanda entre un mercado intradía y el siguiente, así como de regenerar la reserva secundaria. Finalmente, se lleva a cabo la liquidación de la energía comprada y vendida en los diversos mercados, y se emite la factura correspondiente, accesible diariamente para los agentes a través de un certificado digital que garantiza la confidencialidad. Los cobros y pagos de cada semana natural se ejecutan los miércoles y jueves de la semana siguiente.

2.2.2 REGULACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN ESPAÑA

Una vez comprendido el funcionamiento del MIBEL, resulta de gran interés examinar el marco regulatorio de las energías renovables en España. A pesar de que el mercado de GdO es independiente del mercado eléctrico, la creciente regulación de energías renovables influye significativamente en la compraventa de estas garantías.

Como se ha mencionado en la sección 2.1.1, los países miembros de la UE están obligados a presentar ante la Comisión Europea un plan nacional a diez años en materia de energía y clima. En el caso de España, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) ha establecido el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) (2021-2030). Este plan establece un objetivo de reducción de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) del 32% en 2030 respecto a 1990. Asimismo, fija un objetivo de consumo final de energías renovables del 48%, con un 81% de la generación de electricidad [19]. A fin de lograr estas metas tan ambiciosas, se espera una inversión de casi 300.000 millones de euros, con un 40% destinado a energías renovables. Gracias a este impulso, se estima que en 2030 habrá instalados 62 GW de eólica, 76 GW de fotovoltaica, 4,8 GW de solar termoeléctrica, 1,4 GW de biomasa y 22 GW de almacenamiento.

En este contexto, España ha experimentado un desarrollo significativo en las tecnologías de generación eléctrica mediante fuentes renovables en los últimos años. En parte, este progreso ha sido posible gracias a sucesivas regulaciones que han establecido incentivos económicos a la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables,

de cogeneración y residuos. Hoy en día, existen dos marcos normativos principales en este ámbito: el régimen retributivo específico y el régimen económico de energías renovables [20].

Por un lado, el régimen retributivo específico está regulado por el Real Decreto 413/2014, de 6 de junio [21], y se materializa a través de subastas de potencia, donde los participantes compiten por obtener una retribución específica. Este enfoque proporciona un mecanismo estructurado para asignar recursos y establecer la compensación económica correspondiente. Por otro lado, el Real Decreto 960/2020, de 3 de noviembre [22], regula el régimen económico de energías renovables. Este sistema se basa en procedimientos de concurrencia competitiva, donde la variable clave es el precio por unidad de energía eléctrica. En estas subastas, se puede licitar por potencia instalada, energía eléctrica o una combinación de ambas.

Es relevante señalar que existen otros mecanismos de apoyo a las energías renovables, como las líneas de ayudas para la inversión en renovables térmicas y eléctricas, cofinanciadas con fondos de la Unión Europea y gestionadas por el IDAE [20]. Además, se observa un creciente número de instalaciones que optan por no recibir apoyo directo y participan libremente en el mercado, siguiendo las pautas establecidas por la normativa del sector. Este cambio refleja una mayor madurez y competitividad de ciertas tecnologías renovables en el mercado eléctrico.

2.3 MARCO REGULATORIO DE LAS GdO

Actualmente, el sistema de GdO en Europa está regulado por la Directiva (UE) 2023/2413 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de octubre de 2023, por la que se modifican la Directiva (UE) 2018/2001, el Reglamento (UE) 2018/1999 y la Directiva 98/70/CE en lo que respecta a la promoción de la energía procedente de fuentes renovables y se deroga la Directiva (UE) 2015/652 del Consejo. De acuerdo la directiva 2023/2413, los Estados miembros son los encargados de velar por la expedición, el comercio, la transferencia y el uso de GdO, en un sistema uniforme con certificados debidamente

normalizados que sean mutuamente reconocidos en toda la UE [23]. En otras palabras, el gobierno de cada país es el responsable del sistema de GdO a nivel nacional, cumpliendo en todo momento con la mencionada directiva.

Entre las normas establecidas por la Directiva 2023/2413 en materia de GdO, cabe mencionar que estos certificados tienen una validez de doce meses a partir de la producción de la unidad de energía correspondiente. Los Estados miembros deben asegurarse de que las empresas energéticas cancelan las GdO en un plazo máximo de seis meses después de que finalice su validez. Además, las GdO expiradas deben considerarse en el cálculo de la combinación energética residual del país correspondiente.

Por otro lado, la Directiva 2023/2413 especifica que la exportación de GdO puede limitarse a productores que no reciban ayuda financiera de sistemas de apoyo. Se establece un volumen normalizado de 1 MWh por GdO, permitiendo su fraccionamiento en múltiplos de 1 MWh. También se introducen procesos de registro simplificados y tasas reducidas para instalaciones más pequeñas y comunidades renovables.

A fin de armonizar los principios y aspectos esenciales de los elementos que constituyen el sistema de GdO, el Comité Europeo de Normalización (CEN) estableció en 2013 la norma EN 16325. Esta norma europea tiene propósitos de certificación y de ahí que esté basada en las reglas de EECS. En ella se establecen la terminología y definiciones pertinentes, los requisitos para el registro, emisión, transferencia y anulación, en línea con el RES, la Eficiencia Energética y las Directivas IEM. Además, también cubre los métodos de medición y los procedimientos de auditoría [24]. Cabe mencionar que originalmente esta norma se diseñó exclusivamente para GdO de electricidad y, por tanto, actualmente está en revisión para incluir todos los vectores energéticos. Este proceso de revisión comenzó en 2020, pero no está prevista su aprobación a corto plazo [25, 26].

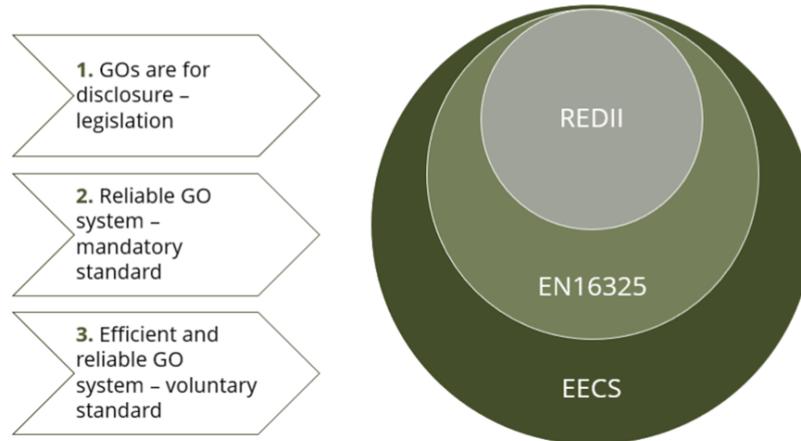


Figura 3. Marco regulatorio de las GdO [7]

El marco EECS permite la transferencia de GdO entre titulares de cuentas dentro de un mismo país y entre países y regiones, es decir, el comercio de GdO puede realizarse a escala internacional. Debido a las diferencias en normativa que existen entre los diferentes sistemas, es necesaria una institución independiente reconocida que garantice la correcta tramitación de las GdO [3]. En este contexto surgió la Asociación de Organismos Emisores (AIB), creada en el año 2000 con la misión de garantizar el origen de las fuentes de energía europeas y permitir el comercio entre registros nacionales [27]. AIB pretende unir a los organismos emisores europeos de sistemas de seguimiento de atributos energéticos para todos los vectores y tecnologías energéticas, utilizando así una estructura de toma de decisiones que respete sus distintas identidades y permita al mismo tiempo una evolución continua [28]. En la actualidad, AIB cuenta con 36 miembros de 28 países europeos, todos ellos designados por sus gobiernos para administrar su sistema nacional de GdO. Véase Figura 4.

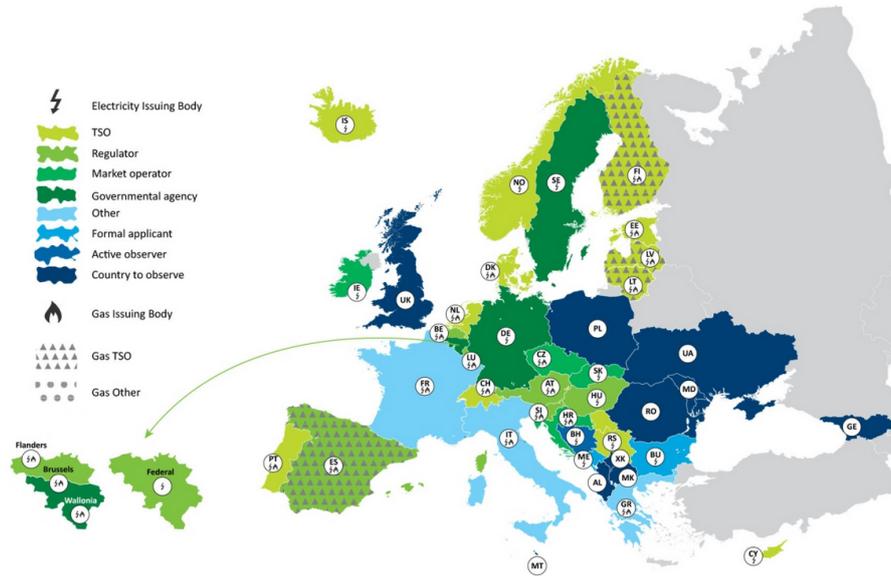


Figura 4. Países / Regiones miembros de la AIB [8]

2.3.1 DIFERENCIAS DE REGULACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS PAÍSES DE EUROPA

Las regulaciones sobre los sistemas de GdO pueden variar entre los distintos países de Europa, cumpliendo siempre con los principios y directrices comunes establecidos por la UE. Algunas de las diferencias incluyen los procedimientos y requisitos de emisión, las tasas de transacción, los tipos de GdO aceptadas, la validez de las GdO, la normativa técnica, los participantes del mercado, los incentivos y apoyos financieros, o la transparencia y publicación de información. En esta sección se incluyen algunas de las diferencias más relevantes que influyen en la compraventa de estos certificados.

En primer lugar, los países miembros de EECS se pueden clasificar en cuatro categorías, en función de su regulación sobre la expedición de GdO [3]. Esta clasificación se recoge en la Tabla 1.

Categoría	Descripción	Países
1	Subasta de GdO subvencionadas	Francia, Luxemburgo, Eslovenia, Portugal, Hungría, Italia, Croacia
2	Sin regulaciones sobre la <u>expedición</u> de GdO subvenciones	Bélgica, República Checa, Grecia, Países Bajos, Noruega, España, Suecia, Austria, Dinamarca, Estonia, Finlandia, Suiza, Chipre y Lituania
3	Sin emisión de GdO subvencionadas	Alemania, Irlanda, Serbia
4	Sin sistema de subvenciones para la electricidad renovable	Islandia

Tabla 1. Clasificación de países miembros de EECS en función del sistema de GdO introducido

Se incluye también una breve explicación de cada de las categorías:

- 1. Subasta de GdO subvencionadas.** En estos países se emiten GdO para la electricidad subvencionada, pero estas GdO se subastan para compensar los costes del sistema de apoyo. En otras palabras, las GdO relacionadas con la generación de electricidad a partir de fuentes renovables que se benefician de apoyo financiero deben ser entregadas al gobierno o a una organización designada, que las transfiere a través de subastas. Los ingresos netos de estas subastas se destinan a financiar el sistema de subsidio o a otras iniciativas relacionadas con la producción de electricidad renovable. Por otro lado, en estos países se permite el libre comercio de GdO para electricidad no subvencionada.
- 2. Sin regulaciones sobre la expedición de GdO subvencionadas.** En estos países no hay regulaciones específicas sobre la expedición de GdO a productores que reciben subvenciones. Es decir, todos los productores pueden solicitar la expedición de GdO, independientemente de si se benefician de un sistema de apoyo. Si bien, puede haber restricciones específicas que apliquen a otros procedimientos relacionados con el comercio de GdO subvencionadas. Por ejemplo, en España solo se pueden exportar GdO asociadas a electricidad subvencionada si se renuncia al régimen retributivo.
- 3. Sin emisión de GdO subvencionadas.** Los países pertenecientes a esta categoría no expiden GdO a los productores que reciben ayuda financiera de un régimen de apoyo. Esta disposición se basa en la premisa de que el consumidor final ya ha pagado por el certificado verde de la unidad de energía a través del sistema de ayudas y, por tanto, es necesario protegerles frente a costes adicionales. Esto tiende a dar lugar a precios más

altos en las licitaciones para el fomento de las energías renovables, ya que los ingresos procedentes de las GdO no pueden incluirse en las ofertas.

4. **Sin sistema de subvenciones para la electricidad renovable.** Islandia no cuenta con un sistema de subsidios para la producción de energía renovable. Su política energética se centra en la utilización de sus abundantes recursos naturales, particularmente la energía geotérmica e hidroeléctrica, que proporcionan casi toda la electricidad del país (99.9%). Estos recursos son inherentemente de bajo coste y no requieren subsidios para ser competitivos. En cuanto a las GdO, Islandia sí expide estos certificados y permite el libre comercio de los mismos.

Otro aspecto relevante en el comercio internacional de las GdO son las tasas de transacción. Estas tasas determinan el comportamiento de los países, es decir, si son exportadores o importadores, si son consumidores o productores y si actúan como centro de comercio de GdO, cuando las tasas son bajas [3]. De acuerdo con la estadística de actividad de 2023 publicada por AIB [29], los países miembros de la EECS se pueden clasificar según la Tabla 2. Cabe notar las siguientes consideraciones: (1) Un país se considera exportador si el número de GdO exportado es superior al número de GdO importado y viceversa, (2) Un país se considera centro de comercio si el ratio GdO importadas/GdO canceladas es superior a 1 y (3) Un país se considera consumidor de GdO si el número de GdO emitidas es inferior al número de GdO canceladas, en caso contrario el país se considera productor de GdO. Los resultados mostrados en la Tabla 2 hacen referencia al comportamiento medio entre los años 2019 y 2023.

País	Entidad competente	Tasas	Sistema de Certificación Nacional	Comercio Internacional	Plataforma Propia	Exportador / Importador (2019-2023)	Centro de Comercio	Consumidor / Productor (2019-2023)
Austria	E-Control	No	No	Sí	Sí	Importador	No	Productor
Bélgica (Federal)	CREG	No	No	Sí	Sí	Exportador	Sí	Productor
Bélgica (Bruselas)	Brugel	No	No	Sí	Sí	Exportador	No	Consumidor
Bélgica (Flandes)	VREG	Sí	Sí	Sí	Sí	Importador	Sí	Consumidor
Bélgica (Valonia)	SPW Energie / CWaPE	No	Sí	Sí	Sí	Importador	Sí	Consumidor
Suiza	Pronovo	Sí	No	Sí	Sí	Importador	No	Productor
Chipre	TSOC	Sí	Sí	Sí	Sí	Sin datos	Sin datos	Productor
República Checa	OTE	Sí	No	Sí	Sí	Exportador	No	Productor
Alemania	UBA	Sí	Sí	Sí	Sí	Importador	Sí	Consumidor

Dinamarca	Energinet	Sí	No	Sí	No (CMO.grex el)	Exportador	Sí	Productor
Estonia	Elering	Sí	No	Sí	Sí	Exportador	Sí	Productor
España	CNMC	No	Sí	Separación de GO destinados a importación y exportación	Sí	Exportador	No	Productor
Finlandia	Finextra	Sí	Sí	Sí	Sí	Exportador	No	Productor
Francia	EEX	Sí	No	Sí	Sí	Exportador	No	Productor
Grecia	DAPEEP / HEDNO / CRES	No	Sí	Sí	Sí	Sin datos	Sin datos	Sin datos
Croacia	HROTE	Sí	No	Sí	No (CMO.grex el)	Exportador	No	Productor
Irlanda	SEMO	No	No	Sí	No (CMO.grex el)	Importador	No	Consumidor
Islandia	Landsnet	Sí	No	Sí	No (CMO.grex el)	Exportador	No	Productor
Italia	GSE	Sí	No	Sí	Sí	Exportador	No	Productor
Lituania	Litgrid AB	Sí	Sí	Sí	No (CMO.grex el)	Importador	No	Consumidor
Luxemburgo	ILR	Sí	No	Sí	No (CMO.grex el)	Importador	Sí	Consumidor
Países Bajos	CertiQ	Sí	No	Sí	Sí	Importador	No	Consumidor
Noruega	Statnett	Sí	No	Sí	Sí	Exportador	Sí	Productor
Portugal	Rede Eléctrica Nacional	Sí	Sí	Sí	Sí	Exportador	No	Productor
Serbia	EMS	Sí	No	Sí	Sí	Exportador	No	Productor
Suecia	Energimyndighe ten	Sí	Sí	Sí	Sí	Exportador	No	Productor
Eslovenia	Energy Agency / Borzen	Sí	Sí	Sí	Sí	Exportador	No	Productor
Eslovaquia	OKTE	Sí	No	Sí	Sí	Exportador	No	Productor

Tabla 2. Comportamiento comercial de los países miembros de EECS (2019-2023) [29, 3]

Finalmente, en un esfuerzo por mejorar la transparencia, AIB realiza periódicamente una encuesta entre sus miembros sobre las diferencias en las condiciones impuestas para la negociación, vencimiento y cancelación de las GdO [30]. A partir de los resultados de la encuesta de 2023, resumidos en la Tabla 21, se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- 1. Condiciones de exportación.** En 9 de los 27 países que pertenecen a AIB no hay condiciones de exportación, más allá de una limitación técnica: las exportaciones se deben realizar a través del *hub* AIB. En el resto de los países existen condiciones relacionadas con la exportación a países que no son miembros de AIB o con la exportación de GdO subsidiadas. Además, Lituania participa en AIB solo con un esquema de importación.
- 2. Condiciones de importación.** En el caso de las importaciones, los requisitos suelen ser más estrictos. Solo 6 de los 27 países permiten la libre importación de GdO a través del

- hub* AIB. En el resto de los dominios existen condiciones relacionadas con los países desde donde está permitida la importación (normalmente se permite la importación solo desde países que pertenecen a AIB) o con los tipos de GdO que se pueden importar (solo GdO renovables).
3. **Condiciones de cancelación.** En 10 de los 27 países analizados no existen condiciones relativas a la cancelación de GdO. En el resto de los dominios solo los proveedores de electricidad o los titulares de cuentas pueden cancelar las GdO.
 4. **Transparencia.** El 89% de los encuestados publica estadísticas sobre la emisión de GdO y los tres países que, por el momento, no lo hacen, afirman estar trabajando en ello. De los 24 países que publican estadísticas, 8 lo hacen de manera inmediata, 3 a diario, 9 mensualmente, 2 trimestralmente y 1 anualmente. Por su parte Alemania, publica sus estadísticas a la vez que AIB.
 5. **Regla de validez.** En todos los países miembros de AIB las GdO expiran 12 meses después del final del periodo de producción correspondiente, excepto en Irlanda y Lituania que el periodo de validez asciende a 18 meses. Cabe mencionar que solo dos de cada tres países publican información sobre GdO caducadas.
 6. **Tipos de GdO aceptadas.** La mitad de los países aceptan GdO renovables y de origen no renovable (es decir, procedente de otras fuentes como cogeneración de alta eficiencia), mientras que la mitad restante solo acepta GdO procedentes de fuentes renovables.

Es importante tener en cuenta que las diferencias mencionadas en esta sección no son exhaustivas y que la armonización gradual está en marcha a través de las directrices de la UE para lograr un mercado europeo de energía más integrado y transparente.

2.3.2 REGULACIÓN DE GDO EN ESPAÑA

Como se mencionó en la introducción, en España hay dos organismos, miembros de AIB, encargados de la expedición y gestión de las GdO que son la CNMC y Enagás GTS. La CNMC es la responsable del sistema de GdO para la electricidad, mientras que Enagás GTS se encarga de emitir las GdO para los gases renovables como el hidrógeno verde, el

biometano o el biogás [31]. En todo caso, la CNMC es el organismo oficial encargado de la regulación de las GdO en el territorio nacional y la plataforma donde se lleva a cabo el registro de estos certificados.

La normativa que rige el sistema de GdO en España se compone de tres documentos principales: la Orden ITC/1522/2007, de 24 de mayo; el Real Decreto 413/2014, de 6 de junio; y Circular 1/2018, de 18 de abril, de la CNMC [32]. En primer lugar, la Orden ITC/1522/2007 [33] establece la regulación de GdO de electricidad procedente de fuentes de energía renovables y de cogeneración de alta eficiencia. Esta normativa detalla los procedimientos para la emisión voluntaria de las GdO, asignando código de identificación únicos a las instalaciones de generación. Además, establece directrices para la transferencia y redención de estas garantías, asegurando la trazabilidad y transparencia en la cadena de suministro eléctrico. En esencia, la orden busca respaldar el desarrollo sostenible y la confianza del consumidor al proporcionar información clara sobre la procedencia de la energía eléctrica.

En segundo lugar, el Real Decreto 413/2014 regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos [34]. Este decreto establece las condiciones para la retribución económica de estas instalaciones, establece procedimientos administrativos para su autorización, operación y cierre, y detalla condiciones técnicas y económicas para su conexión a la red eléctrica. Además, introduce mecanismos específicos para el régimen retributivo de las energías renovables, asegurando la estabilidad económica para los productores. Este decreto es fundamental al proporcionar un marco normativo integral que aborda diversos aspectos técnicos y administrativos relacionados con la generación de energía limpia en el país.

Por último, la Circular 1/2018, de 18 de abril, regula la gestión del sistema de GdO de la electricidad procedente de fuentes de energía renovables y de cogeneración de alta eficiencia [35]. Los procedimientos recogidos en esta circular se materializan en las actuaciones mostradas en Tabla 3. Cabe notar que en España existe una acreditación de plan de ingresos de GdO. Los ingresos generados por la venta de estos certificados deben ser

contabilizados de manera independiente. Durante el primer trimestre de cada año, los productores a quienes se les hayan expedido GdO deben presentar un informe ante la CNMC sobre el plan de uso de dichos ingresos. Estos pueden ser destinados a financiar nuevos desarrollos de instalaciones de generación de energía renovable y cogeneración que no sean rentables con el sistema de retribución actual, o a actividades de investigación y desarrollo (I+D) centradas en la mejora del medio ambiente global [36].

Procedimiento	Quién Puede Solicitar	Cómo	Resultado
Solicitud de Expedición	Titular de una instalación de generación eléctrica	Solicitud voluntaria a la CNMC	Emisión de GdO con código único, anotado en la cuenta de la instalación
Solicitud de Transferencia	Tenedor de GdO	Justificación de ingresos por transferencia a la CNMC	Autorización para transferir GdO a otro tenedor
Acreditación Plan de Ingresos	Tenedor de GdO	Justificación de ingresos y plan de aplicación a la CNMC	Acreditación del plan de ingresos
Solicitud de Importación	Titular de una instalación de generación	Solicitud a la CNMC para importar GdO	Autorización para importar GdO de otros países
Solicitud de Exportación	Titular de una instalación de generación	Solicitud a la CNMC para exportar GdO, renunciando al régimen retributivo	Autorización para exportar GdO, con renuncia al régimen retributivo específico
Solicitud de Renuncia	Titular de una instalación o comercializador	Redimir GdO asignándolas a consumidores	Redención de GdO en consumidores específicos
Solicitud de Redención	Titular de instalación o representante, o comercializador	Desistir de solicitudes no tramitadas	Desistimiento de solicitudes no tramitadas
Solicitud de Desistimiento	Solicitante de cualquier solicitud previa	Presentación de desistimiento a la CNMC	Cancelación de la solicitud si no ha sido tramitada

Tabla 3. Procedimientos relacionados con la gestión de GdO en España [35]

Capítulo 3. TENDENCIAS SOSTENIBLES

Hoy en día, la única forma de acreditar el origen verde de la energía en Europa es mediante la compra de una GdO. Esto implica un coste adicional por el producto en sí, la energía. En esta línea, surge la cuestión de hasta dónde están dispuestos a pagar los consumidores. Se entiende por disposición a pagar (DAP) como el precio más alto que los clientes consideran que es aceptable para un producto o servicio [37]. Esta variable desempeña un papel fundamental en el modelo de previsión de precios de las GdO, ya que refleja el éxito de las políticas medioambientales expuestas en el capítulo anterior.

Este capítulo se centra en el análisis de las tendencias sostenibles, de cara a los posibles escenarios del mercado futuro de GdO. Por un lado, se consideran la DAP por la electricidad verde y los planes de descarbonización de grandes empresas, como factores que influyen positivamente en la DAP por las GdO. Por otro lado, para un escenario más pesimista, se tienen en cuenta los recientes movimientos en Europa que se oponen a las restrictivas políticas medioambientales y económicas impuestas por la UE.

3.1 DAP POR LA ELECTRICIDAD VERDE

Hasta la fecha, se ha documentado una considerable cantidad de literatura en torno a la DAP por la electricidad verde, la mayoría centrada en consumidores domésticos. En esta subsección, se realiza un breve resumen del panorama actual de este campo en varias regiones del mundo.

En general, las personas están dispuestas a pagar más por la electricidad verde, y así lo refleja un informe publicado por OECD [38]. Los resultados de la encuesta, realizada a más de 10.000 hogares en 11 países diferentes, revelan que más del 60% de los consumidores están dispuestos a pagar extra por la electricidad procedente de fuentes renovables. Esta afirmación, también queda respaldada por Barbara C. Farhar en un informe que recopila y analiza estudios de mercado sobre el interés y la DAP por la electricidad verde [39]. Los

estudios analizados reflejan que una mayoría de entre el 52 % y el 92% está dispuesta a pagar al menos una modesta cantidad mensual en sus facturas de electricidad por las fuentes renovables. En todos los estudios realizados por Barbara C. Farhar, la DAP de los clientes sigue un patrón predecible. Una media del 70% declaró una DAP de al menos \$5 al mes por la electricidad procedente de fuentes renovables. Este porcentaje disminuye a medida que aumenta la cantidad mensual. Una media del 38% de los clientes afirma estar dispuesto a pagar al menos \$10 más al mes, y el 21% afirma estar dispuesto a pagar al menos \$15 más al mes por la electricidad procedente de fuentes renovables.

Por otro lado, resulta interesante examinar las diferencias de DAP por electricidad verde entre los distintos países y regiones del mundo (véase Figura 5). De acuerdo con un meta-análisis de la literatura existente [40], los habitantes de Finlandia y Estados Unidos muestran las mayores DAP por hogar y mes, mientras que, en Chile, Italia y Alemania, la DAP por kilovatio-hora (kWh) es más alta. Esto se explica porque Estados Unidos y Finlandia son países con un alto consumo eléctrico per cápita, pero bajos precios de energía. A escala continental, aunque Japón muestra una DAP por hogar superior al promedio, la DAP en Asia es la mitad que la de los países europeos y americanos, que son bastante similares. Igualmente, la DAP promedio por kWh en Asia es la más baja. No obstante, en este caso, la diferencia entre Europa y Estados Unidos es más significativa, siendo la DAP por kWh el doble en Europa. Los resultados de la meta-regresión del artículo citado revelan una serie de factores importantes que explican las diferencias en los valores de DAP por energía renovable. Entre estos factores, se destaca el ingreso como una de las variables más influyentes, mostrando un efecto positivo en la DAP. Es decir, cuanto mayores son los ingresos de un consumidor, mayor tiende a ser su DAP por electricidad verde.

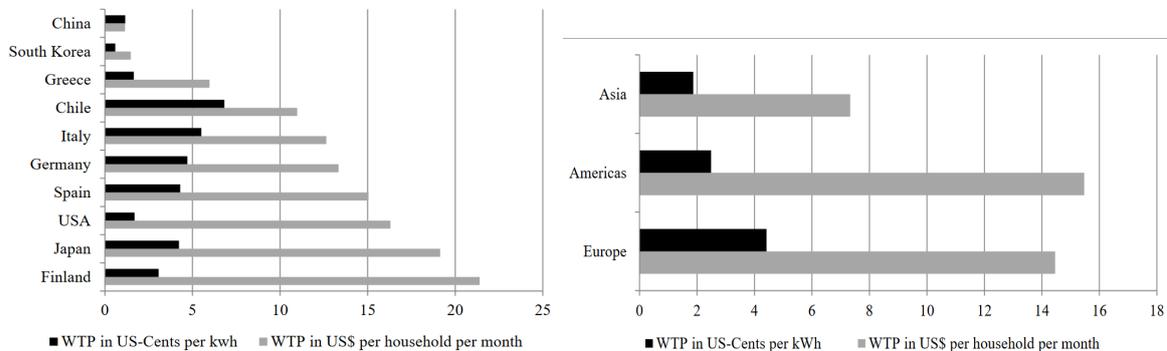


Figura 5. DAP media por país y continente [40]

Otro factor clave que determina la DAP por la electricidad verde es el tipo de fuente renovable. Una encuesta realizada a 371 hogares privados en Alemania [41] revela que la decisión de los consumidores de cambiar o no a fuentes de energía verde depende principalmente del tipo de fuente. Los hallazgos indican que las políticas medioambientales deberían centrarse en respaldar la energía eólica y solar, ya que los consumidores alemanes prefieren estas fuentes sobre el biogás. Esta conclusión queda respaldada por los resultados obtenidos en un meta-análisis realizado por G. Grilli en 2017 [42]. La DAP media en función del tipo de electricidad verde, recogida en la Tabla 4, refleja que, después de la energía geotérmica, las fuentes preferidas por los consumidores son la solar y la eólica. Por el contrario, las experiencias con la energía hidroeléctrica reducen la aceptación de las renovables, probablemente porque esta consume más terreno y tiene un impacto ambiental más importante. Esta conclusión también se recoge en el informe de S. Sundt y K. Rehdanz [40], previamente mencionado.

Fuente de Electricidad Renovable	DAP, \$/mes
Solar	14.40
Eólica	14.14
Biomasa	11.02
Hidroeléctrica	9.57
Geotérmica	36.90

Tabla 4. DAP por electricidad verde en función del tipo de fuente renovable [42]

Por último, cabe mencionar un estudio muy reciente realizado por Tadele, H., & Kalyebara [43] para investigar la DAP por fuentes de energía verde entre las pequeñas y

medianas empresas (PYME) de los Emiratos Árabes Unidos (EAU). Este informe resulta de gran interés ya que, a diferencia de los anteriores, se centra en empresas en vez de en consumidores domésticos. La encuesta, realizada mediante un cuestionario diseñado según el método de valoración contingente², se distribuyó a una muestra de 192 PYME de diversos sectores. Los resultados obtenidos revelan que solo alrededor de la mitad de las empresas encuestadas están dispuestas a comprometer su consumo actual de energía por motivos ambientales. Por el contrario, más de la mitad de las PYMEs encuestadas se mostraban contrarias a un aumento de la factura eléctrica o de los impuestos para financiar proyectos de energía verde. Los resultados también indicaban que la edad, los conocimientos y los costes actuales de electricidad son factores significativos en la DAP de las empresas por las fuentes de energía verdes. Esta diferencia de comportamiento entre los consumidores domésticos y las empresas queda respaldada por una encuesta realizada a más de 300 consumidores corporativos, productores y proveedores de energía turcos [44]. Entre los consumidores corporativos encuestados solo el 20% afirmó estar dispuesto a pagar más por la electricidad verde. Este bajo porcentaje contrasta con la notable disposición observada entre los consumidores domésticos.

3.2 PLANES DE DESCARBONIZACIÓN DE GRANDES EMPRESAS

Los planes de descarbonización de grandes empresas como Microsoft, Inditex o Apple reflejan un compromiso cada vez más sólido con la sostenibilidad. Estos planes pueden tener un impacto positivo directo e indirecto en el mercado futuro de las GdO. Directamente, si las propias empresas tienen objetivos vinculados a la compra de estos certificados. Indirectamente, debido a su influencia en otras empresas más pequeñas cuya única opción para acreditar el origen de la energía es mediante GdO.

² Técnica comúnmente empleada para estimar el valor de bienes (productos o servicios) para los que no existe mercado

En el reporte de sostenibilidad anual de 2022, Microsoft anunciaba dos grandes compromisos medioambientales: (1) ser *Carbon negative*³ en 2030 y (2) eliminar de la atmósfera una cantidad de carbono equivalente a todas sus emisiones históricas para 2050 [45]. A fin de lograr estos compromisos tan ambiciosos, uno de los objetivos de Microsoft es conseguir que en 2030 el 100% de su consumo eléctrico se corresponda con compras de energía *zero carbon* el 100% del tiempo. En otras palabras, buscan un *match* a tiempo real de la energía consumida y la energía verde suministrada.

En 2022 Microsoft creció un 18%, mientras que sus emisiones globales se redujeron en un 0.5%. Este progreso tan positivo fue posible gracias a las mejoras en operaciones, la medición basada en la telemetría de dispositivos en tiempo real, las inversiones en energías renovables, las compras de combustible de aviación sostenible, la adquisición de certificados de energía renovable desagregados (REC⁴) y la firma de nuevos acuerdos de compra de energía a partir de fuentes renovables. En efecto, la empresa firmó nuevos PPA en todo el mundo, consiguiendo una cartera total de energía libre de carbono superior a los 13.5 GW. Esta cifra representa más de un 10% de la potencia total instalada en España en 2024 (124 GW) [46].

En la misma línea, Inditex cuenta con un plan de descarbonización muy ambicioso con metas que incluyen reducir sus emisiones en más de un 50% para 2030 y alcanzar emisiones netas cero para 2040, reduciendo al menos el 90% de su huella de carbono respecto a 2018 [47]. Desde 2022, Inditex ha cumplido su objetivo de obtener el 100% de la electricidad de sus propias instalaciones a partir de fuentes renovables. Esto ha sido posible gracias al autoconsumo, los PPAs y los EACs. En particular, Inditex recurre a los EACs cuando encuentra restricciones en la aplicación de determinados mecanismos. Salvo en contados casos excepcionales, la energía renovable de los certificados que utilizan se genera en el mismo mercado eléctrico donde se consume la electricidad. En 2023, más del 90% de

³ Ser “carbon negative” implica eliminar más carbono del que se emite

⁴ REC es la herramienta utilizada en Estados Unidos y Canadá para certificar la producción de energía verde a partir de fuentes renovables

los EACs que adquirieron cumplían los requisitos establecidos por organizaciones de referencia, como CDP. Asimismo, cabe mencionar que la adquisición de estos certificados se incorpora a la cuenta de resultados consolidada en el epígrafe de Gastos de explotación en el momento de su adquisición. No obstante, en el reporte anual no se detalla la contribución exacta que supone estos certificados en los gastos de explotación.

Otro gran ejemplo de empresa comprometida con el medioambiente es Apple. En 2023, Apple encabezó una lista de *Clean 200* del activista accionista sin fines de lucro *As You Sow* y la firma de investigación *Corporate Knights*, en la cual señalaban que sus ingresos sostenibles alcanzaron los 259 mil millones de dólares [48]. Su estrategia de descarbonización se basa en varios pilares y entre ellos uno de los más importantes es el uso de energía limpia [49]. Actualmente, el 100% de la energía que usan en sus tiendas, centros de datos y oficinas en todo el mundo proviene de fuentes renovables. De esta energía, el 90% proviene de fuentes renovables creadas por Apple (propiedad directa, inversión de capital y contratos de energía renovable a largo plazo), mientras que los certificados de energía renovable representan alrededor de un 3.5% de la carga total, esto es, aproximadamente 58 MW. Más allá, Apple impone compromisos de sostenibilidad a sus proveedores a través de un programa específico llamado *The Supplier Clean Energy Program*. Entre los distintos mecanismos de contratación empleados por los proveedores, los contratos de compraventa de energía renovable representan la mayor parte de las soluciones implantadas hasta la fecha, con un 66%, seguidos de los EAC, con un 24%. Esta última cifra refleja el impacto indirecto de Apple en los mercados de certificados de atributos, como es el caso del mercado de GdO.

Microsoft, Inditex y Apple son solo algunos ejemplos de grandes empresas con una agenda verde. RE100, una asociación mundial de más de 260 empresas influyentes como Coca Cola, NIKE, IKEA, BMW, Sony, Google, Apple o Facebook se ha comprometido a consumir un 100% de energía renovable para 2050 [50]. Parte de su estrategia consiste en la adquisición de certificados de energía renovable, como pueden ser GdO en Europa. De esta forma, ejercen su poder de consumo para acelerar la transición de la energía fósil a la renovable.

3.3 MOVIMIENTOS CONTRA LAS POLÍTICAS Y PRODUCTOS VERDES

A pesar de la disposición de los consumidores a pagar un precio más alto por la electricidad verde, también han surgido críticas y movimientos en contra de las políticas de sostenibilidad europeas. En concreto, cabe mencionar dos protestas que han tenido lugar recientemente: una en contra de las políticas verdes europeas en el sector agrícola y otra en contra el régimen de comercio de derechos de emisión de la UE, también conocido como EU ETS.

Por un lado, EU ETS ha sido duramente criticado en los últimos años. Se trata de la principal herramienta de la UE en su esfuerzo por controlar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de esa forma, comprobar si se están cumpliendo los objetivos fijados [51]. Este régimen, que funciona en todos los países de la EU más Islandia, Liechtenstein y Noruega, obliga a los contaminadores a pagar por sus emisiones de GEI, destinando los ingresos a financiar la transición ecológica. El régimen cubre las emisiones de unas 10.000 instalaciones del sector energético y de la industria manufacturera, así como de los operadores aéreos que vuelan dentro de la UE y con destino Suiza y Reino Unido, es decir, alrededor del 40% de las emisiones de la UE.

Para poder entender el motivo de crítica es necesario comprender el funcionamiento de este régimen. EU ETS se basa en el principio *cap and trade*. Un *cap* (tope) es un límite establecido sobre la cantidad total de GEI que pueden emitir las instalaciones y operadores de aeronaves cubiertos por el sistema. Este tope se reduce anualmente de acuerdo con el objetivo climático de la UE, garantizando así que las emisiones disminuyan con el tiempo. El tope se expresa en asignaciones de emisión (EUAs), donde una asignación otorga el derecho a emitir una tonelada de CO₂eq. Cada año, las empresas deben entregar suficientes asignaciones para contabilizar completamente sus emisiones, de lo contrario, se imponen multas graves. Bajo el límite establecido, las empresas adquieren las EUAs principalmente en el mercado de carbono de la UE, además de recibir algunas de forma gratuita. También tienen la opción de intercambiar asignaciones entre sí según sea necesario. Si una instalación

u operador reduce sus emisiones, pueden optar por conservar las asignaciones restantes para usarlas en el futuro o venderlas.

EU ETS ha sido motivo de controversia por varias razones. En primer lugar, los niveles de ambición para reducir las emisiones en el resto del mundo son notablemente más bajos que en Europa. Esto conlleva dos problemas: (1) crea una desventaja competitiva para los países miembros del régimen ya que se enfrentan a costes adicionales en comparación con otros competidores internacionales; y (2) puede dar lugar a “la fuga de carbono”, que consiste en la deslocalización de la producción a países con menos limitaciones de emisiones debido al aumento de los costes de la producción en la UE. Como resultado, aunque se reducen las emisiones en una región específica, la reubicación de la producción puede, de hecho, aumentar las emisiones totales en todo el mundo [52].

Otro problema es que no todas las industrias y sectores están cubiertos por el régimen. En la industria del transporte, hasta la fecha, solo las empresas de aviación están sujetas a pagar por sus emisiones [53]. Está previsto que el régimen se amplie para cubrir las emisiones del transporte marítimo a partir de 2024, pero no hay planes para incorporar el transporte ferroviario y por carretera en el futuro cercano. Además, dentro de la aviación, solo se incluye la EEA (*European Economic Area*). Esta disparidad puede suponer una desventaja para las aerolíneas europeas a la hora de competir con otras aerolíneas internacionales o con otras formas de transporte.

Para abordar el primer desafío, en 2021 la UE introdujo un Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono (CBAM). El objetivo es igualar el precio del carbono entre los productos de la Unión y los importados para limitar la fuga de carbono y fomentar la reducción de las emisiones a nivel mundial [54]. En otras palabras, este mecanismo busca establecer unas condiciones de competencia equitativa entre los productores de la UE y de terceros países. Para ello, a partir de 2026, la Comisión establecerá un precio del carbono en ciertos productos importados y eliminará gradualmente la asignación gratuita de derechos de emisión a la industria europea.

En la misma línea, a finales de diciembre de 2023 comenzaron una serie de protestas agrícolas en las principales ciudades de Europa en contra de las políticas medioambientales de la UE. Como se mencionó en la introducción, el principal motivo de estas protestas es que las limitaciones impuestas por la UE en su esfuerzo por reducir la contaminación y proteger la biodiversidad, van en contra del desarrollo agrícola y especialmente pone a los agricultores europeos en desventaja con los de otros países [55]. El debate que se plantea es el mismo que en el caso anterior: ¿Competitividad o cumplir con el Pacto Verde europeo?

Estos movimientos en oposición a las políticas ambientales europeas plantean un panorama más sombrío para el futuro del mercado de las GdO. Es importante destacar que existe una notable diferencia entre estas regulaciones europeas, objeto de controversia, y las GdO. Mientras que las primeras son de obligado cumplimiento, las GdO son certificados voluntarios. Los consumidores tienen otras alternativas para acreditar el origen de la energía que consumen, como los PPAs o la generación de energía para autoconsumo. No obstante, la regulación de renovables establecida por la UE afecta directamente a estas GdO. Aunque oficialmente no son obligatorias, en muchos casos, los consumidores que no recurren a PPA ni poseen instalaciones de autoconsumo se ven indirectamente obligados a adquirir GdO para acreditar el origen de su energía. De ahí, la conexión entre estas protestas y un posible escenario pesimista para el futuro del mercado de GdO.

Capítulo 4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LAS GDO

La mayoría de los estudios existentes sobre GdO europeas se centran en la eficiencia del sistema para promover la producción de electricidad verde, prestando poca atención a los precios históricos de estos certificados. Analizar los precios de las GdO resulta complejo por dos motivos: (1) la falta de armonización de los sistemas de GdO entre los diversos países europeos (véase sección 2.3.1) y (2) la escasa transparencia en la divulgación de información, dado que en muchos países las GdO se negocian a través de contratos bilaterales. En este marco, la literatura sobre modelos de predicción de precios de GdO es muy limitada, casi nula [3].

En este capítulo se proporciona un resumen de la literatura sobre la evolución histórica de los precios de las GdO. Además, se incluye una sección con los desafíos actuales del sistema de GdO en Europa, más allá de la falta de transparencia de precios, y una sección con el posible impacto de la evolución prevista de las políticas y los mercados. El objetivo es situar el problema en un contexto histórico que facilite una comprensión más profunda del mercado de GdO, antes de proceder al análisis exploratorio de los factores fundamentales que influyen en sus precios.

4.1 LITERATURA SOBRE LA EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS PRECIOS DE LAS GDO

La evolución histórica de los precios de las GdO constituye un factor clave para el modelo. Aunque en el próximo capítulo se realiza un análisis exploratorio exhaustivo de los fundamentales que constituyen el precio de estas garantías, merece la pena realizar un resumen basado en la literatura y en la información de *traders* y asesores comerciales.

Las GdO emitidas para la electricidad verde generada en Dinamarca, Finlandia, Islandia, Suecia o Noruega, también conocidas como hidro nórdicas (*Nordic Hydro*), se

consideran el punto de referencia de precios en toda Europa, dada su gran cuota de mercado (alrededor del 60% [9]). La mayoría de análisis de precios e información disponible se centran únicamente en estos certificados. No obstante, hay factores diferenciales entre las GdO, como el país de origen o la tecnología de producción, que conducen a variaciones en los precios. Históricamente, las GdO eólicas europeas han seguido de cerca los precios de las hidro nórdicas, mientras que las GdO alemanas han presentado los precios más elevados debido a la alta demanda local. A pesar de estas diferencias, la evolución de los precios sigue un patrón muy similar, como se refleja en la Figura 6.

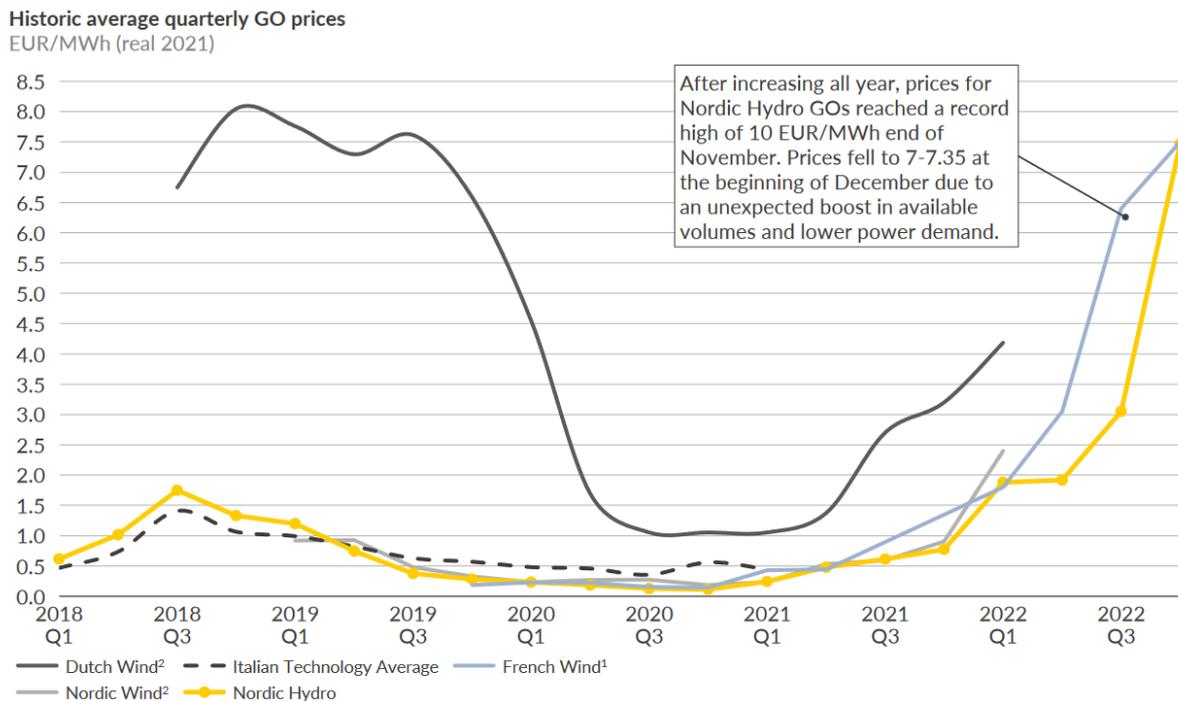


Figura 6. Precios medios históricos de las GdO por trimestre [9]

Cabe destacar que desde el nacimiento de EECS, los precios de las GdO se habían mantenido estables, oscilando en torno a 1 €/MWh para la mayoría de tipos de GdO [3]. Sin embargo, en los últimos años se ha observado una alta volatilidad en el valor de las GdO, lo que sugiere que estos certificados están influenciados por múltiples factores, incluyendo un comportamiento oportunista de la demanda. En 2011 tuvo lugar un aumento generalizado de los precios probablemente debido a las especulaciones sobre el aumento de la producción de energía renovable, a raíz del desastre en la planta nuclear de Fukushima [56]. Muchas

empresas y consumidores en Alemania comenzaron a exigir contratos de energía libre de nuclear lo que provocó un aumento de la demanda de GdO renovables. Más tarde, en 2015 tuvo lugar otra subida de los precios a causa de una mala comunicación del regulador del sector eléctrico en Reino Unido (OFGEM) en relación con una nueva normativa, que permitía el comercio implícito sin restricciones de GdO para el año 2016/17 en adelante. Esto permitiría a las empresas y consumidores británicos comprar GdO extranjeras, aumentando así la demanda de EECS-GdO [56]. En el momento del anuncio, no estaba claro si la misma decisión se aplicaría para el año del esquema 2015/16 o a partir del año 2016/2017. Cuando a principios de 2016 se corrigió el malentendido, los precios volvieron a bajar para reflejar esta información.

Las condiciones meteorológicas también desempeñan un papel clave en los precios de las GdO hidroeléctricas de origen nórdico y, por ende, en los precios de todas las GdO europeas. En 2018 hubo una gran sequía en Europa y la percepción de falta de energía hidroeléctrica disponible y, por tanto, de GdO hidro nórdicas, llevó a un aumento generalizado de los precios. Este efecto se observa en Figura 6. Más tarde, en 2022 los precios de las GdO alcanzaron máximos históricos debido a un descenso del 23% en la generación hidroeléctrica y a los altos precios de la electricidad. El sur de Europa y los países nórdicos sufrieron una gran sequía que provocó que los precios de las GdO hidro nórdicas aumentaran de forma continuada durante todo el año, hasta alcanzar una cifra récord de 10 €/MWh a finales de noviembre. Esta abrupta subida de los precios también estuvo motivada por la volatilidad de los precios de la electricidad después del ataque ruso a Ucrania, en febrero de 2022. Los resultados de las subastas de GdO francesas e italianas mostraron un desarrollo similar (véase 5.3), lo que evidencia la naturaleza volátil del mercado europeo de GdO, alimentado por un comportamiento oportunista de la demanda.

4.2 OBSTÁCULOS DEL MERCADO DE GDO

A pesar del interés que suscitan las GdO, estos certificados también han sido objeto de crítica por diversos motivos. En primer lugar, la percepción generada por EECS respecto a la producción, utilización y divulgación de energía verde difiere notablemente de la realidad

de su comercio. Por ejemplo, las GdO de Islandia pueden ser comercializadas y utilizadas para la divulgación en Europa, incluso si no existe conexión física a la red eléctrica [3, 57]. Como resultado, al adquirir electricidad verde certificada por GdO, los clientes podrían asumir erróneamente que están respaldando la producción local de energía renovable, cuando en realidad esta electricidad ni siquiera se inyecta en la red eléctrica europea. Este aspecto puede llevar a los consumidores a dar prioridad a los PPA y a las instalaciones de autoconsumo. Ambas opciones están directamente vinculadas al mercado eléctrico y no generan dudas sobre el origen de la energía, por lo que pueden percibirse como más fiables. En el primer caso, el consumidor mantiene una relación directa con el productor de energía, mientras que, en el segundo caso, el propio consumidor es responsable de inyectar la energía renovable a la red eléctrica.

En segundo lugar, las GdO han sido muy criticadas por el problema de la doble contabilidad. Este problema implica que múltiples consumidores se atribuyen haber consumido la misma energía verde [58], lo que puede generar desconfianza en el sistema. En particular, la doble contabilidad ha sido motivo de preocupación con las GdO de Islandia y Noruega [59]. En ambos países el mix energético está compuesto mayoritariamente por fuentes renovables [60, 61], lo que conduce a una elevada exportación de GdO a otros países de la UE como Alemania, donde la mayoría de la energía se produce a partir de combustibles fósiles. En teoría, estas redistribuciones de la electricidad verde se deben incluir en los "mix residuales". Sin embargo, rara vez se proporciona esta información a los consumidores.

En noviembre de 2022, AIB recibió indicios que le llevaron a pensar que en Islandia estaba teniendo lugar una doble contabilización de GdO. Grandes consumidores reclamaban un consumo de energía 100% renovable solo porque está se producía en Islandia, al mismo tiempo que las GdO asociadas a esa energía se estaban exportando fuera del país. En otras palabras, la energía suministrada a estas empresas por productores islandeses no estaba asociada a GdO canceladas. Dada la situación, AIB decidió suspender la exportación de GdO desde Islandia hasta nueva orden [62]. La prohibición se levantó unos meses después, en junio de 2023, una vez aclarada la situación [63]. El problema en Noruega es muy similar y a pesar de los esfuerzos de AIB, persiste la sensación de que en ocasiones la electricidad

verde se comercializa más de una vez. Esta sensación se ve acentuada por la variedad de regulaciones sobre emisión de GdO que existen entre los estados miembros de la AIB (véase sección 2.3.1).

Otra de las críticas al sistema de GdO es la falta de adicionalidad [58]. En la mayoría de los casos, los certificados se emiten para instalaciones ya existentes y, como consecuencia, el sistema no garantiza la construcción de nuevas instalaciones de energía renovable. Esto implica que las GdO no ayudan a reducir las emisiones a menos que se implementen medidas adicionales [64]. En algunos países como España, este problema se cubre con la acreditación de plan de ingresos (véase 2.3.2) que establece a qué pueden destinar los productores los ingresos obtenidos de estos certificados. En este caso particular, los fondos pueden ser asignados para financiar actividades de I+D enfocadas en el desarrollo del medio ambiente o para respaldar proyectos de desarrollo de instalaciones de generación renovable o de cogeneración de alta eficiencia no rentables por el momento.

Por último, se hace referencia a los niveles de precios generalmente bajos como otro aspecto negativo de las GdO. A pesar de que no hay una fuente oficial con los precios de las GdO, informes elaborados por asesores de mercado han observado que en los últimos años los precios de las GdO han oscilado entre los 0.1 €/MWh y los 5 €/MWh [9]. Estos precios generan ingresos adicionales para los productores de energía, pero resultan insuficientes para incentivar inversiones adicionales en la producción de energía verde.

En contra de algunas de estas críticas, cabe notar que el sistema de GdO no fue inicialmente concebido con el propósito de incentivar la producción de energía verde, sino más bien para informar sobre el origen de la electricidad. Además, las GdO resultan indispensables para la aceptación de la generación renovable y la transición hacia economías neutrales en carbono, ya que el éxito de estos cambios depende principalmente de la información y la confianza.

4.3 POSIBLES EFECTOS DE LA EVOLUCIÓN PREVISTA DE LAS POLÍTICAS Y LOS MERCADOS EN LOS PRECIOS DE LAS GdO

La evolución prevista de las políticas y los mercados puede ejercer una mayor presión al alza sobre los precios de las GdO, si se materializa. En esta sección se recogen algunas de las tendencias y cambios esperados, que van desde la creación de un nuevo *Marketplace* hasta la introducción de nuevas regulaciones. El análisis de estas tendencias resulta esencial para predecir distintos escenarios de precios de las GdO.

4.3.1 PROHIBICIÓN DE EXPEDICIÓN DE GdO A LOS PRODUCTORES SUBVENCIONADOS

Como se mencionó en el marco regulatorio europeo (véase sección 2.1.1), la directiva sobre energías renovables 2009/28/EC ha experimentado varias modificaciones a lo largo de los años. La última directiva modificada entró en vigor en noviembre de 2023 [65]. Antes de ser aceptada, el Parlamento Europeo y el Consejo denegaron la propuesta de la Comisión de otorgar GdO a todos los proyectos de energías renovables bajo un régimen de apoyo. Por el contrario, se estableció que los Estados miembros pudieran decidir por sí mismos a qué proyectos deciden expedir los certificados. Esta negativa obstaculiza la entrada de más oferta en el mercado de GdO, evitando así una bajada generalizada de los precios.

4.3.2 CAMBIOS EN LOS MIEMBROS DE AIB

A finales de 2023, AIB contaba con 36 miembros procedentes de 28 países europeos, entre ellos Noruega. Desde que el gobierno noruego actual asumió el cargo en 2021, ha habido muchas especulaciones sobre si el país abandonaría el sistema de GdO de Europa [66]. Actualmente, Noruega suministra alrededor del 16% de todas las GdO en el mercado europeo, por lo que la salida de este miembro conllevaría grandes cambios. Probablemente, la caída de la oferta llevaría a un aumento generalizado de los precios de los certificados. La implementación es incierta, ya que el gobierno no ha presentado planes sobre cuándo y cómo saldría del esquema de GdO, en caso de hacerlo. Por el contrario, en septiembre de 2022, el gobierno anunció un nuevo esquema de impuestos para la producción de energía en Noruega.

Entre los cambios se incluyó el ingreso de las GdO en la base para el cálculo del alquiler del terreno. De acuerdo con Johnny Horsdal, *trader* de energía en SKS, esta decisión se podría interpretar como una confirmación de la continuación de la participación noruega en el esquema de GdO europeo [67].

Por otro lado, Polonia y Bulgaria están considerando unirse a AIB [68]. Según un informe publicado por esta asociación en octubre de 2023 [69], Polonia está cada vez más cerca de convertirse en nuevo miembro. Durante el verano, Polonia realizó enmiendas a la Ley sobre Fuentes de Energía Renovable, lo que formalmente allana el camino para que el Organismo Emisor Polaco se una a AIB. No obstante, el proceso llevará algún tiempo, ya que se requiere una revisión detallada, discusiones y alineación del mercado interno polaco con EECS. Por su parte, Bulgaria también está dando los pasos necesarios para unirse al *hub* de AIB y podría convertirse en miembro el próximo año tras la finalización de la nueva ley de energías renovables del país y la firma posterior del borrador nacional de la ordenanza. Sin embargo, sigue sin estar claro cuándo ambos países se unirán a AIB y es probable que el impacto en los precios no sea muy significativo.

4.3.3 CREACIÓN DE UN NUEVO *MARKETPLACE*

En 2022, la Bolsa de Energía Europea (EEX) lanzó un mercado secundario paneuropeo para la negociación de GdO mediante subastas, a través de su filial EPEX Spot [70]. Intentos previos de establecer un mercado similar en 2012 no tuvieron éxito y fueron abandonados en 2018, debido al bajo interés en las GdO y a volúmenes de negociación cercanos a cero en ese momento. El nuevo intento en 2022 permite el comercio de cuatro tipos diferentes de GdO: hidro, solar y eólica europeas, así como hidro nórdicas, y parece haber generado cierto interés. La primera subasta tuvo lugar el 28 de septiembre de 2022, se registraron 26 participantes del mercado, y se vendieron 19.171 MWh de energía verde certificada. El libro de órdenes reflejó un gran interés por parte de la demanda, con más de 4.5 TWh de órdenes de compra registradas [71]. Los resultados de esta primera subasta alcanzaron precios de alrededor de 5 €/MWh, reflejando precios del mercado. Los volúmenes negociados no son públicamente accesibles y no se revela información sobre la

ubicación y la edad de las plantas productoras, así como el momento de la producción. Por lo tanto, es muy probable que estos precios sean el resultado de una alta demanda con una oferta limitada.

Por otro lado, en 2022 también se puso en marcha HUPX, el primer mercado de GdO organizado en Hungría [72]. En la primera fase de funcionamiento MAVIR⁵ fue designado como el único vendedor de GdO a través de subastas, mientras que la parte compradora estaba formada por 20 empresas, admitidas como miembros fundadores hasta la fecha de puesta en marcha. Tras el éxito de la propuesta, unos meses más tarde, HUPX lanzó el modelo “vendedor múltiple” y desde entonces los miembros pueden comprar y vender en el mercado bajo la misma afiliación [73]. En otras palabras, MAVIR no es el único vendedor, sino que las centrales eléctricas húngaras y de otros países europeos, así como *traders* de GdO, también pueden vender certificados. Con este nuevo sistema, las subastas se realizan mensualmente y el precio de la GdO queda fijado por la última orden de compra ganadora.

El efecto de estos nuevos mercados sobre los precios de las GdO no está claro. Una mayor liquidez y transparencia podría reducir los precios, ya que disminuye el poder de negociación de los proveedores individuales. Por el contrario, los precios también podrían subir con un aumento de la demanda, procedente de operadores más pequeños que antes no podían negociar acuerdos bilaterales.

4.3.4 DEMANDA DE GDO PARA GASES RENOVABLES

En la lucha por alcanzar la neutralidad de carbono, los gases renovables se han convertido en un gran foco de interés. El gas renovable es un vector energético que se obtiene a partir de procesos de degradación de residuos orgánicos, así como de la depuración de aguas residuales [74]. Los más comunes son el hidrógeno verde, el biogás, el biometano y el gas sintético [75]. Todos ellos se pueden intercambiar con el gas natural, por lo que pueden inyectarse fácilmente en las redes de distribución de gases existentes. Esta gran ventaja ha

⁵ MAVIR es el operador del sistema de transmisión en el territorio de Hungría, fundado en el año 2000

impulsado el desarrollo de los gases renovables como solución energética 100% limpia lo que, a su vez, ha conducido a su introducción en nuevos mercados, como el mercado de GdO.

De acuerdo con el artículo 19 de la directiva europea 2018/2001, se pueden emitir GdO para electricidad, gases (incluyendo hidrógeno) y calefacción o refrigeración [23]. En este marco, se introdujo en noviembre de 2019 un nuevo esquema EECS para regular la emisión de GdO relativas a gases renovables [76]. Austria fue pionera en Europa en la implementación de un sistema para el gas. En consonancia con los requisitos de la Directiva de Energías Renovables II (RED II), E-Control⁶ fue nombrado el organismo oficial emisor de GdO, tanto para electricidad como para gas, así como el responsable de verificar su divulgación. E-Control emite certificados de origen para biometano, hidrógeno e incluso gas natural que se explora en Austria [77].

El mercado de certificados de origen para el gas está aún en sus inicios. La iniciativa austriaca ha contribuido a la creación de un mercado europeo sólido y fiable. Para impulsar este mercado, en mayo de 2023 E-Control se convirtió en el primer miembro oficial del esquema de gas de AIB [78]. A esa fecha, 19 de los 36 miembros de AIB fueron designados por sus gobiernos para emitir GdO para gases renovables, y se espera que esta cifra crezca en el futuro. Actualmente, España, Bélgica, Letonia y Finlandia cuentan con organismos, miembros de AIB, elegibles para emitir GdO a gases renovables. Por su parte, *AB Amber Grid*, el principal operador de transporte de gas natural en Lituania está en proceso de solicitud para convertirse en miembro del esquema de gas de AIB.

La postura del Parlamento Europeo, expresada en la RED III o Directiva (UE) 2023/2413, exige a los estados miembros demostrar el origen renovable de los gases a través de PPAs, equivalente a un requisito de GdO. Esto implica un aumento de la demanda de GdO en toda Europa, lo que a su vez podría conllevar una subida generalizada de los precios.

⁶ E-Control es la autoridad reguladora de los mercados de electricidad y gas natural en Austria

Capítulo 5. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE FUNDAMENTALES

El objetivo de este capítulo es realizar un análisis exploratorio de las GdO para identificar los fundamentales que constituyen el precio de estos certificados. El análisis se centra en cinco pilares fundamentales: (1) datos históricos sobre volúmenes de GdO certificadas por el sistema EECS, (2) relación entre las GdO expedidas y la generación renovable, (3) datos de precios de GdO obtenidos de subastas públicas nacionales, y (4) datos históricos de cotización de las GdO a nivel europeo. Las variables más relevantes serán los inputs para el modelo de precios de las garantías.

5.1 HISTÓRICO DE VOLÚMENES DE GDO

En primer lugar, se ha realizado un análisis de los volúmenes de GdO expedidas, canceladas, exportadas e importadas por país y por tecnología. Este estudio permite determinar los países más influyentes en el mercado de GdO europeo. Además, permite evaluar las tecnologías predominantes en cada uno de estos dominios. El modelo a desarrollar se centra exclusivamente en los países y tecnologías identificados en este análisis.

Todos los meses AIB pide a los distintos países miembros datos sobre volúmenes de GdO y publica estadísticas de actividad. El análisis realizado en esta sección se centra en las estadísticas de actividad publicadas en abril de 2024 [29]. El periodo de estudio abarca desde 2019 hasta 2023, ambos años incluidos. Las estadísticas presentadas se clasifican en dos tipos, estadísticas de producción y estadísticas de transacción. Las estadísticas de producción se refieren al mes y año en que se produjo la energía, mientras que las estadísticas de transacción se refieren al mes y año en que tuvo lugar la transacción. Para determinar el precio de las GdO es relevante el momento en que se produjo la transacción y no el momento de producción de la energía. Por tanto, este análisis se basa en las estadísticas de transacción.

Asimismo, cabe destacar que las categorías de AIB consideradas renovables son biomasa (gases, líquidos y sólidos), calor (energía solar, geotérmica y otras formas de calor) y mecánica/otros (energía eólica e hidráulica).

5.1.1 VOLÚMENES DE GdO POR PAÍS

A fin de determinar los *players* más importantes en el mercado de GdO europeo se ha realizado un análisis del volumen de GdO renovables expedidas, importadas, exportadas y canceladas por dominio. Los resultados de los cuatro análisis conducen a la misma conclusión: los países más activos en el mercado de GdO europeo son Austria, Alemania, España, Finlandia, Francia, Italia, Países Bajos, Noruega, Suiza y Suecia. De acuerdo con las estadísticas de AIB, en 2023, estos países expidieron el 80% de todas las GdO renovables. Cabe mencionar que en estas estadísticas no se incluyen las GdO españolas acreditadas por el sistema nacional (CNMC), por lo que el porcentaje mencionado debería ser incluso mayor⁷.

En la Figura 7 se muestra el peso de cada país en términos de GdO expedidas anualmente desde 2019 hasta 2023. El país que más GdO renovables expidió en 2023 fue Noruega, seguido de Francia, Italia y Suecia. Esta tendencia se ha mantenido estable en los últimos cinco años. En el anexo se puede encontrar el mismo gráfico para las GdO exportadas (Figura 27), importadas (Figura 28) y canceladas (Figura 29). Desde una perspectiva de GdO canceladas, el país con mayor número de cancelaciones en 2023 fue Alemania, seguido de Italia, Francia y Países Bajos. Por otro lado, los países que más GdO renovables exportaron el año pasado fueron Noruega y Francia, representando un 55% del total de las exportaciones acreditadas por AIB. En términos de importaciones, Noruega también fue el país con mayor número de GdO importadas en 2023. El total de importaciones noruegas y alemanas el último año representó un 57% del total de importaciones en el registro de AIB.

⁷ Si se incluyen las estadísticas de la CNMC para España, el porcentaje de GdO expedidas por los 10 países mencionados asciende a un 82%

GdO expedidas anualmente por dominio, estructurado por periodo de transacción



Figura 7. GdO expedidas anualmente por dominio, estructurado por periodo de transacción

Este estudio sugiere que los países europeos con mayor presencia en el mercado de GdO europeo son los recogidos en la Tabla 5. Los análisis de las secciones posteriores, así como el modelo de predicción de precios se centrarán únicamente en estos dominios, a excepción de Suiza. La decisión de excluir este dominio se tomó posteriormente debido a la carencia de información sobre este país en la mayoría de las bases de datos utilizadas para determinar los inputs del modelo. Por lo tanto, aunque Suiza se menciona en este capítulo, no se incluirá en los capítulos posteriores. Cabe mencionar que estos países se han clasificado en 3 categorías en función de la zona regional: Europa central, Europa del norte

y Europa del sur. Esta clasificación resulta útil para analizar el comportamiento (ej. GdO por tecnología) de los distintos dominios en función de la ubicación geográfica.

País	Zona regional	GdO expedidas en 2023, GWh (% del total)	GdO canceladas en 2023, GWh (% del total)	GdO exportadas en 2023, GWh (% del total)	GdO importadas en 2023, GWh (% del total)
Noruega	Europa del norte	152478 (18.2%)	21743 (3.2%)	406139 (45.0%)	319338 (35.5%)
Francia	Europa del central	110208 (13.1%)	78438 (11.4%)	90257 (10.0%)	65112 (7.2%)
Italia	Europa del sur	87742 (10.5%)	84608 (12.3%)	38652 (4.3%)	58405 (6.5%)
Suecia	Europa del norte	78941 (9.4%)	41280 (6.0%)	64418 (7.1%)	30821 (3.4%)
Austria	Europa central	49768 (5.9%)	48077 (7.0%)	19532 (2.2%)	24556 (2.7%)
Países Bajos	Europa central	41268 (4.9%)	57042 (8.3%)	26143 (2.9%)	48039 (5.3%)
Suiza	Europa central	39839 (4.7%)	44737 (6.5%)	5176 (0.6%)	23071 (2.6%)
Finlandia	Europa del norte	38231 (4.6%)	19820 (2.9%)	33764 (3.7%)	18112 (2.0%)
España ⁸	Europa del sur	37525 (4.5%)	19394 (2.8%)	37405 (4.1%)	12157 (1.4%)
Alemania	Europa central	35530 (4.2%)	183156 (26.7%)	31150 (3.5%)	193127 (21.5%)
Total		671531 (80.1%)	598294 (87.2%)	752637 (83.5%)	792738 (88.1%)

Tabla 5. Volumen y porcentaje de las transacciones realizadas en 2023 por tipo de transacción para los dominios europeos más importantes

En este panorama, la influencia de España es menos notable debido a la ausencia de las GdO nacionales en las estadísticas de AIB. Por ello, se ha realizado un análisis paralelo centrado en los datos de GdO españolas proporcionados por la CNMC [79]. Este organismo publica un listado anual con las expediciones, transferencias, exportaciones e importaciones de GdO por instalación. Los resultados desde 2019 hasta 2023 se resumen en la Tabla 6.

⁸ En las estadísticas de AIB solo se recogen las GdO certificadas por el sistema EECS, no las GdO nacionales

Como se mencionó en la sección 2.3.2, en España se expide GdO a electricidad procedente de fuentes de energía renovables y de cogeneración de alta eficiencia. En las estadísticas de actividad de AIB solo se han considerado las GdO renovables. Por ello, para hacer una comparación coherente, se ha incluido en la tabla el porcentaje de GdO renovables para cada año y transacción. El porcentaje restante se corresponde con GdO asociadas a fuentes de cogeneración.

Año	GdO expedidas, GWh (% GdO renovables)	GdO transferidas, GWh (% GdO renovables)	GdO exportadas, GWh (% GdO renovables)	GdO importadas, GWh (% GdO renovables)
2019	101799 (87.7%)	103840 (84.3%)	22604 (100%)	11002 (100%)
2020	109186 (91.8%)	101732 (93.9%)	23028 (100%)	11407 (100%)
2021	121905 (92.6%)	102773 (96.8%)	32942 (100%)	17011 (100%)
2022	115984 (95.1%)	106340 (97.2%)	33771 (100%)	19203 (100%)
2023	134587 (95.0%)	113994 (98.1%)	40566 (100%)	12844 (100%)

Tabla 6. Volumen de GdO españolas (CNMC) por tipo de transacción desde 2019 hasta 2023

A partir de este análisis se pueden deducir varias conclusiones. En primer lugar, el volumen de GdO renovables es notablemente superior al volumen de GdO de cogeneración de alta eficiencia. Más allá, la penetración de GdO renovables expedidas en España ha ido creciendo con los años hasta alcanzar un 95% en 2023. En segundo lugar, el volumen de GdO exportadas según la CNMC es ligeramente superior al volumen de GdO expedidas, de acuerdo con las estadísticas de AIB (Veáse Tabla 7). Esto se explica porque los países miembros de AIB son los principales destinos de exportación⁹, pero también puede haber exportaciones a países no miembros de este *hub*. Por último, cabe destacar que España se posiciona detrás de Noruega en términos de GdO expedidas en los últimos 5 años. En 2023, en España se expidieron 127,894 GWh de GdO renovables, mientras que en Noruega la cifra

⁹ Las GdO exportadas desde España a los dominios de AIB se consideran como GdO expedidas por España en las estadísticas de AIB

ascendió a 152,478 GWh. Esta comparación permite determinar la influencia real de España en el mercado de GdO europeo.

Año	GdO nacionales exportadas según la CNMC, GWh	GdO EECS expedidas según AIB, GWh
2020	23028	21138
2021	32942	31491
2022	33771	33620
2023	40566	37525

Tabla 7. Relación entre el volumen de exportación de GdO certificadas por la CNMC y el volumen de expedición de GdO EECS según AIB, desde 2020 hasta 2023

5.1.2 VOLÚMENES DE GdO POR TIPO DE TECNOLOGÍA

Una vez determinados los dominios con mayor presencia en el mercado de GdO europeo, se ha realizado un análisis de los volúmenes de GdO expedidos por tipo de tecnología. El objetivo de este análisis es entender la influencia que tiene la ubicación geográfica en las fuentes de generación renovable y, por ende, en el mercado de GdO. Cabe mencionar que las GdO se han agrupado en cinco categorías según el tipo de energía: (1) biomasa, (2) geotérmica, (3) solar, (4) hidráulica y (5) eólica.

En primer lugar, se ha realizado un análisis agregado (sin discriminación por localización) de la evolución en el tiempo de las GdO expedidas en función del tipo de tecnología. Los resultados de este análisis, que incluyen solo los 10 dominios recogidos en la Tabla 5, se muestran en la Figura 8. Se observa que, en los últimos años, las GdO hidráulicas han representado más del 50% del total de las GdO renovables expedidas cada periodo. En 2022 se registró una notable disminución en la expedición de este tipo de garantías con respecto al año anterior. Esta reducción se puede atribuir a las condiciones climáticas adversas experimentadas en los países nórdicos y el sur de Europa, donde una intensa sequía impactó negativamente en la generación hidroeléctrica. Por otro lado, el volumen de GdO solares y eólicas ha experimentado un marcado crecimiento en los últimos

cinco años. La tasa media de crecimiento anual para las GdO eólicas es del 23%, mientras que en el caso de las GdO solares esta cifra asciende a un 34%. En contraste, el volumen de GdO procedentes de fuentes de biomasa (sólidos, líquidos y gases) se ha mantenido relativamente estable a lo largo del periodo analizado. El máximo índice de crecimiento registrado es del 11% y tuvo lugar entre los años 2020 y 2021. Finalmente, cabe señalar que las GdO geotérmicas representan, con diferencia, el segmento de menor volumen.

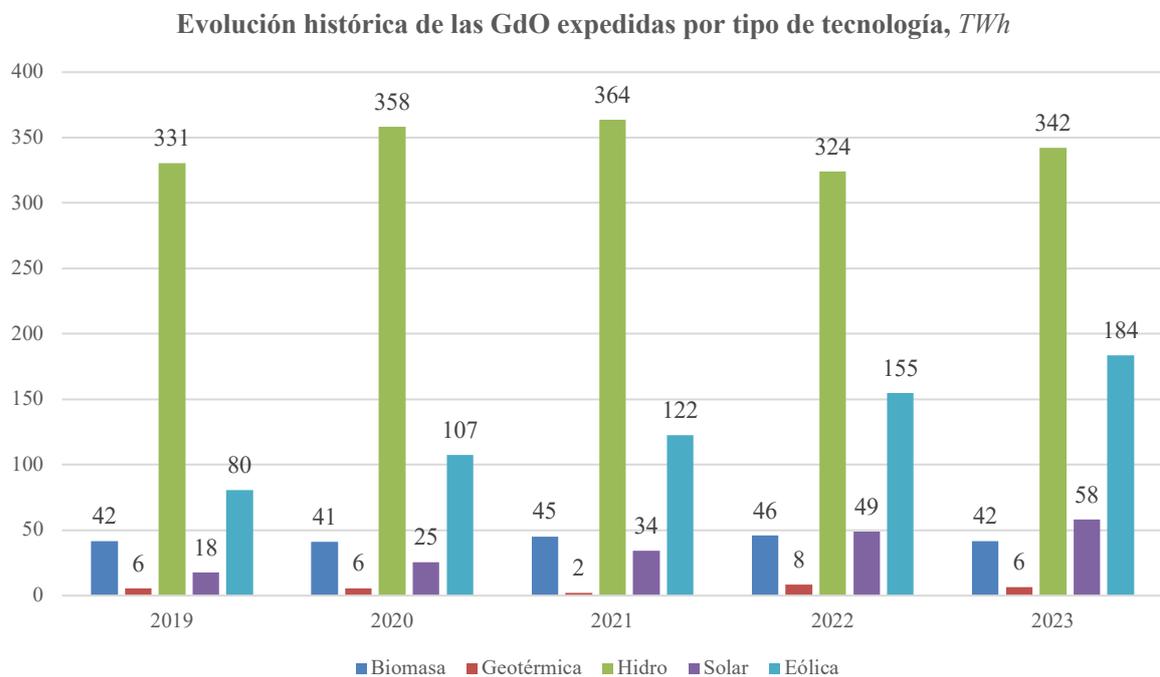


Figura 8. Evolución histórica de las GdO expedidas por tipo de tecnología

En segundo lugar, se ha realizado un análisis de las GdO expedidas en 2023 por dominio y tipo de tecnología. Los resultados se presentan en la Tabla 8 y la Figura 9. Por un lado, la Tabla 8 muestra la penetración de los distintos tipos de tecnología en cada país. En los países del norte de Europa predominan las GdO hidráulicas y eólicas. Tanto en Noruega como en Suecia este tipo de garantías representan casi el 100% del total de GdO expedidas. El comportamiento de Finlandia es más peculiar debido a la gran penetración de fuentes de biomasa. Este país cuenta con 3 de las 5 plantas de biomasa más grandes del mundo [80], lo

que la posiciona como líder europeo en la producción de electricidad y calor a partir de esta tecnología.

En términos generales, el comportamiento de los países de Europa central es bastante similar al de los países del norte de Europa, la mayoría de las GdO expedidas son hidráulicas y eólicas. La principal diferencia se halla en la penetración de las GdO solares, que representan entre el 6% (Austria) y el 18% (Países Bajos) del total de las GdO expedidas. Francia y Alemania cuentan con un mix muy parecido: las GdO hidráulicas y eólicas suponen alrededor del 83%, las solares suponen el 10% y el porcentaje restante se corresponde con GdO procedentes de fuentes de biomasa. Cabe destacar que en Suiza la penetración de GdO eólicas es prácticamente nula. En este país casi dos tercios de la electricidad se genera en centrales hidroeléctricas [81]. La energía solar ha experimentado un crecimiento constante en los últimos años, mientras que la energía eólica ocupa el último lugar entre las fuentes de energías renovables suizas [82]. Asimismo, en Países Bajos el porcentaje de GdO hidráulicas no llega al 1%, lo que contrasta con el resto de los dominios. Esto se explica por su matriz energética. De acuerdo con la IEA (*International Energy Agency*), sin tener en cuenta la biomasa, las fuentes eólica y solar representaron el 99.9% de la producción renovable del país en 2022 [83].

Por último, el comportamiento de Italia y España, representantes del sur de Europa, es algo diferente. Mientras que en España predominan las GdO solares y eólicas (alrededor del 83%), en Italia la distribución es más uniforme. La energía hidroeléctrica ha sido tradicionalmente la principal fuente de electricidad renovable en Italia [84] y así se refleja en el porcentaje de GdO hidráulicas expedidas. Además, Italia es el tercer país de la IEA que más electricidad genera a partir de la energía geotérmica y de ahí, que un 7% de las GdO expedidas sean geotérmicas.

	Biomasa	Geotérmica	Hidráulica	Solar	Eólica
Noruega	0.1%	0.0%	90.5%	0.0%	9.4%
Suecia	1.9%	0.0%	61.0%	0.0%	37.1%
Finlandia	23.4%	0.0%	38.0%	0.1%	38.5%
Alemania	8.8%	0.0%	36.5%	10.0%	44.8%
Francia	6.0%	0.0%	46.7%	10.3%	36.9%
Austria	3.9%	0.0%	74.7%	5.8%	15.5%
Países Bajos	15.6%	0.0%	0.2%	17.7%	66.5%
Suiza	4.4%	0.0%	87.6%	7.6%	0.4%
Italia	14.6%	7.1%	38.0%	17.7%	22.6%
España	0.3%	0.0%	17.0%	46.2%	36.6%

Tabla 8. Porcentaje de las GdO expedidas en 2023 por tipo de tecnología en cada país

Por otro lado, la Figura 9 muestra la penetración de cada país en el volumen de GdO expedido en 2023 para cada tipo de tecnología. Cabe notar que el tamaño del país es un factor determinante en este análisis. Además, el peso de España es significativamente inferior al real debido a la ausencia de las GdO nacionales en las estadísticas de AIB. Los resultados revelan que Noruega es el dominio líder en la expedición de GdO hidráulicas, seguido de Francia y Suecia. En el caso de las GdO solares, España e Italia son los países dominantes. Este hallazgo no es casualidad ya que ambos países tienen un clima Mediterráneo, idóneo para la generación de energía a partir de placas solares. España cuenta con alrededor de 2.500 horas de sol año, cifra que contrasta con las 1.500 horas solares anuales que se suelen registrar en los países del norte de Europa [85]. En la expedición de GdO eólicas no se observa ningún dominio ni región predominante. No obstante, si se consideran las GdO españolas certificadas por la CNMC, España se posiciona líder con una penetración del 26%. Finalmente, Italia destaca como principal país en la expedición de GdO de biomasa y geotérmicas. Con respecto a las GdO geotérmicas, Italia es prácticamente el único dominio que expide este tipo de garantías con una representación del 99.9%. El 0.1% restante se corresponde con GdO francesas. En cuanto a las GdO de biomasa, Italia, Finlandia, Francia y Países Bajos representan más del 80% del total de este tipo de GdO expedidas en 2023.

Representación de cada país en el volumen de GdO expedido en 2023 por tipo de tecnología, %

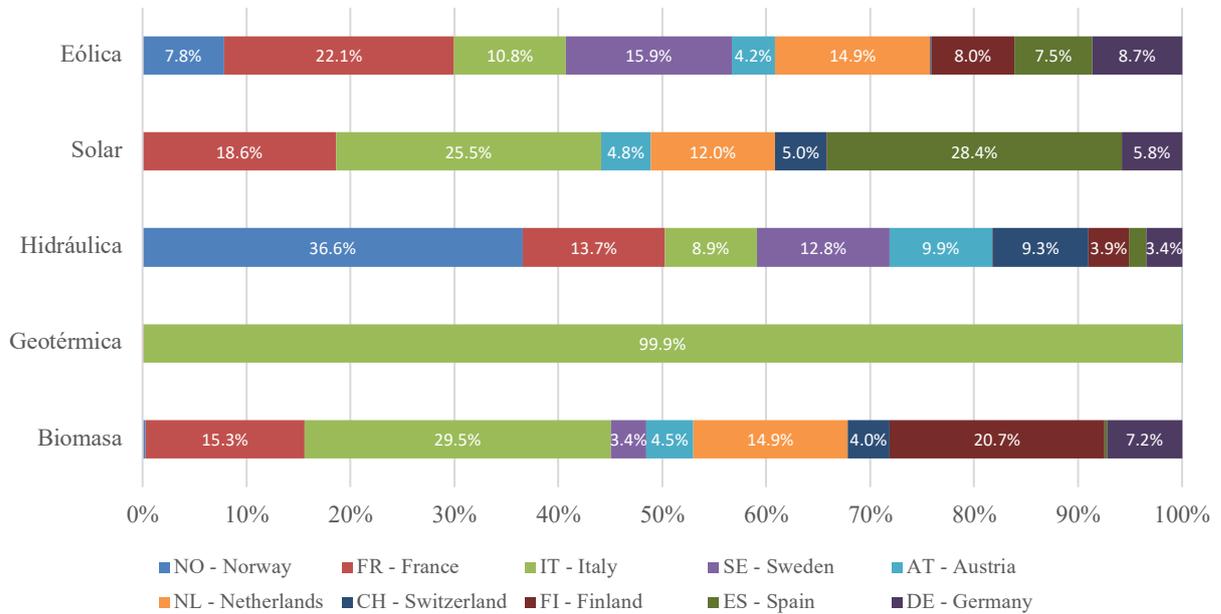


Figura 9. Representación de cada país en el volumen de GdO expedido en 2023 para cada tipo de tecnología

5.2 RELACIÓN ENTRE LAS GDO EXPEDIDAS Y LA GENERACIÓN RENOVABLE

En siguiente lugar, se ha realizado un análisis de la tasa de expedición de GdO por país y tipo de tecnología. Se entiende como tasa de expedición a la relación entre el volumen de GdO expedido y la generación renovable en un periodo de tiempo específico. Los datos de volúmenes de GdO expedidas se han obtenido a partir del informe de AIB [29], a excepción de España, que se han empleado los datos publicados por la CNMC [79]. Cabe mencionar que para este estudio se han tomado las estadísticas de producción de AIB, a fin de conseguir un *match* preciso entre la generación renovable y las GdO expedidas. Si se tomaran las estadísticas de transacción podrían resultar tasas de expedición imposibles (superiores al 100%), ya que el trámite de solicitud de la GdO puede tener lugar unos meses después de la producción real de dicha cantidad de energía.

Para la generación renovable la fuente de información empleada ha sido *Ember Climate*, una organización independiente que busca impulsar el mundo hacia la electricidad limpia. En concreto, se ha empleado la base de datos "*Yearly Electricity Data*", que contiene información anual sobre generación, capacidad, emisiones, importación y demanda de electricidad en más de 200 zonas geográficas. Los datos proceden de bases de datos de varios países (EIA, Eurostat, BP, ONU, etc.), así como de fuentes nacionales. Es preciso notar que el estudio se centra en las GdO asociadas a las tres tecnologías dominantes y con mayores perspectivas de crecimiento que, de acuerdo con el análisis 5.1.2, son la hidroeléctrica, solar y eólica. Los resultados se muestran en la Tabla 9.

	Hidráulica 2021	Solar 2021	Eólica 2021	Hidráulica 2022	Solar 2022	Eólica 2022	Hidráulica 2023	Solar 2023	Eólica 2023
Austria	94%	48%	100%	94%	48%	100%	97%	57%	99%
Alemania	66%	1%	2%	67%	5%	8%	63%	5%	13%
España	95%	83%	93%	94%	84%	95%	100%	88%	94%
Finlandia	98%	1%	95%	98%	1%	97%	99%	3%	99%
Francia	93%	46%	77%	93%	52%	87%	100%	51%	90%
Italia	89%	58%	92%	91%	55%	94%	95%	51%	92%
Países Bajos	98%	39%	98%	100%	39%	99%	100%	34%	100%
Noruega	99%	0%	99%	99%	0%	93%	99%	0%	93%
Suecia	72%	0%	81%	72%	0%	84%	73%	0%	85%

Tabla 9. Tasa de expedición de GdO por país y tecnología para los años 2021, 2022 y 2023

En primer lugar, el análisis por tipo de tecnología sugiere que, en líneas general, la generación eólica e hidráulica presentan las mayores tasas de expedición de GdO. En todos los dominios excepto en Alemania, la tasa de expedición de GdO eólicas en 2023 superó el 85%. Para la generación hidroeléctrica, las tasas de expedición en 2023 oscilaron entre el 95% y el 100%, sin tener en cuenta el dominio alemán ni el sueco. En contraste, la expedición de GdO procedentes de fuentes solares es menos habitual con porcentajes en torno al 50%. En este caso se observan dos excepciones. Por un lado, España es el país con mayor volumen de GdO solares expedidas y en este dominio la tasa de expedición se sitúa en torno al 85%. Por otro lado, en los países del norte de Europa (Finlandia, Noruega y Suecia) la tasa de expedición de GdO solares es del 0%. Esto se explica porque la electricidad solar representa un porcentaje muy bajo en el mix energético de estos países, inferior al 1% (residual). Además, en la Figura 8 se observa que estos países apenas tienen representación en el

volumen de GdO solares expedidas, por lo que sus tasas de expedición no son representativas.

En segundo lugar, el análisis temporal sugiere que el porcentaje de GdO expedidas relativo a la generación de electricidad verde se ha mantenido estable entre los años 2021 y 2023. Se observan aumentos y disminuciones de entre 1 y 10 puntos porcentuales, que no siguen un patrón concreto en función del país o tipo de tecnología.

Por último, cabe destacar las bajas tasas de expedición de GdO en Alemania. Este hallazgo se explica porque Alemania importa alrededor del 85% del total de GdO canceladas. A diferencia del resto de dominios analizados, Alemania es consumidor de GdO, es decir, cancela más GdO de las que expide (véase Tabla 2). El motivo de este comportamiento es el marco regulatorio del país. Como se mencionó en la sección 2.3.1, Alemania no expide GdO a los productores que reciben ayudas financieras de un régimen de apoyo y de ahí, las bajas tasas de expedición. Actualmente, no hay ningún indicio que lleve a pensar que este país va a cambiar la normativa relativa al régimen de apoyo de renovables, por lo que es probable que estas tasas de expedición se mantengan estables en los próximos años.

5.3 PRECIOS HISTÓRICOS DE PAÍSES CON SUBASTA PÚBLICA

En la mayoría de países las GdO se negocian a través de acuerdos bilaterales (véase sección 2.3.1). En particular, de los 10 países objeto de análisis, solo Francia e Italia cuentan con un sistema de subasta pública para estos certificados. El objetivo de esta sección es analizar los precios y volúmenes históricos de las GdO subastadas en ambos países.

5.3.1 PRECIOS DE GdO FRANCESAS

En agosto de 2018, el ministro Francés de Transición Ecológica y Solidaria designó a Powernext, ahora integrado en EEX, como organismo oficial responsable de la subasta de GdO producidas por plantas que se benefician de un mecanismo de apoyo. Estas centrales se registran en la cuenta de la Autoridad Francesa del Clima (DGEC). Sólo la DGEC puede

solicitar la emisión de GdO y decidir si se ofrece una parte o la totalidad del volumen de GdO disponibles para un periodo de producción determinado. En este sentido, se puede afirmar que el Estado es el único vendedor en las subastas [86].

En la Figura 10 se muestra el proceso. Antes de que se celebre la subasta, EEX publica una lista exhaustiva de las GdO emitidas por el Estado y disponibles para su compra. Los participantes de la subasta, registrados en Powernext y ECC, tienen entonces un período de 7 días para presentar sus órdenes y ajustar sus límites comerciales. A más tardar 2 días después de la subasta, se publican los resultados y se realiza el pago y la entrega de los certificados. La subasta está compensada y asegurada por la ECC. Los ingresos se destinan a un fondo especial para la transición energética.

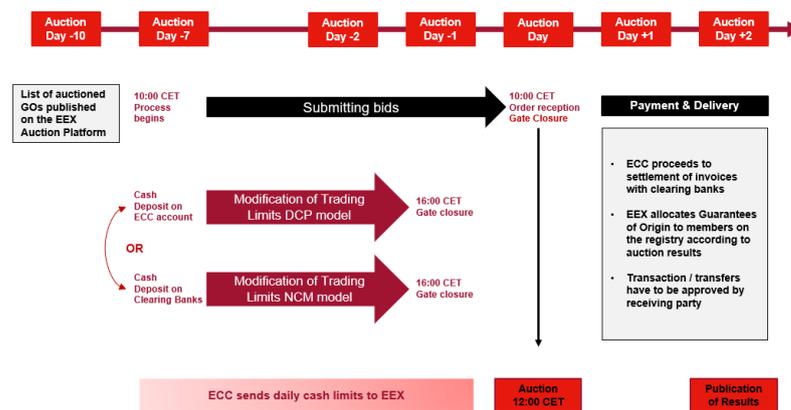


Figura 10. Proceso de subasta de GdO en Francia [87]

En esta sección se presenta un análisis de los resultados de las subastas, publicados por EEX [86]. Este análisis se centra en la evolución histórica de los precios de las GdO y los factores que han podido influir en dicha evolución, como el tipo de tecnología, el precio de la electricidad, el volumen subastado o el volumen vendido. El periodo de estudio abarca desde el año 2020 hasta el año 2023, ambos incluidos. Es importante destacar que no todas las GdO francesas se subastan. De acuerdo con los datos publicados por EEX y las estadísticas de AIB, las GdO subastadas representan aproximadamente el 50% del total de las GdO francesas expedidas cada año.

En la Figura 11 se muestra la evolución del precio de las GdO, junto con el volumen subastado y el volumen vendido. Durante el año 2020, los precios de las GdO se situaban en torno a los 0.2 €/MWh. Este precio tan bajo se puede atribuir a una escasa demanda, ya que la mayoría de los meses el volumen de GdO vendido era inferior al subastado. Desde comienzos del año 2021, tuvo lugar un crecimiento exponencial en el precio de las garantías asociado a un aumento de la oferta y la demanda. En febrero de 2022, el volumen subastado alcanzó un récord de 5800 GWh, situándose el precio en 1.86 €/MWh. A partir de este mes, la oferta de GdO empezó a caer, lo que llevó a una subida sostenida de los precios, que alcanzaron máximos históricos. Esto se explica por dos factores, la gran sequía en Europa, que provocó una disminución de la generación hidroeléctrica, y la especulación. Entre agosto de 2022 y mayo de 2023 el precio fluctuó en un rango de entre 5 y 8 €/MWh. Por último, cabe destacar que en junio de 2023 el precio de las GdO volvió a caer de forma substancial. En diciembre de 2023, el precio medio de subasta se situó en 0.5 €/MWh, lo que supone una reducción del valor de 10.4 pp respecto al último mes del año anterior (dic 2022 - 6.0 €/MWh).

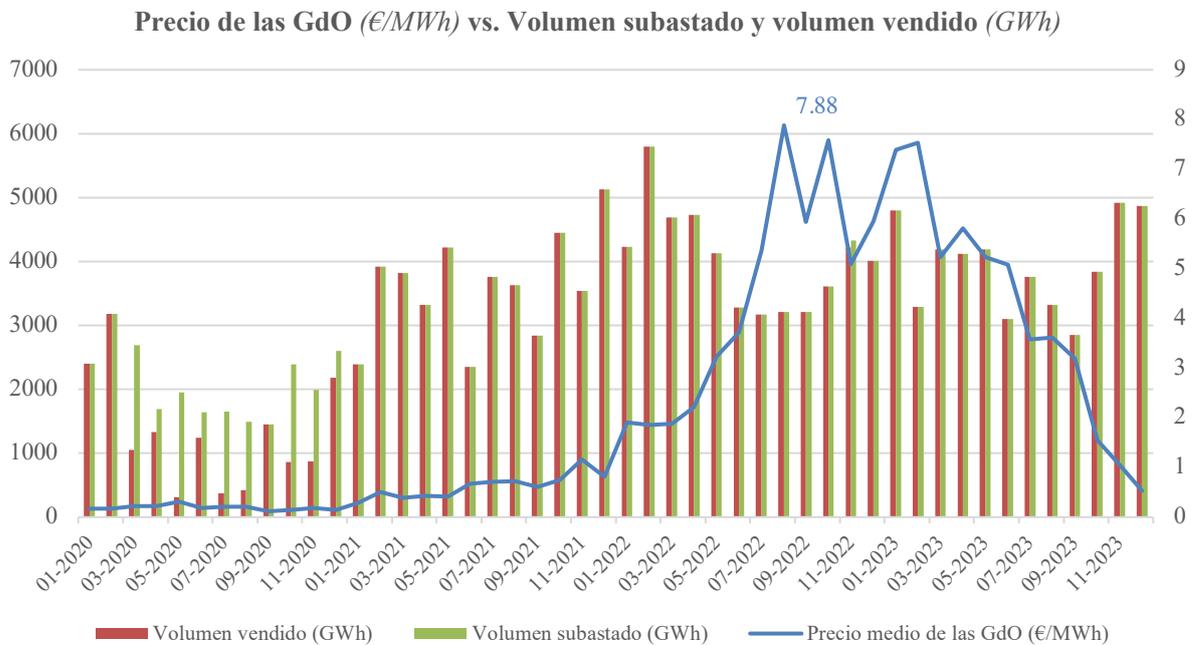


Figura 11. Precio de las GdO vs. Volumen subastado y volumen vendido en Francia (2020-2023)

Por otro lado, la Figura 12 presenta la comparación entre la evolución de los precios de las GdO y la evolución de los precios de la electricidad en Francia. Los datos mensuales sobre precios de la electricidad se han obtenido de ENTSO-E, la Red Europea de Gestores de Redes de Transporte de Electricidad [88]. Se observa una marcada correlación en el comportamiento de ambas variables. Parece que el precio de las GdO sigue de cerca la evolución del precio de la electricidad, con un pequeño desfase temporal. Este desfase es especialmente evidente en dos momentos. Por un lado, hacia finales de 2021, el precio de la electricidad aumentó rápidamente, mientras que el precio de las GdO mostró un crecimiento más gradual. Por otro lado, durante los últimos meses de 2022, los precios de la electricidad cayeron en picado, mientras que los precios de las GdO se mantuvieron estables hasta abril de 2023, momento en que comenzaron a bajar.

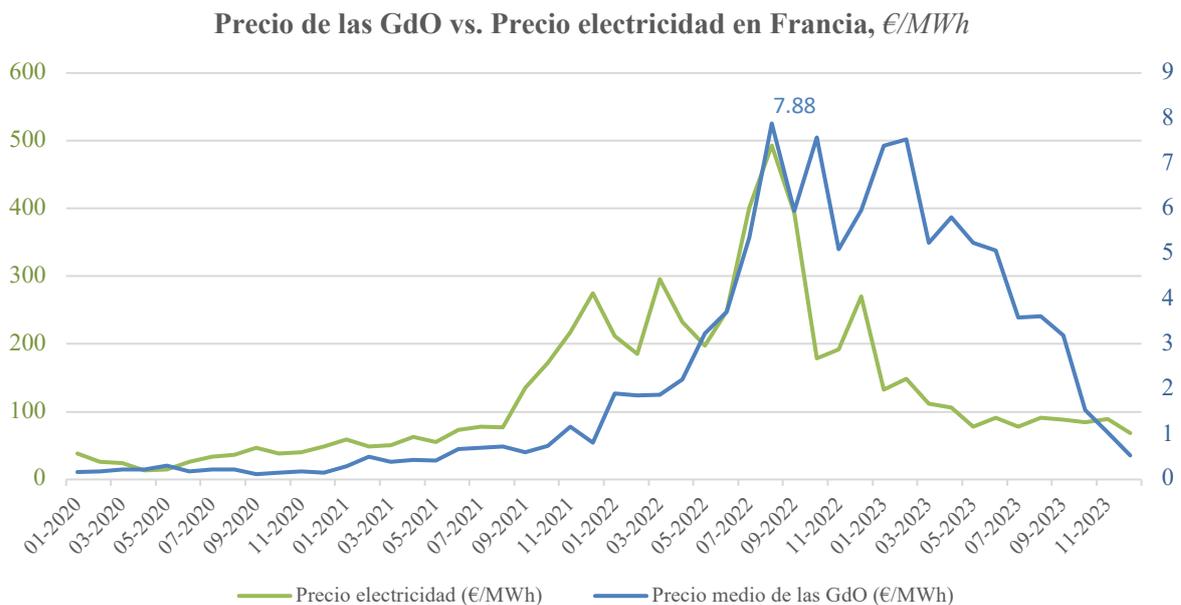


Figura 12. Precio de la electricidad vs. Precio de las GdO en Francia desde 2020 hasta 2023

Finalmente, el análisis del precio medio de las GdO subastadas por tipo de tecnología sugiere que actualmente la fuente de energía no es un factor diferencial en el precio. Como se puede apreciar en la Figura 13, apenas hay diferencias significativas entre los precios de las GdO eólicas, hidráulicas y solares. Por el contrario, se observa una gran diferencia en los volúmenes vendidos en función de la fuente renovable. En las subastas francesas,

predominan las GdO eólicas, seguidas de las solares y las hidráulicas. Este hallazgo, que contrasta con el mix de expedición de GdO según las estadísticas de AIB (véase Tabla 8), no es representativo, ya que es el estado (DGEC) es quien decide los volúmenes de GdO a subastar.

Precio de las GdO (€/MWh) vs. Volumen vendido (GWh) por tipo de tecnología

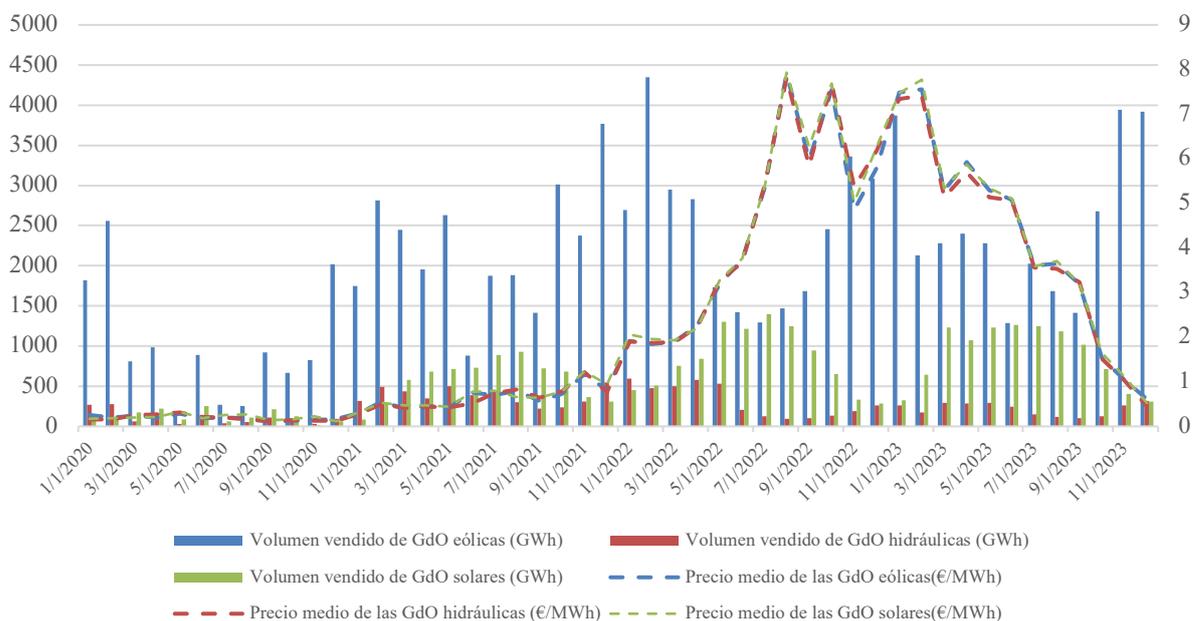


Figura 13. Precio y volumen de las GdO subastadas en Francia por tipo de tecnología desde 2020 hasta 2023

5.3.2 PRECIOS DE GDO ITALIANAS

Italia fue el primer país en introducir un sistema de subasta para las GdO asociadas a electricidad apoyada. Este sistema de venta pública organizada se inició en 2013, bajo la Resolución del Regulador Energético, y los ingresos generados se destinan a reducir los costes que asumen los consumidores de electricidad, promoviendo así la energía renovable del país. En este sentido, se parece mucho al sistema francés. Según la legislación nacional,

la compañía GSE¹⁰ calcula las GdO relacionadas con la electricidad producida e inyectada en la red para determinar el volumen que se ofrecerá en las subastas. Solo se tiene en cuenta la electricidad generada por plantas de energía renovable que reciben un respaldo especial de GSE¹¹.

Anualmente, GSE organiza cinco subastas, diferenciando las GdO según el tipo de planta y el periodo de producción. Aproximadamente cinco días antes de cada subasta, GSE publica en su página web la cantidad de GdO a subastar y el precio inicial de la oferta, calculado en base al mercado de GdO en Italia. De esta manera, los operadores del mercado pueden comenzar a enviar sus ofertas de compra. Al concluir la sesión, GSE publica, de forma agregada, el número de certificados vendidos (divididos por fuente y período de producción), el precio mínimo y máximo, y el precio promedio ponderado por los volúmenes registrados.

En primer lugar, el análisis revela una gran similitud entre el desarrollo histórico de los precios de las GdO italianas y francesas. En la Figura 14 se muestra la comparación entre la evolución del precio de la electricidad en Italia y el precio medio de las GdO subastadas. Al igual que en el caso de Francia, se observa una fuerte correlación entre ambas variables, que siguen la misma trayectoria con un desfase temporal. Desde 2020 hasta finales de 2022, el precio de las GdO representaba aproximadamente un 0.5% del precio de la electricidad. Sin embargo, a partir de noviembre de 2022, las GdO alcanzaron su máximo valor, llegando a representar hasta un 7% del valor de la electricidad. Este porcentaje no se ha mantenido, sino que ha vuelto caer. En diciembre de 2023, el precio medio de las GdO subastadas representó un 3% del precio medio de la electricidad en ese periodo.

¹⁰ Operador estatal de sistemas de servicios energéticos en Italia

¹¹ En Italia hay plantas subvencionadas que pueden expedir GdO sin necesidad de entregarlas al gobierno. La electricidad considerada es la producida por las plantas de energía renovable que se benefician del "dedicated withdrawal" de GSE y que reciben tarifas de alimentación

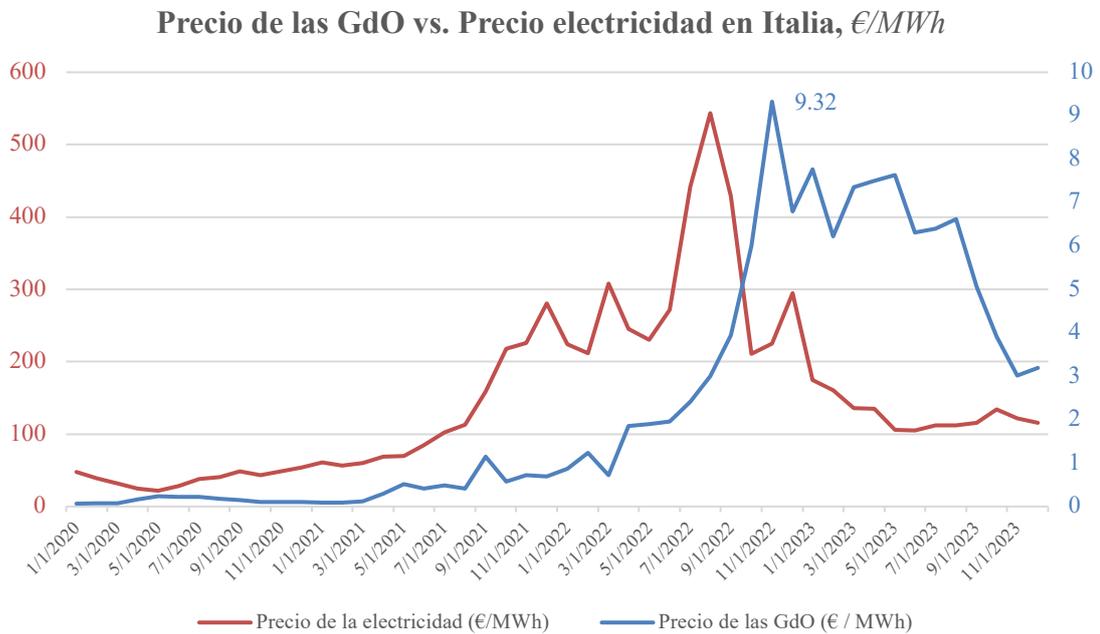


Figura 14. Precio de la electricidad vs. Precio de las GdO en Italia desde 2020 hasta 2023

La diferencia de precios de las GdO en función del tipo de tecnología apenas es notable. Existe un gran equilibrio entre la oferta y la demanda de GdO solares, eólicas e hidráulicas. Esto sugiere que los compradores no tienen una clara preferencia a la hora de elegir un tipo de fuente renovable. En su lugar, la elección parece estar influenciada por la disponibilidad y el precio a pagar. Como se discutió en la sección anterior, en Francia, la situación es muy similar.

5.3.3 COMPARATIVA ENTRE LOS PRECIOS DE GdO ITALIANAS Y FRANCESAS

El país de origen de la GdO es un potencial factor que puede influir en su precio. Para analizar esta posible interacción, en esta sección se comparan los precios de las GdO italianas y francesas vendidas en subastas públicas. Los resultados del análisis se presentan en la Figura 16. A pesar de que en ambos países el precio de la electricidad sigue una evolución muy similar, en el caso de las GdO no ocurre lo mismo. Se observan un desfase temporal en el comportamiento de las GdO italianas respecto a las francesas, especialmente notable durante los periodos de subida y bajada de precios. A priori, no existe motivo claro que explique esta diferencia de precios, que probablemente esté impulsada por el

comportamiento oportunista de la demanda. Cabe destacar también que el precio máximo de una GdO italiana (9.32 €/MWh) es un aproximadamente un 18% superior al máximo valor de una GdO francesa (7.89 €/MWh). Esto podría explicarse porque en Italia el precio de la electricidad es significativamente más alto que en Francia (véase Figura 30).

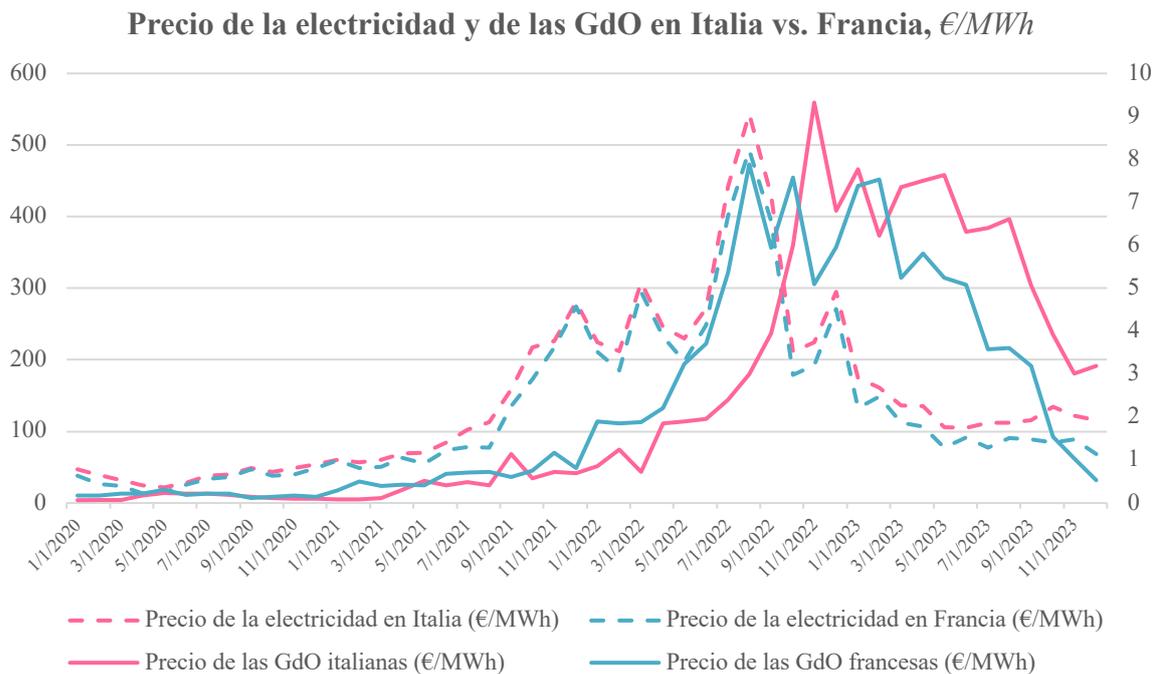


Figura 15. Precio de la electricidad y de las GdO subastadas en Italia vs. Francia

5.4 HISTÓRICO DE COTIZACIÓN DE GDO

Por último, en esta sección se ha realizado un análisis del histórico de cotización de las GdO a nivel europeo. Se trata de un informe facilitado por Qualitas Energy, donde se recoge la cotización de las GdO europeas desde enero de 2022 hasta abril de 2024.

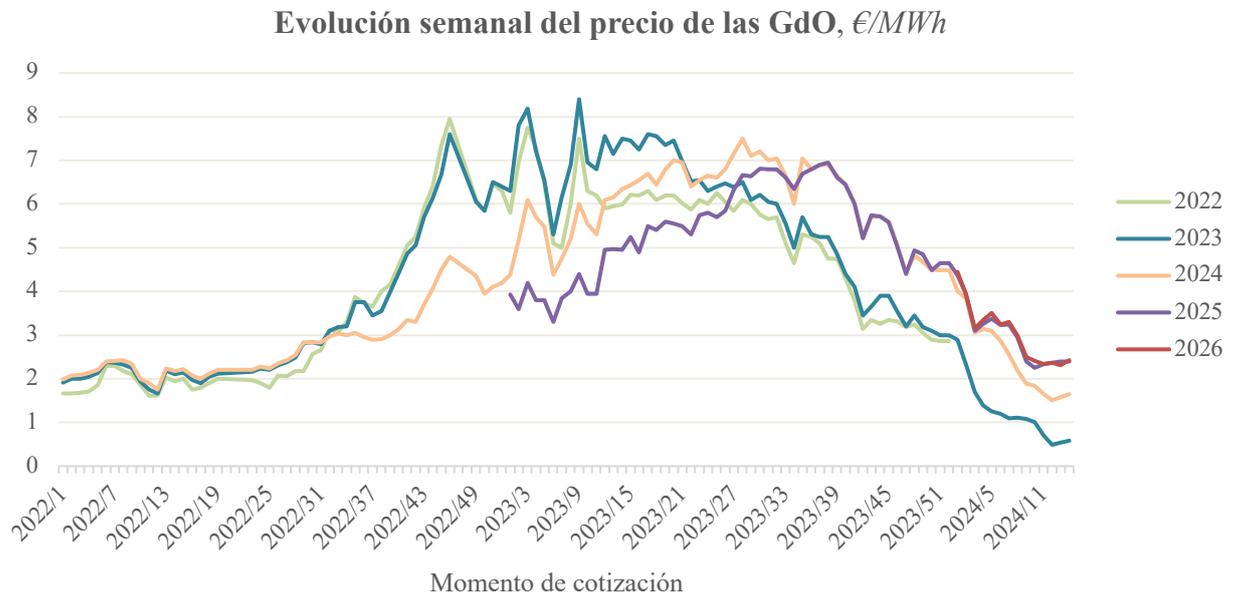


Figura 16. Histórico de cotización de las GdO desde 2022 hasta 2024

Como se aprecia en la Figura 16, el valor de las GdO creció considerablemente a finales del año 2022. El precio de una GdO en las primeras semanas de 2023 llegó a alcanzar los 8.4 €/MWh, lo que supone un aumento del 320% respecto a su precio a principios de 2022 (alrededor de 2 €/MWh). Este crecimiento se mantuvo hasta octubre de 2023, momento en que los precios volvieron a caer significativamente. Actualmente, el precio de una GdO para 2025/2026 está en torno a los 2.4 €/MWh.

Por otro lado, cabe destacar que a mediados de 2023 hubo un cambio de tendencia en el valor de las GdO a muy corto plazo frente a su valor a medio plazo (entre 1 y 3 años). Anteriormente, las GdO perdían valor en el futuro, es decir, en el momento de cotización, los consumidores estaban dispuestos a pagar más por una GdO del mismo año que por una GdO que se expediría en 2 años. Sin embargo, hoy en día, el valor de una GdO para el año 2025 es superior al valor de la misma GdO para el año 2024.

Capítulo 6. BASE TEÓRICA DEL MODELO

El objetivo de este capítulo es introducir la base teórica del modelo desarrollado. De acuerdo con los análisis previos realizados, el valor de las GdO depende fundamentalmente de la generación renovable y de la demanda de electricidad verde. El precio varía ligeramente en función del tipo de tecnología y del país de origen, debido a la falta de armonización a nivel europeo que conduce a distintos esquemas regulatorios relativos a la expedición de estos certificados. Todas estas variables se tienen en cuenta en el modelo, que predice los precios medios anuales hasta 2050 para todos los tipos de GdO.

6.1 OFERTA DE GDO

Para modelar la oferta de las GdO se han considerado dos variables fundamentales, la generación renovable y la tasa de expedición de GdO relativa a dicha generación. Por un lado, la generación renovable determina la cantidad máxima teórica de certificados que se pueden expedir en un periodo concreto y, por otro lado, la tasa de expedición captura la normativa nacional que aplica a la expedición de las garantías. Por ejemplo, en Alemania no se expiden GdO a los productores que reciben ayuda financiera de un régimen de apoyo, lo que supone una reducción en la oferta teórica si se expidiesen GdO a todos los MWh de producción de electricidad verde.

Además, se han formulado dos hipótesis: (1) el mercado de GdO opera en un entorno de competencia monopolística y (2) la oferta de GdO es perfectamente inelástica [3]. La primera hipótesis se justifica por la presencia de numerosos productores en el mercado de GdO, ninguno de los cuales tiene un control dominante. Cada vendedor toma sus propias decisiones acerca del precio y la producción, pero ninguno posee la capacidad de dominar el mercado. La segunda hipótesis implica que la cantidad de certificados ofrecida permanece constante, independientemente del precio. A priori, los productores de electricidad renovable no incurrir en costes adicionales al solicitar y emitir GdO, que siempre representan una

fuelle de ingresos adicional. A coste cero, los productores preferirán obtener algún beneficio, por pequeño sea, lo que resulta en una oferta insensible al precio, es decir, una elasticidad de la oferta nula.

En conclusión, la cantidad de GdO expedidas en un año y concreto se puede calcular como el producto de la generación de electricidad asociada a la tecnología t en el país p y la tasa de expedición de GdO para dicho país p y tecnología t (Ecuación 1)

$$\text{Oferta GdO}_{p,t,y} = \text{Generación de electricidad}_{p,t,y} \times \text{tasa de expedición}_{p,t,y}$$

Ecuación 1

6.2 DEMANDA DE GDO

Para modelar la demanda de GdO se han considerado dos variables fundamentales, la demanda de electricidad renovable y la disposición a pagar por este producto. En primer lugar, los consumidores de GdO se ha dividido en dos categorías, consumidores industriales y consumidores domésticos que, a su vez, se han subdividido en más grupos. Para los consumidores industriales la subdivisión se ha realizado en función de los sectores del NACE, mientras que en el caso de los consumidores domésticos la división se ha realizado en base al número de personas por vivienda.

Como se mencionó en la sección 3.1, no todos los consumidores están dispuestos a pagar por electricidad verde. En el caso de los consumidores industriales, la literatura sugiere que la DAP por electricidad verde de las empresas depende de dos variables fundamentales, los ingresos y la concienciación medioambiental, relacionada con el conocimiento y la edad. Para cuantificar la DAP de cada sector se han calculado dos índices, el índice de ingresos y el índice de concienciación medioambiental, que toman un valor comprendido entre 0 y 1. El índice de ingresos se ha obtenido a partir de la normalización de los ingresos medios por empresa de cada sector. El índice de concienciación medioambiental se ha calculado a partir de dos parámetros, la evolución del promedio de emisiones de gases de efecto invernadero por empresa asociada a cada sector y la exposición del sector a consumidores preocupados

por el medio ambiente. Ambos índices tienen un efecto positivo en la DAP por electricidad verde, por lo que se han multiplicado a fin de conseguir un índice global. Véase Figura 17. Finalmente, este análisis se ha alimentado con la información histórica sobre los precios de las GdO (véase secciones 5.3 y 5.4), lo que ha permitido determinar una DAP relativa, como porcentaje del precio de la electricidad, para cada sector. Por ejemplo, si hay tres consumidores A, B y C con una DAP del 3%, 6% y 4% respectivamente, y el precio de la electricidad es de 50 €/MWh, entonces el consumidor A pagará hasta 1.5€/GdO, el consumidor B pagará un máximo de 3€/GdO y el consumidor C estará dispuesto a pagar 2€/GdO.

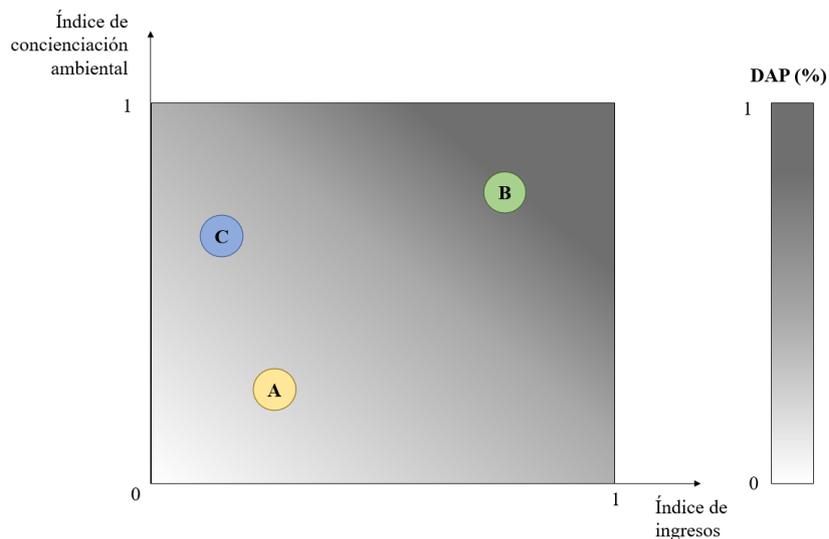


Figura 17. Relación entre el índice de ingresos, el índice de concienciación ambiental y la DAP por GdO

En el caso de los consumidores domésticos, se han creado seis subgrupos según el tamaño del hogar o número de convivientes. La DAP de cada subgrupo en cada país se ha determinado en base a la literatura, al precio medio que pagan los hogares por la electricidad y a unos factores de ajuste según el tipo de vivienda. El procedimiento de cálculo, detallado en la sección 7.2.1, conduce a una DAP como porcentaje relativo al precio de la electricidad, al igual que en los sectores del NACE. Esto ha permitido unificar ambos tipos de consumidores, domésticos e industriales, para modelar la curva de la demanda de GdO.

$$DAP_{k,p,t,y} = DAP(\%)_{k,p} \times \text{Precio electricidad}_{p,y}$$

Ecuación 2

6.3 DETERMINACIÓN DEL PRECIO

Para determinar el precio de las GdO es necesario relacionar la curva de la oferta y la demanda. Hoy en día, los consumidores de GdO pueden adquirir los certificados en cualquier país que cumpla con la normativa EECS (miembros de AIB). Además, las diferencias de precios según el tipo de tecnología son mínimas (véase sección 5.3). Por tanto, se ha modelado una única curva de la oferta, que engloba todos los países y tecnologías, y una única curva de la demanda. Posteriormente, los precios se han ajustado ligeramente con factores que capturan las preferencias de los consumidores por las distintas tecnologías.

En primer lugar, para modelar la demanda de GdO se han ordenado las categorías de todos los países según la DAP en orden descendente, es decir, de mayor a menor. Por lo tanto, la curva de demanda es una función escalonada descendente con pendiente negativa. La demanda del consumidor con la DAP más alta se satisface primero. Una vez que se satisface esta demanda, se satisface la demanda correspondiente al segundo consumidor con la DAP más alta, y así sucesivamente hasta que se agota la oferta de GdO. El precio de equilibrio de un GdO en un año y es la menor DAP que corresponde al consumidor que pudo satisfacer al menos un MWh de su demanda. Véase Figura 18.

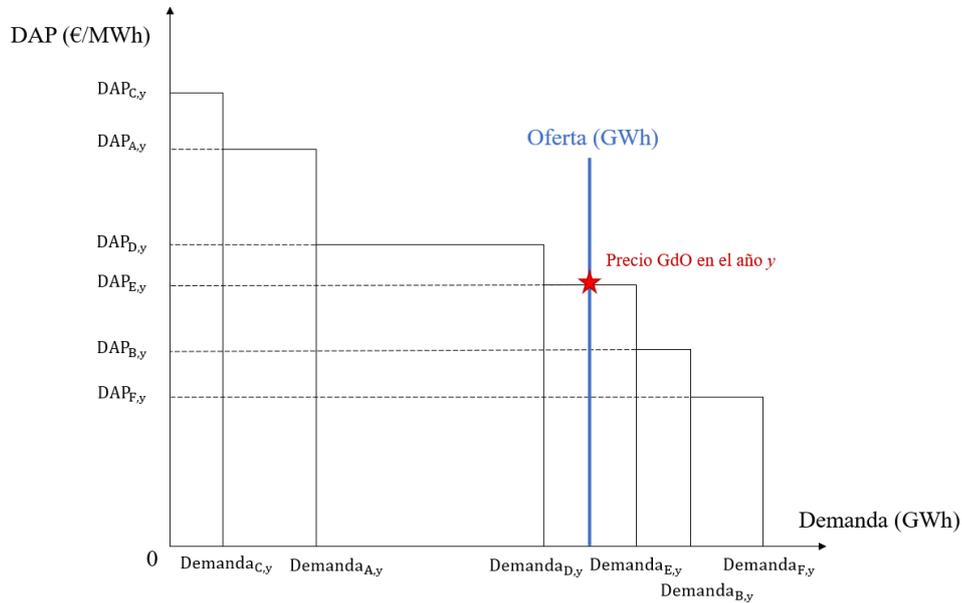


Figura 18. Modelo – Relación entre la curva de la oferta y la demanda de GdO para un año y

La revisión literaria realizada en la sección 3.1 revela que la DAP por electricidad verde está influenciada por el tipo de tecnología. En concreto, la tecnología preferida por los consumidores es la geotérmica, seguida de la solar y la eólica. La generación hidroeléctrica se encuentra la última en la lista. Para tener en cuenta este factor en el modelo, se han aplicado factores de corrección sobre los precios, que reflejan las preferencias individuales de los consumidores (véase Tabla 10). Por tanto, el precio de una GdO de la tecnología t en el año y se deduce aplicando la Ecuación 3.

$$\text{Precio GdO}_{t,y} = \text{Precio GdO}_y \times \text{factor}_t$$

Ecuación 3

	Factor
Solar	1.05
Eólica	1.03
Hidráulica	1

Tabla 10. Factores de corrección según la tecnología

6.4 LIMITACIONES

En esta sección se presentan las limitaciones del modelo, que aplican a todos los escenarios considerados. En primer lugar, se ha considerado que los productores emiten GdO independientemente de si podrán venderlas o no. Esto implica asumir que los costes de transacción son insignificantes, a pesar de que algunos registros puedan aplicar tarifas modestas por la expedición y el comercio de GdO. Este comportamiento se incorpora en el modelo mediante una inelasticidad perfecta en la curva de oferta, tal como se detalla en la Sección 6.1.

En segundo lugar, el análisis exploratorio del capítulo 5 revela que existe cierta estacionalidad en la oferta y la demanda de GdO. No obstante, dado que la vida útil de las GdO es un año (12 meses) sería muy complicado considerar este factor. Por lo tanto, se ha optado por un enfoque anual, que no contempla la variación de precios en función de la estación o época del año. En otras palabras, el modelo se centra exclusivamente en la expedición de GdO, sin tener en cuenta el momento de cancelación de las mismas.

Por otro lado, no se han considerado límites inferiores en el precio de las GdO. El precio viene determinado por el punto de equilibrio entre la oferta y la demanda. Como la oferta de GdO es inelástica, si la oferta supera a la demanda, no habrá precio de equilibrio. En estos casos el precio de las GdO será 0 €/MWh. Históricamente, no se han observado precios nulos, pero con el modelo planteado podría haber precios por debajo de los mínimos históricos.

Debido a la falta de información completa sobre el mercado de GdO y la antigüedad de las plantas generadoras, se ha supuesto que las GdO se distinguen únicamente por su tecnología. Además, se ha asumido que el comportamiento de la demanda no cambia con el tiempo, salvo por un factor de crecimiento en el consumo de electricidad.

6.5 CÓDIGO

Para realizar el modelo, se ha utilizado Visual Basic para Aplicaciones (VBA), un lenguaje de programación de Office que permite crear aplicaciones nuevas y funciones personalizadas en Excel. En primer lugar, se ha creado un archivo de Excel con tres pestañas: “Oferta”, “Demanda” y “Resultados”. En la pestaña de resultados hay un botón denominado “Run” que está asociado a un *Sub*¹². Al pulsar este botón se ejecuta el código y la pestaña de resultados se actualiza con los precios de las GdO. El código se puede consultar en el ANEXO II.

¹² Un procedimiento Sub en Visual Basic es una secuencia de instrucciones ubicada entre las palabras clave Sub y End Sub, diseñada para realizar acciones sin devolver un valor. Un procedimiento Sub puede recibir argumentos, como constantes, variables o expresiones, que se pasan a través de un procedimiento de llamada.

Capítulo 7. INPUTS DEL MODELO

En este capítulo se explica detalladamente la metodología empleada para obtener los inputs necesarios para el modelo, explicado en el capítulo anterior. Los inputs se dividen en oferta y demanda, que a su vez se dividen en otras variables. Las secciones 7.1, 7.2 se centran en la metodología aplicada a los inputs del caso base. Posteriormente, en la sección 0, se presentan diferentes escenarios con variaciones en algunas variables, manteniendo la misma metodología. Todas las bases de datos empleadas son de acceso público, a excepción de unos informes proporcionados por un asesor de mercado de reconocido prestigio a Qualitas Energy.

7.1 INPUTS PARA MODELAR LA OFERTA DE GdO

En el modelo planteado, la oferta de GdO depende exclusivamente de dos variables, la generación de electricidad y la tasa de expedición de GdO.

7.1.1 PRONÓSTICO DE GENERACIÓN RENOVABLE

Para el pronóstico de generación renovable se ha empleado como principal fuente de información Ember Climate. En concreto, se han utilizado las bases de datos "*Yearly Electricity Data*" y "*European Clean Power Pathways Data*" [89]. La generación de cada país para cada tecnología se ha calculado a partir de dos parámetros, la capacidad instalada y el número medio de horas de funcionamiento. Por un lado, la capacidad instalada se ha obtenido mediante interpolación lineal a partir de cinco valores: la capacidad instalada en 2023 según "*Yearly electricity data*" y las capacidades previstas en 2030, 2040, 2045 y 2050 de acuerdo con el *Stated Policy Scenario* de "*European Clean Power Pathways Data*", un camino basado en las políticas vigentes declaradas por los países europeos.

Por otro lado, el número equivalente de horas anuales de funcionamiento se ha determinado a partir de un análisis histórico. Para cada país y tecnología se ha calculado el

número de horas equivalentes desde el año 2000 hasta el 2023, dividiendo la generación total (GWh) entre la potencia instalada (GW) (según “*Yearly electricity data*”). Teniendo en cuenta que la eficiencia de las tecnologías es cada vez mejor, se ha tomado como número medio de horas equivalentes la media de los últimos cinco años. La generación solar, eólica e hidráulica dependen significativamente de la climatología. Por ello, para analizar la sensibilidad de los precios obtenidos con el modelo a las condiciones meteorológicas, se ha asumido que el conjunto de datos sigue una distribución normal y se ha escogido un intervalo de confianza del 95% (si se tomara un intervalo de confianza mayor, los escenarios meteorológicos resultarían muy externos).

$$\text{Número horas equivalente}_{t,p} \in [\bar{x}_{t,p} - 2\sigma_{t,p}, \bar{x}_{t,p} + 2\sigma_{t,p}]$$

Ecuación 4

7.1.2 TASA DE EXPEDICIÓN DE GdO

La segunda variable necesaria para modelar la oferta de GdO es la tasa de expedición. Este parámetro varía según el país y tecnología, y depende principalmente de la regulación relativa a la expedición de GdO. Como punto de partida, se han utilizado las tasas de expedición resultantes del análisis exploratorio (véase sección 5.2). En concreto, para cada país y tecnología, se ha tomado la media de los últimos tres años (véase Tabla 11).

	Hidráulica	Solar	Eólica
Austria	95%	51%	100%
Alemania	65%	4%	8%
España	97%	85%	94%
Finlandia	98%	2%	97%
Francia	95%	49%	85%
Italia	92%	55%	93%
Países Bajos	99%	38%	99%
Noruega	99%	0%	95%
Suecia	72%	0%	83%

Tabla 11. Tasa de expedición de GdO media por país y tecnología

7.1.3 RESUMEN DE LOS INPUTS Y BASES DE DATOS

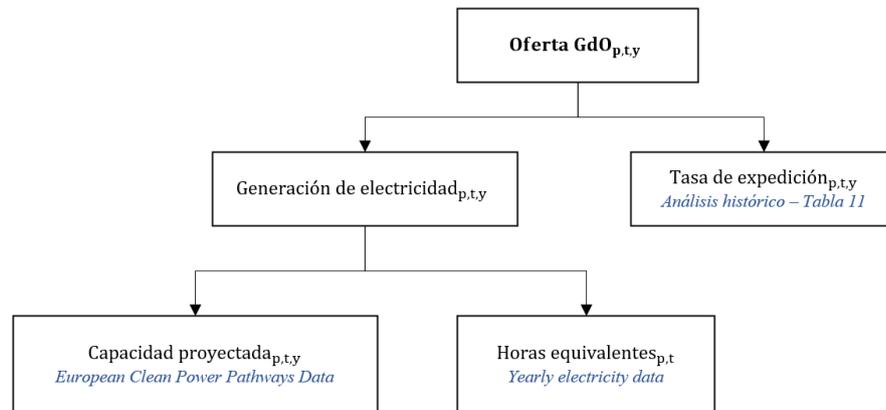


Figura 19. Metodología y bases de datos utilizadas para modelar la oferta de GdO

7.2 INPUTS PARA MODELAR LA DEMANDA DE GdO

Como se ha expuesto en el capítulo anterior, se ha asumido que la oferta de GdO es inelástica y, por tanto, el precio queda determinado por la demanda. La demanda se ha modelado como una función escalonada decreciente, donde el eje de abscisas es la demanda de electricidad renovable, agrupada por categorías, y el eje de ordenadas es la DAP por una GdO.

7.2.1 DEMANDA DE ELECTRICIDAD RENOVABLE

Para modelar la demanda de electricidad renovable y, por tanto, la demanda de GdO se ha realizado un análisis por país. La demanda de cada país se ha dividido en dos grupos, industrial y doméstica. Por un lado, la demanda industrial se ha analizado en base a los sectores del NACE Rev. 2, la clasificación de las actividades económicas usada por la UE. NACE Rev. 2 está estructurada en 21 secciones, que a su vez se dividen en divisiones, éstas en grupos y éstos en clases que representan todas y cada una de las actividades económicas actuales. Sirve para la organización y el registro de datos en el marco de Eurostat, la base de datos empleada para este análisis. Teniendo en cuenta la información disponible y la

relevancia de cada uno de los sectores en el mundo de la electricidad se han considerado únicamente los sectores recogidos en la Tabla 12.

Código NACE	Actividad Económica
B	Minería y extracción de canteras
C10-C12	Fabricación de productos alimenticios; bebidas y productos de tabaco
C13-C15	Fabricación de textiles, prendas de vestir, cuero y productos relacionados
C16	Fabricación de productos de madera y corcho, excepto muebles; fabricación de artículos de paja y materiales trenzables
C17	Fabricación de papel y productos de papel
C18	Impresión y reproducción de medios grabados
C19	Fabricación de coque y productos de petróleo refinado
C20	Fabricación de productos químicos
C21	Fabricación de productos farmacéuticos básicos y preparados farmacéuticos
C22	Fabricación de productos de caucho y plástico
C23	Fabricación de otros productos minerales no metálicos
C24	Fabricación de metales básicos
C25	Fabricación de productos de metal fabricados, excepto maquinaria y equipo
C26	Fabricación de productos informáticos, electrónicos y ópticos
C27	Fabricación de equipos eléctricos
C28	Fabricación de maquinaria y equipo n.c.o.p.
C29	Fabricación de vehículos de motor, remolques y semirremolques
C30	Fabricación de otro equipo de transporte
C31 C32	Fabricación de muebles; otras manufacturas
C33	Reparación e instalación de maquinaria y equipo
D	Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado
E36	Captación, tratamiento y suministro de agua
E37-E39	Alcantarillado, gestión de residuos, actividades de descontaminación
F	Construcción
G45	Comercio al por mayor y al por menor y reparación de vehículos de motor y motocicletas
G46	Comercio al por mayor, excepto vehículos de motor y motocicletas
G47	Comercio al por menor, excepto vehículos de motor y motocicletas
H49	Transporte terrestre y por tuberías
H52	Almacenamiento y actividades de apoyo al transporte
H53	Actividades postales y de mensajería
I	Actividades de alojamiento y servicios de comida
J58	Actividades de edición
J59_J60	Producción de películas cinematográficas, video y programas de televisión; programación y emisión de radio y televisión
J61	Telecomunicaciones
J62 J63	Programación, consultoría y otras actividades relacionadas con la informática
K65	Seguros, reaseguros y fondos de pensiones, excepto seguridad social obligatoria
K66	Actividades auxiliares a servicios financieros y de seguros
L	Actividades inmobiliarias
M69_M70	Actividades jurídicas y de contabilidad; actividades de las sedes centrales; actividades de consultoría de gestión empresarial
M71	Actividades de arquitectura e ingeniería; ensayos y análisis técnicos
M72	Investigación y desarrollo científico
M73	Publicidad y estudios de mercado
M74 M75	Otras actividades profesionales, científicas y técnicas; actividades veterinarias

N77	Actividades de alquiler y arrendamiento
N78	Actividades de empleo
N79	Actividades de agencias de viajes, operadores turísticos, servicios de reservas y actividades relacionadas
N80-N82	Seguridad e investigación, servicios de jardinería, actividades administrativas y de apoyo
P	Educación
Q86	Actividades de salud humana
Q87 Q88	Actividades de atención residencial y sin alojamiento
R90-R92	Actividades creativas, artísticas y de entretenimiento; bibliotecas, archivos, museos y otras actividades culturales; actividades de juego de azar y apuestas
R93	Actividades deportivas, recreativas y de entretenimiento
S95	Reparación de ordenadores y bienes personales y del hogar
S96	Otras actividades de servicios personales

Tabla 12. Demanda industrial - Sectores del NACE analizados

La base de datos de Eurostat utilizada para determinar la demanda de electricidad por país y sector del NACE es “*Energy supply and use by NACE Rev. 2 activity*” (*env_ac_pefasu*) [90]. En concreto, se ha tomado la variable *USE* en Tera julios y se ha convertido a GWh dividiendo entre 3.6. El registro de datos llega hasta 2021, por lo que se ha elegido este año como base para el análisis. Se asume que el comportamiento de la demanda no varía significativamente de un año a otro, salvo por un factor de crecimiento. Este factor de crecimiento se ha calculado en base a dos parámetros: el porcentaje de la demanda actual que desea GdO y la demanda de electricidad verde esperada en el futuro. En 2021, un 24% de la demanda estaba cubierta por GdO (véase Tabla 13), pero dado que en las subastas francesas de los últimos dos años se vendieron el 100% de las GdO subastadas (véase Figura 11), se asume que el porcentaje de consumidores que desea GdO es mayor. Según la literatura, entre un 20% y un 50% de los consumidores industriales están dispuestos a pagar más por electricidad verde. Teniendo en cuenta estos datos se estima que, en 2021, el 35% de los consumidores deseaban GdO y solo un 24% tuvo acceso a estas (demanda cubierta por GdO). Además, se prevé que este porcentaje crezca hasta un 75%¹³ en 2050. Para un crecimiento anual de la demanda de electricidad del 1.9% (*Announced pledge scenario*¹⁴),

¹³ Estimación basada en el informe de un asesor de mercado de reconocido prestigio

¹⁴ Este escenario asume que todos los compromisos climáticos realizados por gobiernos e industrias de todo el mundo hasta finales de agosto de 2023, incluyendo las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) y los objetivos de neutralidad de carbono a largo plazo, así como los objetivos de acceso a la electricidad y la cocina limpia, se cumplirán por completo y a tiempo.

resulta una demanda de GdO de 2,602 TWh y una tasa de crecimiento anual compuesto del 4.2%.

Año	GdO canceladas (GWh)	Demanda electricidad (GWh)	% demanda cubierta con GdO
2019	510,824	2,240,490	23%
2020	480,264	2,149,160	22%
2021	531,202	2,236,700	24%
2022	572,139	2,161,170	26%
2023	588,154	2,087,160	28%
2050	2,602,076*	3,469,435*	75%*

Tabla 13. Demanda de electricidad cubierta por GdO (incluye únicamente los 9 dominios de análisis)

*Estimación propia

$$\text{Crec. anual demanda industrial} = 3,469,435 * 0.75 / 2,236,700 * 0.35^{1/29} - 1 = 4.2\%$$

Por otro lado, la demanda doméstica de cada país se ha dividido en seis subcategorías según el tamaño de la vivienda: 1 persona, 2 personas, 3 personas, 4 personas, 5 personas y 6 o más personas. En la base de datos de Eurostat “*Energy supply and use by NACE Rev. 2 activity*” una de las categorías es consumidores domésticos (HH - *household consumers*). Para subdividir esta demanda en grupos se ha utilizado la base de datos “*Number of households by household composition, number of children and age of youngest child (1 000)*” (*lfst_hhnhtych*) [91], que proporciona información detallada por países sobre el número de viviendas en función de la composición. A partir del tipo de vivienda (solo un adulto, pareja de adultos u otros) y del número de hijos se ha determinado el número de casas pertenecientes a cada una de las 6 categorías. A continuación, se ha calculado el número de personas en cada categoría como el producto del número de viviendas por el número de personas en ese tipo de vivienda. La demanda total de electricidad de los consumidores domésticos se ha dividido entre el número total de personas¹⁵ para calcular un ratio de “demanda de electricidad por persona”. Este ratio se ha multiplicado nuevamente por el número de personas en cada categoría, obteniendo así la demanda de electricidad de cada grupo. A continuación, para determinar la demanda de GdO a partir de la demanda de

¹⁵ Para cada país se ha comprobado que este número coincide con el número total de habitantes

electricidad se han aplicado los siguientes porcentajes, que difieren de los porcentajes aplicados a la demanda industrial. De acuerdo con la literatura, los consumidores domésticos muestran una mayor disposición a pagar por electricidad verde. Se ha considerado que en 2021 un 60% de la demanda deseaba GdO (véase sección 3.1 - informe publicado por OECD [38]) y que esta cifra crecerá a razón de un 2.3% cada año para alcanzar un 75% de la demanda doméstica cubierta por GdO en 2050.

$$\text{Crec. anual demanda doméstica} = \frac{3,469,435 * 0.75}{2,236,700 * 0.6}^{1/29} - 1 = 2.3\%$$

7.2.2 DISPOSICIÓN A PAGAR POR UNA GDO

El segundo parámetro necesario para dibujar la curva de la demanda es la DAP por una GdO. Esta variable es difícil de estimar, pero resulta clave en el modelo ya que en última instancia es la que determina el precio de los certificados. El análisis exploratorio reveló una fuerte correlación entre el precio de la electricidad y el precio de las GdO. Por ello, la DAP de cada grupo se ha estimado como porcentaje relativo al precio de la electricidad. Paralelamente se ha realizado un pronóstico de precios de la electricidad que ha permitido deducir el valor real de las GdO en €/MWh. Cabe mencionar que al igual que el análisis de la demanda de GdO, este análisis se ha realizado de forma individual para cada país.

7.2.2.1 Disposición a pagar por una GdO en términos relativos al precio de la electricidad

En el caso de los consumidores industriales, la DAP se ha determinado en base a los dos índices mencionado en la sección 6.2: el índice de ingresos, que captura la capacidad de las empresas para pagar por electricidad verde, y el índice de concienciación ambiental, que representa el deseo de pagar por fuentes renovables. Ambos están comprendidos entre 0 y 1. Por un lado, para determinar el índice de ingresos, se ha empleado la base datos “Enterprises by detailed NACE Rev.2 activity and special aggregates” (*sbs_oww_act*) de Eurostat [92]. Esta fuente contiene información sobre indicadores económicos de las empresas según el país y la categoría NACE. El índice de ingresos asignado a cada grupo dentro de un país depende del excedente bruto de explotación medio, obtenido como el cociente de la división

del excedente bruto de explotación total del sector (*gross operating surplus*) y el número de empresas. En base a los resultados observados en varios países se han asignado los valores recogidos en la Tabla 14.

Excedente medio de explotación (k€)	< 0	0 - 10	10 - 100	100 - 500	500 - 1000	1000 - 10000	> 10000
Índice de ingresos	0.05	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1

Tabla 14. Índice de ingresos según el excedente medio de explotación del sector (Estimación propia)

Por otro lado, para determinar el índice de concienciación ambiental se han empleado dos parámetros, la evolución del promedio de emisiones de gases de efecto invernadero por empresa asociada a cada sector y la exposición del sector a consumidores preocupados por el medio ambiente [3]:

- La evolución del promedio de emisiones de gases de efecto invernadero se ha calculado con la información de la base de datos “*Air emissions accounts by NACE Rev. 2 activity*” (*env_ac_ainah_r2*) de Eurostat [93]. Para cada sector se ha calculado el porcentaje de aumento o reducción de las emisiones entre 2018 y 2022. Luego, se han normalizado los resultados para obtener un índice comprendido entre 0 y 1, de forma que cuanto mayor es la reducción de emisión más alto es el índice.
- La exposición del sector a consumidores preocupados por el medio ambiente se ha estimado en base al tipo de actividad económica. Por ejemplo, es probable que las empresas pertenecientes al sector "Minería y extracción de canteras" (B) muestren menos preocupación por las cuestiones ambientales en comparación con las empresas que pertenecen al sector "Fabricación de textiles, prendas de vestir, cuero y productos relacionados" (C13-C15), dado que estas últimas están más vinculadas a consumidores conscientes del impacto ambiental de sus compras. Este parámetro también está comprendido entre 0 y 1. Véase Tabla 15.

El índice de concienciación ambiental global se calcula como la media del índice de emisiones y el índice de exposición del sector. Luego, este índice se multiplica por el índice de ingresos y se obtiene un índice global que representa la DAP de cada sector. El análisis

histórico revela que la DAP de los consumidores por GdO se sitúa en torno a un 2% del precio de la electricidad, alcanzando máximos del 7% (véase sección 5.3). Por tanto, una DAP del 56% no tendrían sentido. Para que los resultados sean coherentes, se han ajustado las DAP en base a los valores históricos. Se ha asumido que la media de las DAP calculadas es un 2% y se ha aplicado proporcionalidad directa. Además, se ha establecido un tope del 10% para evitar precios desorbitados (tope establecido en base a los registros históricos).

$$\text{índice de concienciación ambiental}_{k,p} = (\text{índice de emisiones}_{k,p} + \text{índice de exposición}_{k,p})/2$$

$$DAP_{k,p}(\%) = \text{índice de ingresos}_{k,p} \times \text{índice de concienciación ambiental}_{k,p} \times \text{factor de ajuste}_{k,p}$$

Código NACE	Actividad Económica	Índice
B	Minería y extracción de canteras	0.2
C10-C12	Fabricación de productos alimenticios; bebidas y productos de tabaco	0.6
C13-C15	Fabricación de textiles, prendas de vestir, cuero y productos relacionados	0.7
C16	Fabricación de productos de madera y corcho, excepto muebles; fabricación de artículos de paja y materiales trenzables	0.6
C17	Fabricación de papel y productos de papel	0.4
C18	Impresión y reproducción de medios grabados	0.4
C19	Fabricación de coque y productos de petróleo refinado	0.1
C20	Fabricación de productos químicos	0.6
C21	Fabricación de productos farmacéuticos básicos y preparados farmacéuticos	0.5
C22	Fabricación de productos de caucho y plástico	0.3
C23	Fabricación de otros productos minerales no metálicos	0.2
C24	Fabricación de metales básicos	0.4
C25	Fabricación de productos de metal fabricados, excepto maquinaria y equipo	0.2
C26	Fabricación de productos informáticos, electrónicos y ópticos	0.3
C27	Fabricación de equipos eléctricos	0.4
C28	Fabricación de maquinaria y equipo	0.4
C29	Fabricación de vehículos de motor, remolques y semirremolques	0.5
C30	Fabricación de otro equipo de transporte	0.4
C31 C32	Fabricación de muebles; otras manufacturas	0.5
C33	Reparación e instalación de maquinaria y equipo	0.4
D	Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado	0.8
E36	Captación, tratamiento y suministro de agua	0.7
E37-E39	Alcantarillado, gestión de residuos, actividades de descontaminación	0.6
F	Construcción	0.4
G45	Comercio al por mayor y al por menor y reparación de vehículos de motor y motocicletas	0.7
G46	Comercio al por mayor, excepto vehículos de motor y motocicletas	0.7
G47	Comercio al por menor, excepto vehículos de motor y motocicletas	0.9
H49	Transporte terrestre y por tuberías	0.3
H52	Almacenamiento y actividades de apoyo al transporte	0.3

H53	Actividades postales y de mensajería	0.4
I	Actividades de alojamiento y servicios de comida	0.6
J58	Actividades de edición	0.7
J59_J60	Producción de películas cinematográficas, video y programas de televisión; programación y emisión de radio y televisión	0.6
J61	Telecomunicaciones	0.8
J62_J63	Programación, consultoría y otras actividades relacionadas con la informática	0.8
K65	Seguros, reaseguros y fondos de pensiones, excepto seguridad social obligatoria	0.1
K66	Actividades auxiliares a servicios financieros y de seguros	0.1
L	Actividades inmobiliarias	0.7
M69_M70	Actividades jurídicas y de contabilidad; actividades de las sedes centrales; actividades de consultoría de gestión empresarial	0.4
M71	Actividades de arquitectura e ingeniería; ensayos y análisis técnicos	0.4
M72	Investigación y desarrollo científico	0.6
M73	Publicidad y estudios de mercado	0.8
M74_M75	Otras actividades profesionales, científicas y técnicas; actividades veterinarias	0.5
N77	Actividades de alquiler y arrendamiento	0.6
N78	Actividades de empleo	0.4
N79	Actividades de agencias de viajes, operadores turísticos, servicios de reservas y actividades relacionadas	0.5
N80-N82	Seguridad e investigación, servicios de jardinería, actividades administrativas y de apoyo	0.6
P	Educación	0.8
Q86	Actividades de salud humana	0.4
Q87_Q88	Actividades de atención residencial y sin alojamiento	0.4
R90-R92	Actividades creativas, artísticas y de entretenimiento; bibliotecas, archivos, museos y otras actividades culturales; actividades de juego de azar y apuestas	0.5
R93	Actividades deportivas, recreativas y de entretenimiento	0.5
S95	Reparación de ordenadores y bienes personales y del hogar	0.4
S96	Otras actividades de servicios personales	0.4

Tabla 15. Índice de exposición del sector NACE a consumidores preocupados por el medio ambiente [3]

La DAP de los consumidores domésticos se ha determinado de forma independiente a la DAP de la demanda industrial de GdO. La literatura sugiere que, de media, los hogares en Europa están dispuestos a pagar como máximo 0.04 €/kWh por electricidad verde [40]. Esta cifra varía en función del país (véase Figura 5) y está estrechamente relacionada con el precio de la electricidad. En los países nórdicos como Finlandia, donde la electricidad es más barata, la DAP por kWh es menor en comparación con otros países donde la electricidad es más cara, como Italia o Alemania. Por ello, en base al precio histórico medio de la electricidad y a los factores recogidos en el meta-análisis de la literatura existente [32] se han deducido las DAP por electricidad verde de los hogares domésticos recogidas en Tabla

16. En siguiente lugar, para convertir estos valores en porcentajes relativos al precio de la electricidad, se han dividido entre el precio de la electricidad para los consumidores domésticos, según la base de datos de Eurostat “*Electricity prices for household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards)*” (*nrg_pc_204*) [94]. Además, se ha considerado que no todos los tipos de vivienda están dispuestos a pagar este porcentaje, por lo que se han aplicado los factores recogidos en la Tabla 17. Estos factores se han estimado dividiendo el número medio de salarios por vivienda entre el número de convivientes, de forma que en una casa donde vive una persona sola la DAP por electricidad verde será mayor que en una casa con dos padres y tres hijos. Cabe mencionar que, al igual que para la demanda industrial, en este caso se ha establecido un tope del 10% para evitar precios irreales.

Pais	Precio medio de la electricidad (2018-2024), €/MWh	DAP (cts. €/KWh)
Austria	97.4	5 (Estimación propia)
Alemania	89.6	4.5 (Literatura)
España	82.7	4 (Literatura)
Finlandia	67.1	3 (Literatura)
Francia	99.0	5 (Estimación propia)
Italia	117.0	5.5 (Literatura)
Países Bajos	93.3	4.5 (Estimación propia)
Noruega	58.5	2 (Estimación propia)
Suecia	56.5	2 (Estimación propia)

Tabla 16. DAP por electricidad verde de los hogares en función del país

Número de convivientes	Factor de corrección
1	1.00
2	0.88
3	0.67
4	0.50
5	0.40
6 o más	0.33

Tabla 17. Factores de corrección de la DAP por electricidad verde según el tipo de hogar

7.2.2.2 Pronóstico de los precios de la electricidad

En último lugar, se ha realizado un pronóstico de los precios de la electricidad desde 2024 hasta 2050 en base a unos informes proporcionados por un asesor de mercado a Qualitas Energy. Estos informes contienen pronósticos sobre el futuro de la electricidad en Francia, España, Alemania e Italia. En ellos se presenta una estimación de los precios de la

electricidad hasta 2060 para cuatro escenarios: *central*, *high*, *low* y *Net Zero*. Para este *forecast* se han tomado únicamente los tres primeros escenarios. En el escenario *high* la oferta de renovables es menor por lo que los precios de la electricidad son más elevados, mientras que en el escenario *low* ocurre lo contrario.

Para estimar los precios de la electricidad en el resto de los dominios, esto es, Austria, Finlandia, Noruega, Países Bajos y Suecia, se ha realizado un análisis histórico. El objetivo es determinar la correlación histórica entre los precios de la electricidad en estos dominios y los precios de la electricidad en los países incluidos en los informes del asesor de mercado (véase Ecuación 5). Estos factores de correlación (K) se han calculado como la media del cociente entre el precio de la electricidad de ambos países en los últimos 5 años (véase Tabla 22 en el ANEXO I). Esta correlación no es completamente precisa y podría mejorarse con un pronóstico individual para cada país.

$$\text{Precio}_{p,y} = K_{FR,p} \times \text{Precio}_{FR,y} + K_{ES,p} \times \text{Precio}_{ES,y} + K_{IT,p} \times \text{Precio}_{IT,y} + K_{DE,p} \times \text{Precio}_{DE,y}$$

Ecuación 5

7.2.3 RESUMEN DE LOS INPUTS Y BASES DE DATOS

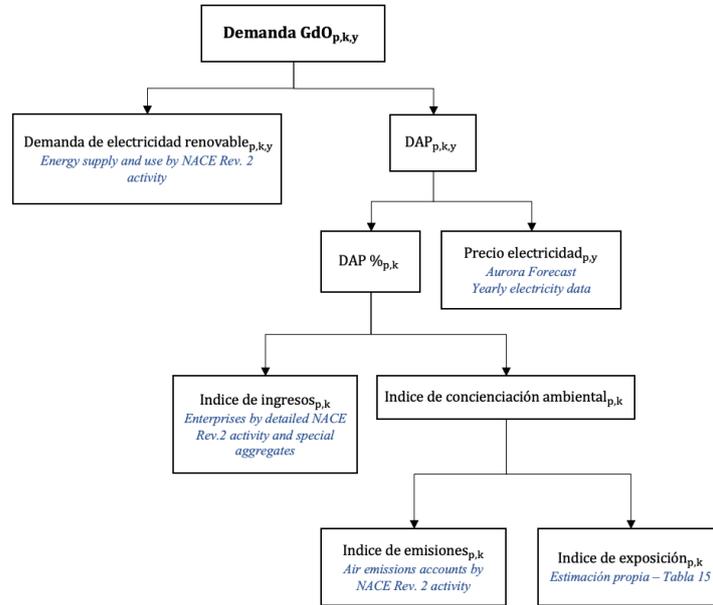


Figura 20. Metodología y las bases de datos utilizadas para modelar la demanda industrial de GdO

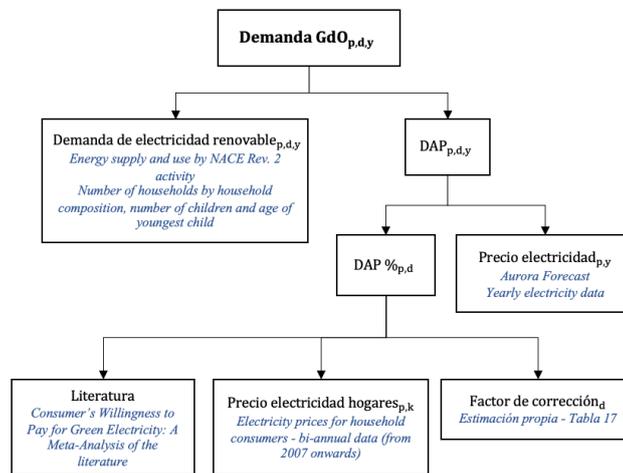


Figura 21. Metodología y las bases de datos utilizadas para modelar la demanda doméstica de GdO

7.3 ESCENARIOS

A partir del caso base se han simulado diferentes escenarios de oferta y demanda de electricidad verde. Para ello, se han realizado modificaciones en las siguientes variables: (1) el factor de crecimiento de la demanda, calculado a partir del porcentaje de demanda de electricidad cubierta por GdO en 2024 y 2050, (2) la potencia instalada (o generación renovable), y (3) la DAP (%) por electricidad renovable. En la Tabla 18 se resumen los diferentes escenarios, explicados más adelante.

Escenario / Variable	Factor de crecimiento de la demanda (industrial / domestica)	Escenario de potencia instalada o generación renovable ¹⁶	Tasa de expedición de GdO	DAP media por GdO (%)
Escenario de políticas declaradas (Caso base)	4.2% / 2.3%	Planes nacionales de energía y clima (<i>Stated Policy Scenario</i>)	Histórico	Se mantendrá estable en un 2%
Escenario verde	5.6% / 3.6%	Net Zero en 2050 (<i>Technology driven</i>)	Histórico	Crecerá hasta un 4% en 2050
Escenario pesimista	3.8% / 1.8%	Planes nacionales de energía y clima (<i>Stated Policy Scenario</i>)	Histórico	Disminuirá hasta un 1% en 2050
Escenario basado en la información proporcionada por un asesor de mercado	4.1% / 2.2%	Escenario central de los informes ¹⁷	Histórico	Se mantendrá estable en un 2%

Tabla 18. Escenarios planteados

Escenario 1 – El primer escenario o caso base, descrito a lo largo de este capítulo, se fundamenta en las políticas actuales declaradas por los países europeos. Por un lado, respecto a la oferta de GdO, se asume que las tasas de expedición se mantendrán constantes a lo largo de los años y que la generación de electricidad renovable será determinada por las capacidades previstas en los planes nacionales de energía y clima. Por otro lado, se prevé

¹⁶ En todos los escenarios, excepto en el último, se ha estimado la generación en base a la potencia instalada y a las horas equivalentes de funcionamiento. En el último escenario, se han utilizado directamente los valores de generación

¹⁷ Para los países para los que no se dispone de un informe, se ha realizado una estimación propia basada en la generación histórica, al igual que se hizo con el precio de la electricidad

que la demanda de GdO crezca hasta alcanzar el 75% de la demanda de electricidad cubierta por GdO en 2050. La DAP media de una GdO en relación con el precio de la electricidad se estima en un 2%, basado en el análisis histórico.

Escenario 2 – El segundo escenario asume un desarrollo más sostenible de la demanda industrial y doméstica, alineado con el *Net Zero Escenario* de la IEA, reflejado en una mayor demanda de electricidad. Se proyecta un crecimiento anual de demanda de electricidad del 2.4% y se estima que en 2050 un 95% de la demanda estará cubierta por GdO. Esto resulta en un crecimiento anual compuesto de la demanda industrial y doméstica del 5.6% y 3.6% respectivamente. Además, se asume una mayor DAP por GdO, con un promedio del 4% en 2050. En cuanto a la oferta de GdO, se ha considerado el escenario *Technology driven* del modelo de EMBER Climate. Este escenario contempla un desarrollo del sector energético compatible con los objetivos climáticos del Acuerdo de París (1.5°C) y consistente con un sistema energético neto cero para 2050. Las tasas de expedición son las mismas que en el escenario 1.

Escenario 3 – En tercer lugar, se ha planteado un escenario pesimista de demanda renovable. En este escenario la oferta viene determinada por los planes nacionales de energía y clima y las tasas de expedición de GdO históricas. Este escenario se distingue del primero en la DAP por fuentes renovables, que en este caso disminuye a medida que el sistema se vuelve más verde. Se asume que la DAP media en 2050 será de un 1%. Además, se ha considerado un crecimiento de la demanda de electricidad del 1.4%, según el escenario *Stated Policy Scenario* de la IEA. Esto resulta en un crecimiento anual compuesto de la demanda industrial y doméstica de GdO del 3.8% y 1.8%, respectivamente.

Escenario 4 – Por último, se ha planteado un escenario basado en los informes¹⁸ que proporciona un asesor de mercado a Qualitas Energy. En este escenario no se ha seguido la metodología empleada para estimar la generación renovable, sino que se han tomado directamente los valores de generación del escenario central de los informes. Como se

¹⁸ Son los mismos informes que se han empleado para elaborar el pronóstico de precios

mencionó en la sección 7.2.2.2, solo se dispone de informes para 4 países: Francia, Italia, Alemania y España. Por ello, para el resto de los países se ha realizado una estimación propia, similar a la estimación realizada para el pronóstico de precios. Se han calculado unos factores de correlación, por tecnología, entre los países, basados en los datos de generación histórica (véase Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25 en el ANEXO I) y, a partir de estos factores y de los informes se ha deducido la generación renovable¹⁹. A continuación, para modelar la oferta de GdO, se han aplicado las tasas de expedición históricas. Por otro lado, para obtener la curva de la demanda se ha estimado un crecimiento anual de la electricidad del 1.75%. Este valor se ha calculado como la media del crecimiento de la electricidad de Alemania (2.17%), Italia (1.65%), Francia (1.17%) y España (2.00%), según los informes del asesor de mercado. Considerando que en 2050 un 75% de la demanda estará cubierta por GdO, resulta un crecimiento anual compuesto de la demanda industrial y doméstica de GdO del 4.1% y 2.2% respectivamente.

¹⁹ Esta estimación no es muy precisa y podría mejorarse con un análisis individual para cada país

Capítulo 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del modelo para los cuatro escenarios planteados en la sección 0. En primer lugar, se analiza el equilibrio entre la oferta y la demanda para cada escenario y, en segundo lugar, se discuten las diferencias de precios en función de las hipótesis planteadas.

8.1 EQUILIBRIO ENTRE LA OFERTA Y LA DEMANDA DE GdO

En la Figura 22 se presentan la oferta y la demanda anual de GdO para cada uno de los escenarios. El precio de los certificados viene determinado por el punto de equilibrio entre la oferta y la demanda, por lo que resulta interesante analizar el desequilibrio entre ambas variables. En el primer escenario se observa un crecimiento de la oferta más pronunciado en comparación con el crecimiento de la demanda, desde el año 2024 hasta el año 2046. Esto implica que durante este periodo el desequilibrio disminuye y los precios tienden a bajar. En el segundo escenario la situación es muy diferente. En este caso, a partir de 2034, se observa una escasez de GdO a nivel europeo, ya que la demanda supera consistentemente la oferta. En otras palabras, el desequilibrio entre la oferta y la demanda es cada vez mayor, lo que implica una subida sostenida de los precios. El crecimiento de la demanda está motivado por el interés de los consumidores industriales, que buscan cumplir los objetivos nacionales y europeos de descarbonización. A pesar de que en este escenario la oferta también es mayor que en el primer escenario, el incremento de la demanda es superior al incremento de la oferta. Esto justifica la subida de precios.

En el tercer escenario se observa un crecimiento de la oferta mucho más rápido que el crecimiento de la demanda. El desequilibrio es cada vez menor, alcanzando el mínimo en 2045, 30 TWh. A partir de este año, la oferta crece más lentamente y el desequilibrio vuelve a aumentar.

Finalmente, el último escenario refleja un comportamiento de la oferta y la demanda híbrido entre los escenarios 1 y 2. Por un lado, la demanda de GdO es muy similar al escenario 1 y la oferta de GdO también es muy similar hasta el año 2036. A partir de este año, la oferta de GdO del escenario 4, basada en los informes del asesor de mercado, crece más lentamente. Por otro lado, la evolución del desequilibrio es similar al escenario 2. Desde 2024 hasta 2032 el desequilibrio entre la oferta y la demanda se hace cada vez más pequeño, lo que resulta en una bajada de los precios. A partir de 2032, el desequilibrio comienza a aumentar y los precios suben.

		2025	2030	2035	2040	2045	2050
Escenario 1	Oferta GdO (TWh)	741	908	1204	1499	1831	2047
	Demanda GdO (TWh)	1024	1216	1446	1724	2059	2464
Escenario 2	Oferta GdO (TWh)	808	1144	1419	1693	1899	2014
	Demanda GdO (TWh)	1050	1329	1685	2140	2723	3472
Escenario 3	Oferta GdO (TWh)	741	908	1204	1499	1831	2047
	Demanda GdO (TWh)	1015	1177	1369	1595	1862	2177
Escenario 4	Oferta GdO (TWh)	756	1005	1202	1398	1523	1658
	Demanda GdO (TWh)	1021	1204	1423	1684	1998	2374

Tabla 19. Oferta y demanda de GdO para cada escenario

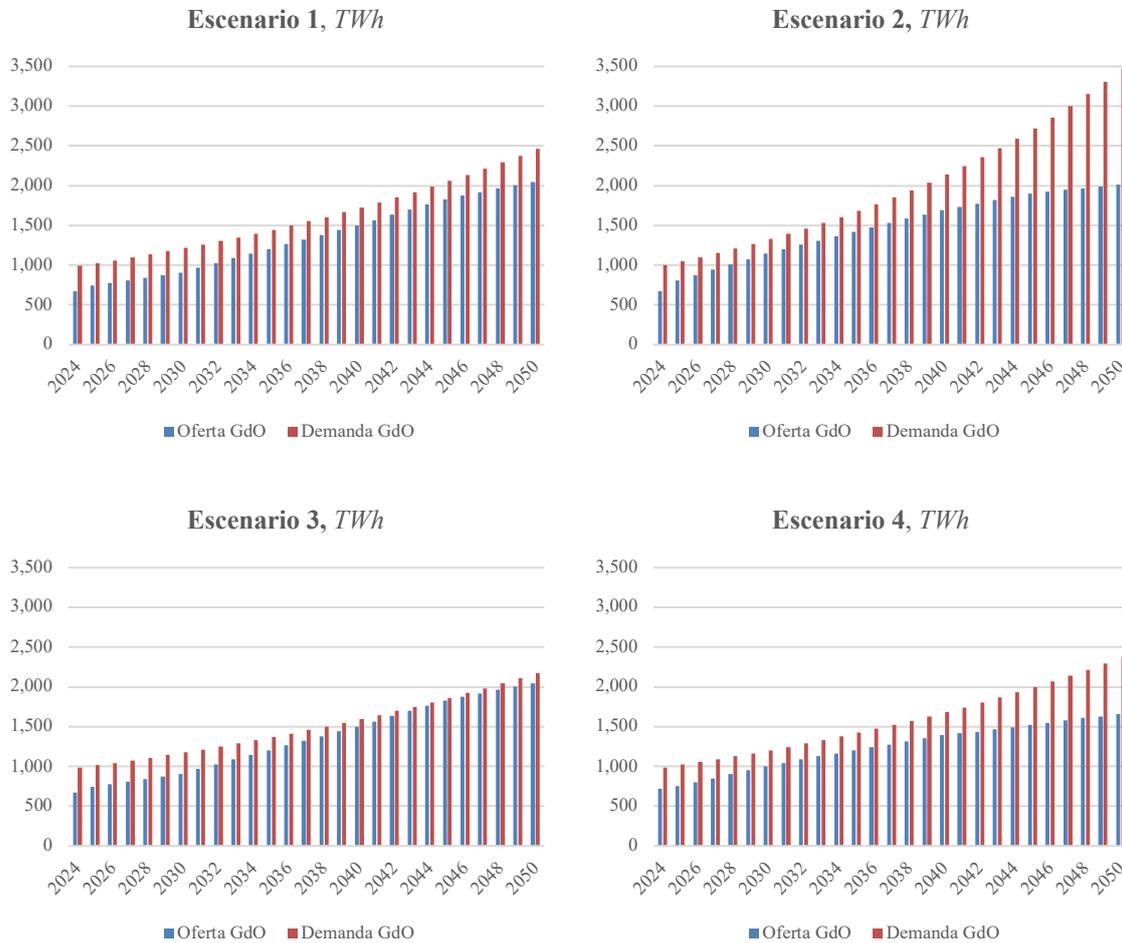


Figura 22. Equilibrio entre la oferta y la demanda de GdO para cada escenario

8.2 PRECIOS DEL MODELO

Todos los precios obtenidos con el modelo se corresponden con GdO hidráulicas, véase Figura 23. Los precios de las GdO solares y eólicas se han deducido aplicando los factores de la Tabla 10 (véase Tabla 26 en el ANEXO). Por tanto, las curvas de precios para las GdO eólicas y solares serán iguales, pero desplazadas en un valor que depende del tipo de tecnología y del precio de las GdO hidráulicas.

En el escenario 1 o caso base, el precio de las GdO hidráulicas varía en un rango entre 0.81 y 1.97 €/MWh. Se observa una disminución del precio desde el año 2030 hasta el año

2038, momento en el que parece estabilizarse en torno a 1 €/MWh. Esta caída del precio está impulsada por un crecimiento de la oferta de renovables más rápido que el crecimiento de la demanda, considerando que la DAP por las GdO se mantiene constante a lo largo de los años.

En el segundo escenario se observa un comportamiento completamente diferente de los precios, que varían entre 1.31 y 4.02 €/MWh. Este escenario se caracteriza por un desarrollo más sostenible de la demanda con una mayor DAP por las GdO. Además, se asume que la oferta de GdO será mayor, compatible con un sistema *Net Zero 2050*. Desde la actualidad hasta el año 2030 se observa una ligera disminución de los precios, impulsada por un crecimiento de la oferta superior al crecimiento de la demanda (véase Figura 22). No obstante, a partir de 2030 comienza una escasez en la oferta de GdO, lo que da lugar a una subida sostenida de los precios que llegan a duplicarse en 2050.

El tercer escenario refleja la situación más pesimista de precios de las GdO. En este escenario, los precios caen de forma sostenida hasta 2039, que se estabilizan en torno a los 0.15 €/MWh. Esta caída de los precios está motivada por una disminución en la demanda de GdO y en la DAP por estos certificados, a medida que el sistema se vuelve cada vez más verde.

Por último, en el escenario 4, los precios de las GdO se mantienen relativamente estables, fluctuando entre 1.13 y 1.64 €/MWh. Se observan dos tendencias. En primer lugar, desde 2024 hasta 2035 los precios de las GdO tienden a bajar debido a que la oferta crece más rápidamente que la demanda. A partir de 2036, la oferta de GdO crece mucho más lentamente, lo que aumenta el desequilibrio con la demanda y provoca una subida de los precios que, para 2050, vuelven a alcanzar los niveles de 2024.

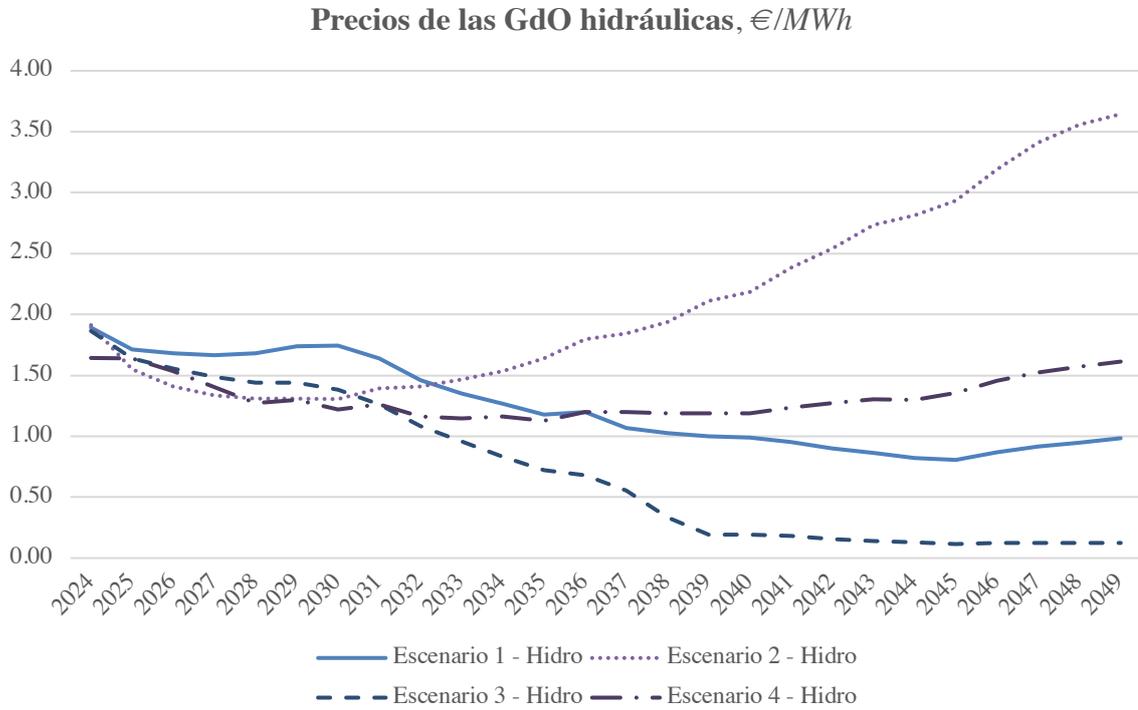


Figura 23. Precios de las GdO hidráulicas para los distintos escenarios, según el modelo

Capítulo 9. *BACKTESTING* Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

9.1 *BACKTESTING*

Para validar el modelo, se ha llevado a cabo un *backtesting*. El *backtesting* es una estrategia que consiste en probar un modelo predictivo con datos históricos para evaluar su precisión y confiabilidad. En otras palabras, es una prueba retrospectiva que asegura que el modelo funciona según lo esperado, prediciendo con exactitud los resultados futuros. En este caso, los inputs para el *backtesting*, que abarca desde 2018 hasta 2023, son los recogidos en la Tabla 20.

	Input	Fuente de información
Oferta de GdO	Oferta de GdO	AIB y CNMC – GdO expedidas
Demanda de GdO	Demanda de electricidad verde	Eurostar - “ <i>Energy supply and use by NACE Rev. 2 activity</i> ”
	% demanda que desea GdO (Industrial / Doméstica)	30 – 35% / 50 – 60%
	DAP (%) media	2.0%
	Precios electricidad	Ember Climate – “ <i>Yearly Electricity Data</i> ”

Tabla 20. Inputs para el backtesting

Los resultados del *backtesting* se han comparado con los precios de las GdO hidráulicas de origen nórdico, que representan el mayor volumen en Europa. Los resultados se presentan en la Figura 24. Como se puede observar, los precios predichos por el modelo son muy similares a los precios históricos reales de las GdO hidráulicas nórdicas, según el informe de asesor de mercado (Figura 6). Por un lado, el modelo es capaz de capturar las fluctuaciones de precio, fruto del comportamiento oportunista de la demanda. Al disminuir la oferta de electricidad renovable, como ocurrió en el año 2022 por la gran sequía que sufrió Europa, los precios suben y viceversa. Por otro lado, la similitud de precios indica que los porcentajes de demanda actual que desea GdO son acertados.

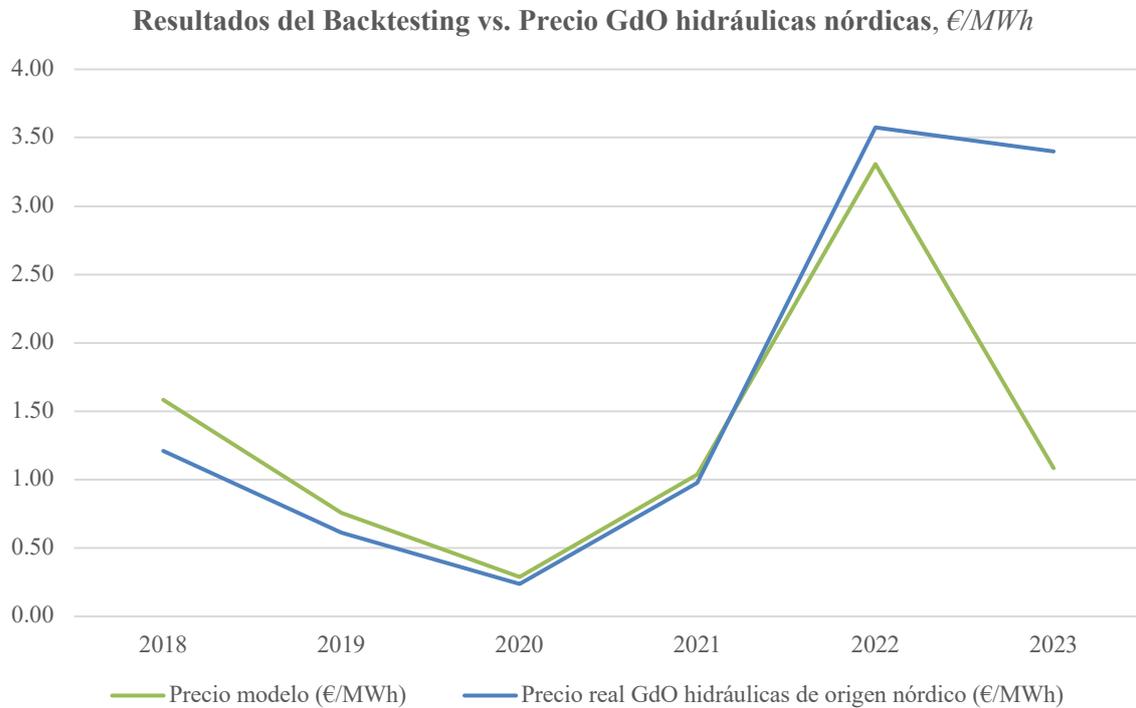


Figura 24. Resultados del backtesting vs. precios reales de las GdO hidráulicas nórdicas

Como se mencionó en la sección 6.4, el modelo no tiene en cuenta la estacionalidad como un factor que influye en el precio de las GdO. Se trata de un enfoque anual. Por lo tanto, los resultados del *backtesting* no reflejan los picos de precios, que llegaron a alcanzar los 7.5€/MWh a finales de noviembre de 2022. Este fenómeno sí se ha tenido en cuenta en el análisis de sensibilidad, donde se ha incrementado la DAP media (%) para el escenario de condiciones meteorológicas adversas (es decir, poca generación renovable) y se ha disminuido en el caso contrario. Otro factor que el modelo no captura y se observa en el *backtesting* es el desfase temporal entre la evolución del precio de las GdO y la evolución del precio de la electricidad. Como se discutió en la sección 5.3, durante los últimos meses de 2022, los precios de la electricidad comenzaron a disminuir notablemente, mientras que los precios de las GdO se mantuvieron estables hasta mediados de 2023, momento en que comenzaron a caer. Como el precio modelado depende de la oferta, la demanda y el precio de la electricidad medio de cada año, el resultado predicho en 2023 es significativamente inferior al precio medio real de las GdO nórdicas. No obstante, dado que el pronóstico de

precios de electricidad es relativamente estable a lo largo de los años, sin grandes fluctuaciones, este factor no debería ser un problema en el modelo de predicción. La subida de los precios de la electricidad en 2022 fue una situación muy excepcional, impulsada por factores externos e impredecibles, como la pandemia y los conflictos geopolíticos (Guerra de Rusia y Ucrania).

9.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Por otro lado, se ha realizado un análisis de sensibilidad para estudiar cómo las variaciones de los inputs afectan los resultados del modelo. En concreto, se han realizado dos análisis, uno univariante y otro multivariante. El análisis univariante permite identificar la influencia individual de cada variable de entrada en las variables de salida y así, determinar cuáles tienen un mayor impacto en los resultados. Por su parte, en el análisis multivariante se modifican simultáneamente varias variables de entrada para evaluar cómo las interacciones entre ellas influyen en las variables de salida. Este análisis proporciona una comprensión más completa de la incertidumbre asociada con el modelo.

9.2.1 ANÁLISIS UNIVARIANTE

El análisis de sensibilidad univariante se centra en la generación renovable, el crecimiento de la demanda de electricidad, el porcentaje de demanda que desea GdO en 2050 y la DAP media en 2050 (%). Para cada una de las variables se han realizado cuatro variaciones sobre el escenario 1 o caso base: en las dos primeras variaciones se han reducido los valores de los parámetros seleccionados en factores de 0.5 y 0.75, y en las otras dos variaciones se han aumentado en factores de 1.5 y 2. En cada iteración se ha registrado la variación de precio año a año con respecto al caso base y se ha calculado el promedio.

En la Figura 25 se muestran los resultados de análisis de sensibilidad univariante. El input que más influye en el modelo es la generación renovable, seguido crecimiento de la demanda. En primer lugar, como cabría esperar, se observa una correlación negativa entre el precio de las GdO y la generación renovable. Al disminuir la generación renovable, disminuye la oferta de GdO y, como consecuencia, aumentan los precios de estos

certificados. En los dos casos en los que se ha aumentado la generación renovable, el factor de variación relativa alcanza su mínimo valor, -1. Este límite está determinado por el precio mínimo que pueden tomar las GdO de acuerdo con el modelo planteado, 0 €/MWh. Lo que ocurre en ambos casos es que la oferta de GdO supera a la demanda en todos los años, resultando en un precio cero y una variación relativa de -1. Cabe destacar que los precios alcanzan la máxima variación relativa cuando la oferta de GdO se reduce a la mitad (factor de 0.5). El promedio de variación de los precios en este escenario es de 1.97 pp.

Por otro lado, se observa una correlación positiva entre el precio de las GdO y el resto de las variables relacionadas de la demanda. Al aumentar la demanda que desea GdO, el crecimiento de esta o la DAP media en 2050, los precios también aumentan, y viceversa. Las variables que más influyen son el crecimiento de la demanda y la demanda que desea GdO en 2050, ambas muy correlacionadas, ya que el crecimiento se determina a partir de la demanda de GdO proyectada en 2050. Asimismo, se aprecia una correlación lineal entre la DAP media en 2050 y los precios de las GdO. Este resultado es coherente, ya que la DAP media no determina el punto de equilibrio, sino el valor por el que se multiplica el precio de la electricidad una vez encontrado el precio de equilibrio. Al variar la DAP media en 2050 el punto de equilibrio se mantiene constante, a diferencia de lo que ocurre al cambiar cualquiera de los otros parámetros.

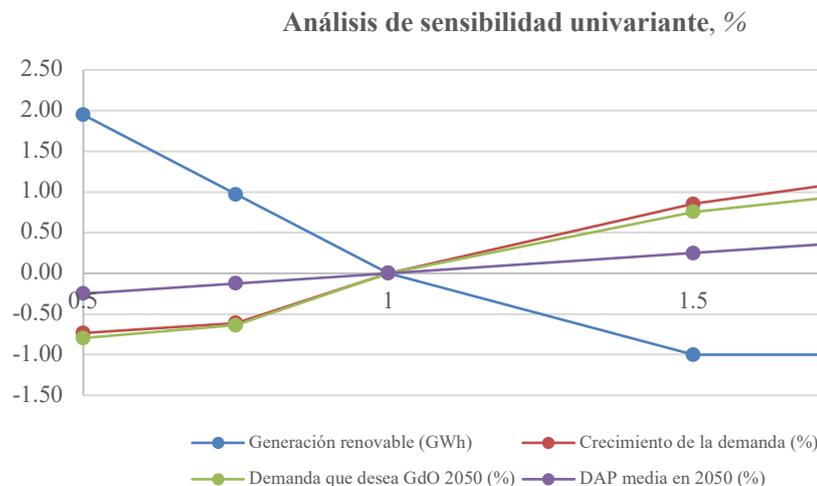


Figura 25. Análisis de sensibilidad univariante

9.2.2 ANÁLISIS MULTIVARIANTE

El análisis multivariante se centra en el impacto de la generación renovable en el modelo, identificada en la sección anterior como la variable más influyente. Las fuentes de energía renovable se basan en la utilización de recursos naturales e ilimitados como el agua, el sol, el viento o la biomasa. Estas fuentes dependen de fenómenos atmosféricos incontrolables, lo que representa una desventaja significativa en la transición hacia un sistema eléctrico más verde. Las condiciones meteorológicas de un año específico pueden influir drásticamente en la generación de electricidad renovable. Por ejemplo, en 2022, una sequía generalizada en Europa provocó una considerable disminución en la generación hidroeléctrica. Este fenómeno climatológico fue uno de los factores desencadenantes del notable aumento de los precios de las GdO en 2022 y 2023.

A fin de analizar el impacto de las condiciones meteorológicas en la generación solar, eólica e hidráulica, se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad multivariante. Para cada uno de los tres primeros escenarios planteados, se han simulado dos subescenarios, uno con condiciones meteorológicas favorables y otro con condiciones desfavorables. En concreto, se han modificado las horas equivalentes de funcionamiento para cada país y tecnología. Como se mencionó en la sección 6.1, se asume que los datos históricos sobre el número de horas equivalentes siguen una distribución normal. Tomando un intervalo de confianza del 95%, las horas equivalentes para cada subescenario se calculan como la media más/menos dos veces la desviación típica del conjunto. Asimismo, la cantidad de generación renovable afecta a los precios de la electricidad y a la DAP de los consumidores por las GdO. Por tanto, ambas variables también se han modificado en los dos subescenarios. Por un lado, en el subescenario de condiciones favorables se ha reducido la DAP en un factor de 0.75 y se han tomado los precios del escenario *low* de los informes facilitados por el asesor de mercado. En este escenario, aumenta la generación renovable en el mix energético y, como consecuencia, bajan los precios de la electricidad. Por otro lado, en el subescenario de condiciones climatológicas adversas se ha reducido la DAP en un factor 1.25 y se han tomado los precios del escenario *high* de los informes facilitados por el asesor de mercado.

En el caso del escenario 4, no se ha podido realizar el mismo análisis, ya que la generación no se ha estimado en base a la potencia instalada y a las horas de funcionamiento equivalentes, sino que se han tomado directamente los valores de generación de los informes del asesor de mercado. No obstante, en estos informes, la generación varía en función del escenario. Por tanto, se ha podido realizar un análisis similar utilizando la generación de los escenarios *low* y *high* para los subescenarios de condiciones favorables y adversas, respectivamente. Además, se han aplicado las mismas modificaciones en la DAP y en el pronóstico de precios de la electricidad que en los casos anteriores.

Los resultados del análisis se muestran en la Figura 26. Como se puede deducir de los resultados, el impacto en el precio de las GdO es mayor si las condiciones climatológicas son desfavorables. Este resultado es coherente con las fluctuaciones históricas en los precios, consecuencia de anomalías climatológicas, como las sequías. El promedio de variación relativa oscila entre el 121% y el 220%. Además, cabe notar que cuanto menores son los precios de las GdO, mayor es la sensibilidad a las condiciones meteorológicas. De ahí, que las discrepancias en los escenarios 1 y 3 sean mayores.

Históricamente las GdO han estado sobre abastecidas, lo que ha llevado a precios bajos en torno a los 0.5 €/MWh. Por ello, no se han observado grandes caídas o picos negativos durante años favorables de generación renovable (mucho sol, viento o lluvia). En el análisis de sensibilidad multivariante, se observa una dispersión más pequeña, en comparación con la dispersión del subescenario de condiciones meteorológicas adversas, que oscila entre el 51% y el 81%. Cabe mencionar que en los escenarios 1 y 3, para algunos años, resultan precios de 0€/MWh, lo que indica un sobreabastecimiento de GdO.

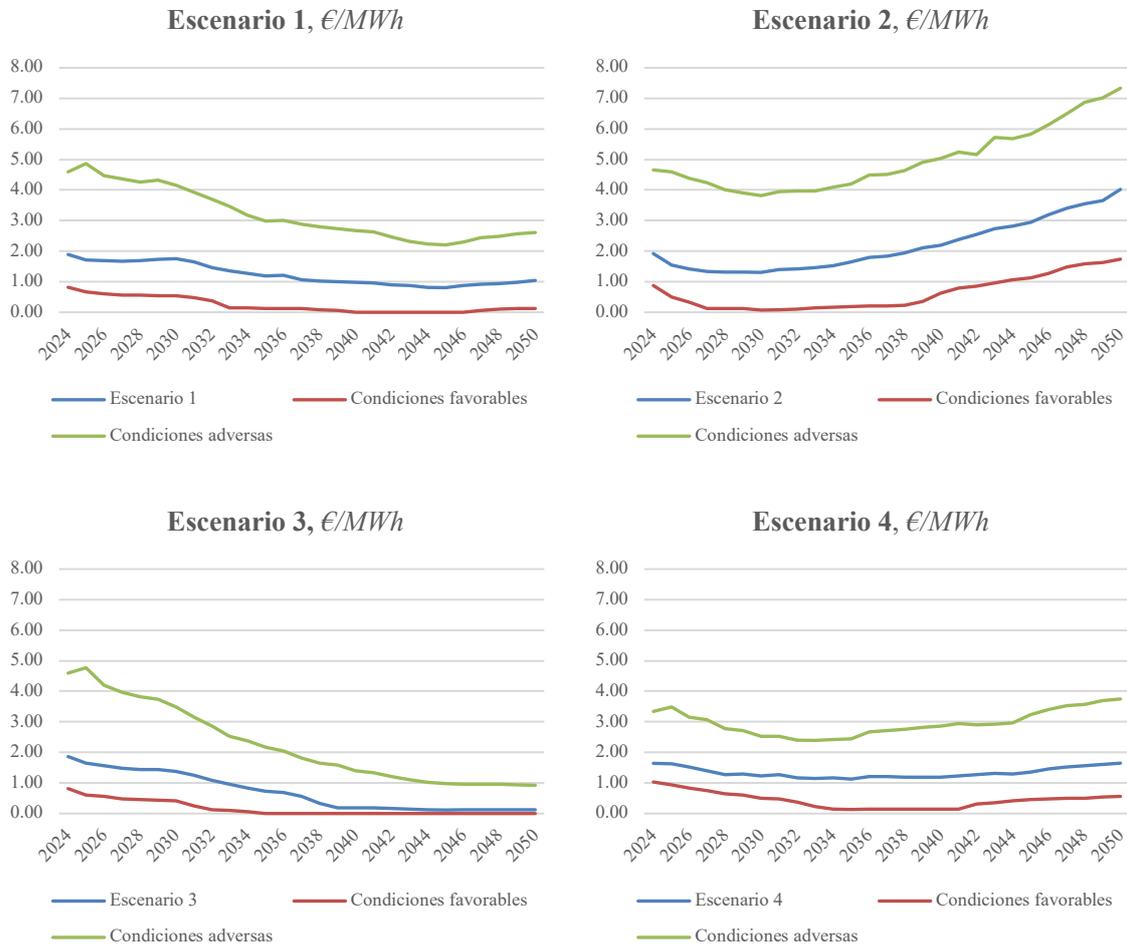


Figura 26. Resultados del análisis de sensibilidad multivariante

Capítulo 10. CONCLUSIONES Y FUTUROS

DESARROLLOS

El principal objetivo de este trabajo es aumentar la transparencia del mercado de GdO a través de un modelo de previsión de precios a largo plazo. Hoy en día, la mayoría de GdO se negocian a través de acuerdos bilaterales, lo que impide a productores, consumidores e inversores tener un precio de referencia válido. Asimismo, en los últimos años se han observado fluctuaciones significativas en el precio de los certificados, fruto de la especulación y de un comportamiento oportunista de la demanda.

En primer lugar, el análisis exhaustivo del marco regulatorio sugiere que todavía queda un largo camino por recorrer en la armonización de los sistemas de GdO nacionales. Cada país cuenta con su propia normativa, lo que supone un desafío en el comercio internacional de los certificados. AIB se posiciona como líder del cambio, con la misión de unificar a los organismos emisores europeos de sistemas de seguimiento de atributos energéticos para todos los vectores y tecnologías. Además, el mercado de GdO actual se enfrenta a otros desafíos, entre los que destacan la falta de adicionalidad, la doble contabilidad o los bajos precios. Aunque las GdO se introdujeron originalmente para informar sobre el origen de la electricidad a los consumidores europeos, un propósito que generalmente cumplen, la opinión pública de este sistema no es del todo positiva.

El análisis exploratorio sobre la situación de los 28 países miembros de AIB sugiere que hay 10 *players* fundamentales en el mercado de GdO europeo: España, Francia, Italia, Alemania, Finlandia, Suecia, Suiza, Noruega, Austria y Países Bajos. Estos países expidieron más del 80% del total de las GdO europeas en 2023. En cuanto a la tecnología de producción, las GdO hidráulicas representan más de 50% del mercado europeo, mientras que el volumen de GdO solares y eólicas ha experimentado un marcado crecimiento en los últimos cinco años, con tasas de crecimiento anual del 34% y 23%, respectivamente. En

contraste, la cantidad de GdO procedentes de fuentes de biomasa se ha estancado y las GdO geotérmicas representan el segmento de menor volumen con gran diferencia. Por todo ello, el modelo se centra en las GdO solares, eólicas e hidráulicas expedidas por los 10 países con mayor presencia en el mercado²⁰.

Los resultados del modelo, que se alimenta de literatura, bases de datos y estimaciones propias, revelan que los precios futuros de las GdO estarán determinados por el desequilibrio entre la oferta y la demanda. Si aumenta el desequilibrio, los precios tenderán a subir, y viceversa. La generación renovable se destaca como la variable más influyente en el precio de las GdO, según el modelo. Esta variable determina la cantidad máxima teórica de certificados que se pueden expedir en un periodo concreto. Si aumenta la oferta de renovables y, por tanto, de GdO, los precios bajarán y si disminuye la oferta de renovables ocurrirá lo contrario. Otra variable muy importante es el crecimiento de la demanda de GdO, deducida a partir del crecimiento de la demanda de electricidad y del porcentaje de demanda que deseará GdO en 2050. Un crecimiento más rápido de la demanda conlleva un desarrollo más rápido del mercado y una tendencia al alza de los precios. Finalmente, la DAP de los consumidores es un parámetro clave en el modelo, que resulta difícil de estimar. La literatura revela que los consumidores domésticos están dispuestos a pagar más por electricidad renovable en comparación con los consumidores industriales. Históricamente, el promedio de DAP media por una GdO se sitúa en un 2% del precio de la electricidad. No obstante, este valor ha experimentado grandes fluctuaciones debido al comportamiento oportunista de la demanda. En noviembre de 2022, las GdO llegaron a representar hasta un 7% del precio de la electricidad, como consecuencia de la gran sequía que dio lugar a una disminución de la generación hidráulica.

Todas las variables mencionadas están sometidas a una gran incertidumbre. Por tanto, para capturar las diferentes evoluciones posibles del mercado de GdO, se plantean diferentes escenarios. En un escenario básico, fundamentado en las políticas actuales declaradas por

²⁰ A excepción de Suiza por la falta de información

los países europeos, la demanda crece más lentamente que la oferta y, por tanto, los precios tienden a bajar. Si se asume un desarrollo más sostenible del sistema energético y de la demanda, la DAP y el desequilibrio crecen, dando lugar a una subida de los precios. Por último, en un escenario pesimista, la DAP y la demanda interesada en GdO disminuyen a medida que el sistema se vuelve cada vez más verde. Esto resulta en una bajada sostenida de los precios.

Más allá, a fin de reducir la incertidumbre asociada a la generación renovable, para cada escenario, se han simulado dos subescenarios, uno con condiciones meteorológicas favorables y otro con condiciones meteorológicas desfavorables. Este análisis de sensibilidad sugiere que el impacto en el precio de las GdO es mayor si las condiciones climatológicas son adversas, resultado coherente con las fluctuaciones históricas en los precios como consecuencia de anomalías climatológicas, como las sequías. Históricamente, no se han observado grandes caídas o picos negativos durante años favorables de generación renovable.

Los precios obtenidos con el modelo fluctúan entre 0.12 y 4.02 €/MWh, un rango de valores que ya se ha observado previamente en el mercado. Durante la pandemia, los precios de las GdO cayeron drásticamente, situándose en torno a 0.1 €/MWh. En contraste, durante la segunda mitad de 2022, los precios crecieron, alcanzando valores de hasta 10 €/MWh. Aunque esta cifra fue puntual (récord histórico), el promedio de precios en 2022 se situó alrededor de los 4 €/MWh.

Asimismo, el modelo se ha validado mediante un *backtesting*, y los resultados han sido satisfactorios. Los precios predichos por el modelo desde 2018 hasta 2022 son muy similares a los precios de las GdO nórdicas hidráulicas, lo que indica que el modelo es capaz de capturar las fluctuaciones de precio, fruto del comportamiento oportunista de la demanda. Considerando la incertidumbre de los datos y la opacidad del mercado, se puede concluir que el modelo es sólido y realista.

De cara al futuro, algunos factores externos que podrían revolucionar el mercado de GdO son la prohibición de expedir certificados a electricidad subsidiada, cambios en los miembros

de AIB, la introducción de GdO para gases renovables o la creación de un *Marketplace* europeo. Si alguno de estos cambios se materializa, aumentaría la presión al alza sobre los precios de las GdO. Adicionalmente, las políticas europeas en materia de sostenibilidad también juegan un papel fundamental en el desarrollo del mercado de GdO. Si la UE realiza modificaciones en los objetivos establecidos en materia de descarbonización, es posible que el volumen de GdO se vea afectado en los próximos años.

Con el nivel de armonización y las políticas actuales, es poco probable que el sistema de GdO pueda superar los desafíos de confianza que enfrenta. Además, los precios continuarán siendo insuficientes para impulsar significativamente la producción de electricidad verde. Por lo tanto, es crucial priorizar la armonización entre los estados miembros de la AIB en la expedición de GdO, asegurar la publicación de datos coherentes, y establecer un sistema adicional de incentivos para la generación de electricidad renovable. Estos pasos podrían convertir el sistema de GdO en un modelo efectivo de incentivo y en un medio confiable de información.

Capítulo 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Parlamento Europeo, «El mercado interior de la energía,» [En línea]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/45/el-mercado-interior-de-la-energia>.
- [2] J. Langeraar y R. Devos, «Guarantee of Origin: The proof of the pudding is in the eating.,» *Science Direct*, vol. IV, nº 4, 2003.
- [3] A. Wimmers y R. Madlener, «The European Market for Guarantees of Origin for Green Electricity: A Scenario-Based Evaluation of Trading under Uncertainty,» Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN), 2023.
- [4] Enagás GTS, «Garantías de origen renovable: cómo saber si la energía que consumes es verde,» 9 Enero 2023. [En línea]. Available: <https://goodnewenergy.enagas.es/sostenibles/garantias-de-origen-renovable-como-saber-si-la-energia-que-consumes-es-verde/>.
- [5] Watiofy, «Garantías de origen renovable (GdO): ¿qué son y para qué sirven?,» 11 Octubre 2022. [En línea]. Available: <https://watiofy.com/info/faqs/garantias-de-origen-renovable-gdo-que-son-y-para-que-sirven/>.
- [6] AIB, «Home | AIB,» [En línea]. Available: <https://www.aib-net.org/aib>.
- [7] AIB, «EECS,» [En línea]. Available: <https://www.aib-net.org/eecs>.
- [8] AIB, «AIB Member Countries / Regions,» [En línea]. Available: <https://www.aib-net.org/facts/aib-member-countries-regions>.
- [9] Aurora Energy Research, «European Guarantees of Origin forecast,» 2023.
- [10] CNMC, «La CNMC aprueba un nuevo formato para el etiquetado de la electricidad en la factura de los consumidores,» 13 Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.cnmc.es/prensa/resolucion-etiquetado-electricidad-20211213>.
- [11] M. Giorgi, «Análisis. Previsiones del mercado de garantías de origen hacia 2024 y 2029,» 14 Julio 2023. [En línea]. Available: <https://energiaestrategica.es/mercado-de-garantias-de-origen/>.
- [12] red eléctrica, «Conócenos: Marco regulatorio,» [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/conocenos/marco-regulatorio>.
- [13] Parlamento Europeo, «La energía renovable,» [En línea]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/70/la-energia-renovable>.

- [14] Consejo de la Unión Europea, «Pacto Verde Europeo,» [En línea]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>.
- [15] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, «Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico,» [En línea]. Available: <https://www.boe.es/eli/es/l/2013/12/26/24/con>.
- [16] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, «Orden IET/2732/2015, de 11 de diciembre,» [En línea]. Available: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2015-13737.
- [17] Enel, «Forward Electricidad,» [En línea]. Available: <https://globaltrading.enel.com/es/productos-instrumentos-financieros/forward-power>.
- [18] OMIE, «EL MERCADO IBERICO DIARIO E INTRADIARIO DE ELECTRICIDAD».
- [19] MITECO, «El Gobierno incrementa la ambición del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima, impulsando la modernización de la economía, la protección del medioambiente, la creación de tejido productivo y empleo, y la mejora de la salud de los ciudadanos,» [En línea]. Available: https://www.miteco.gob.es/va/prensa/ultimas-noticias/2023/06/el_gobierno_incrementalaambiciondelplannacionalintegradodeenergi.html.
- [20] El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), «Renovables eléctricas, cogeneración y residuos,» [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/renovables.html>.
- [21] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, «Real Decreto 413/2014, de 6 de junio,» [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2014-6123>.
- [22] Ministerio de la Presidencia Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, «Real Decreto 960/2020, de 3 de noviembre,» [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2020-13591>.
- [23] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, «Directiva (UE) 2023/2413 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de octubre de 2023, por la que se modifican la Directiva (UE) 2018/2001, el Reglamento (UE) 2018/1999 y la Directiva 98/70/CE en lo que respecta a la promoción de la energía procedente d,» Gobierno de España, 31 Octubre 2023. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2023-81530>.
- [24] UNE Normalización Española, «UNE-EN 16325:2013+A1:2016,» UNE, [En línea]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056162>.
- [25] Enagás GTS, «Procedimiento de Gestión del Sistema de Garantías de Origen de gas procedente de fuentes renovables,» 2022.
- [26] EKOenergy, «¿De qué trata el proceso de actualización de la Norma CEN?,» [En línea]. Available: <https://www.ekoenergy.org/es/what-is-the-cen-standard-process-all-about/>.
- [27] AIB, «Core values,» [En línea]. Available: <https://www.aib-net.org/aib/mission/core-values>.
- [28] AIB, «Mission ° Vision,» [En línea]. Available: <https://www.aib-net.org/aib/mission>.

- [29] AIB, «Activity statistics,» 9 Abril 2024. [En línea]. Available: <https://www.aib-net.org/facts/market-information/statistics/activity-statistics>.
- [30] AIB, «Imposed conditions for trade, expiry and cancellation,» [En línea]. Available: <https://www.aib-net.org/facts/market-information/imposed-conditions-trade-expiry-and-cancellation>.
- [31] Enagás, «Enagás será la entidad responsable del sistema de garantías de origen para los gases renovables,» [En línea]. Available: <https://www.enagas.es/es/sala-comunicacion/actualidad/noticias/sistema-responsable-garantias-origen-gases-renovables/>.
- [32] CNMC, «Procedimientos asociados a Garantías de Origen. Renovables, Cogeneración y Residuos,» [En línea]. Available: <https://sede.cnmc.gob.es/tramites/energia-electricidad/procedimientos-asociados-garantias-de-origen-renovables-cogeneracion>.
- [33] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, «Orden ITC/1522/2007, de 24 de mayo, por la que se establece la regulación de la garantía de origen de la electricidad procedente de fuentes de energía renovables y de cogeneración de alta eficiencia.,» [En línea]. Available: <https://www.boe.es/eli/es/o/2007/05/24/itc1522/con>.
- [34] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, «Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos,» [En línea]. Available: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2014-6123.
- [35] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, «Circular 1/2018, de 18 de abril, de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, por la que se regula la gestión del sistema de garantía de origen de la electricidad procedente de fuentes de energía renovables y de cogeneración de alta eficiencia,» [En línea]. Available: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2018-5717.
- [36] CNMC, «Acreditación de Plan de Ingresos GDO,» [En línea]. Available: <https://sede.cnmc.gob.es/sites/default/files/2020-06/GDO%20Formulario%20AcreditacionPlanIngresos.pdf>.
- [37] A. Blázquez, «Disposición a pagar del cliente. ¿Qué es? ¿Cómo se calcula?,» Novicap, 20 Abril 2023. [En línea]. Available: <https://novicap.com/blog/disposicion-a-pagar-del-cliente/>.
- [38] OECD, «Greening Household Behaviour: Overview from the 2011 Survey,» 2014.
- [39] B. C. Farhar, «Willingness to Pay for Electricity from Renewable Resources: A Review of Utility Market Research,» National Renewable Energy Laboratory, 1999.
- [40] S. Sundt y K. Rehdanz, «Consumer's Willingness to Pay for Green Electricity: A Meta-Analysis of the literature,» Kiel Institute for the World Economy, 2014.
- [41] M. Danne, S. Meier-Sauthoff y O. Musshoff, «Analyzing German consumers' willingness to pay for green electricity tariff attributes: a discrete choice experiment,» Energy, Sustainability and Society volume, 2021.

- [42] G. Gianluca, «Renewable energy and willingness to pay: Evidences from a meta-analysis,» Economics and Policy of Energy and the Environment, 2017.
- [43] H. & K. B. Tadele, «Willingness to pay for green energy sources in the United Arab Emirates (UAE),» International Journal of Renewable Energy Development, United Arab Emirates, 2023.
- [44] C. Umit y A. K. Merih, «Green electricity and Renewable Energy Guarantees of Origin demand analysis for Türkiye,» EconPapers, 2022.
- [45] Microsoft, «2022 Environmental Sustainability Report,» 2022.
- [46] Red Eléctrica , «POTENCIA INSTALADA (MW) | Sistema eléctrico:nacional,» Marzo 2024. [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/datos/generacion/potencia-instalada>.
- [47] Inditex, «Annual Report 2023 Environment,» 2023. [En línea]. Available: https://static.inditex.com/annual_report_2023/en/Environment.pdf.
- [48] «Apple encabeza la lista de empresas con ingresos sostenibles,» *Estrategias de Inversión*, 2023.
- [49] Apple, «Apple Environmental Progress Report 2023,» 2023. [En línea]. Available: https://www.apple.com/environment/pdf/Apple_Environmental_Progress_Report_2023.pdf.
- [50] Climate group RE100, «About us,» [En línea]. Available: <https://www.there100.org/about-us>.
- [51] European Commission, «What is the EU ETS?,» [En línea]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/what-eu-ets_en?prefLang=es.
- [52] S. Ülgen, «A Political Economy Perspective on the EU’s Carbon Border Tax,» 9 May 2023. [En línea]. Available: <https://carnegieeurope.eu/2023/05/09/political-economy-perspective-on-eu-s-carbon-border-tax-pub-89706>.
- [53] European Commission, «Scope of the EU Emissions Trading System,» [En línea]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/scope-eu-emissions-trading-system_en.
- [54] H. Morgado Simões, «Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono,» Junio 2022. [En línea]. Available: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2022/729462/EPRS_ATA\(2022\)729462_ES.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2022/729462/EPRS_ATA(2022)729462_ES.pdf).
- [55] M. C. Calle Aguirre, «Protestas de agricultores: entre competitividad y cumplir el Pacto Verde europeo,» 24 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://www.france24.com/es/programas/medio-ambiente/20240224-protestas-de-agricultores-entre-competitividad-y-cumplir-el-pacto-verde-europeo>.
- [56] J. Skaar, «Analysis of the trade in Guarantees of Origin,» Oslo Economics, 2018.

- [57] Á. Hamburger, «Is guarantee of origin really an effective energy policy tool in Europe? A critical approach,» *Society and Economy*, Diciembre 2019.
- [58] Wikipedia, «Garantía de origen,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Garant%C3%ADa_de_origen#cite_note-10.
- [59] Industry Decarbonization, «How Iceland sold the same Green Electricity twice,» 11 Mayo 2023. [En línea]. Available: <https://industrydecarbonization.com/news/how-iceland-sold-the-same-green-electricity-twice.html>.
- [60] Escandinava de electricidad, «¿Hay países que funcionen al 100% con energía renovable?,» 25 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://escandinavaelectricidad.es/blog/paises-energia-renovable/>.
- [61] Wikipedia, «Energía en Islandia,» 27 Enero 2024. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_en_Islandia.
- [62] AIB, «Regarding the compliance assessment of Landsnet's possible breach of EECS Rules N9.1.1, A2.1.2.,» Press release – 27 April 2023.
- [63] AIB, «Regarding the compliance assessment of Landsnet's possible breach of the EECS Rules,» Press release – 1 June 2023.
- [64] M. Brander, «Renewable Energy Purchasing and the Market-based (Scope 2) Method,» [En línea]. Available: <https://www.bccas.business-school.ed.ac.uk/impact-and-collaboration/renewable-energy-purchasing/>.
- [65] European Commission, «Renewable Energy Directive,» 31 Octubre 2023. [En línea]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en#the-revised-directive.
- [66] K. Dalfest, «Norway unlikely to leave GOs market soon – consultancy,» *Montel News*, 4 Julio 2023.
- [67] Ecohz, «New tax secures Norway's permanence in the Guarantees of Origin scheme,» 20 Enero 2023. [En línea]. Available: <https://www.ecohz.com/news/new-tax-secures-norways-permanence-in-the-guarantees-of-origin-scheme>.
- [68] M. Joinville, «Poland, Bulgaria eye AIB membership,» *Argus*, 11 Octubre 2023. [En línea]. Available: <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2497919-poland-bulgaria-eye-aib-membership>.
- [69] AIB, «AIB NEWS - October 10, 2023,» 10 Octubre 2023. [En línea]. Available: <https://www.aib-net.org/newsletter/web.html?n2g=exu6l9s3-uh8w0x9t-dic>.
- [70] Epex spot, «Pan-European GOs market – spot auction dates online,» [En línea]. Available: <https://www.epexspot.com/en/news/pan-european-gos-market-spot-auction-dates-online>.

- [71] Epex spot, «Successful start of pan-European spot market for Guarantees of Origin,» [En línea]. Available: <https://www.epexspot.com/en/news/successful-start-pan-european-spot-market-guarantees-origin>.
- [72] HUPX, «Hungary's organized guarantees of origin market has been launched,» 14 Junio 2022. [En línea]. Available: <https://hupx.hu/en/articles/hungary-s-organized-guarantees-of-origin-market-has-been-launched/219>.
- [73] HUPX, «Go market: how it works,» [En línea]. Available: <https://hupx.hu/en/go-market/how-it-works#>.
- [74] Naturgy, «Impulsamos innovadores proyectos para desarrollar el gas renovable e inyectarlo en la red de distribución de gas,» [En línea]. Available: <https://www.naturgy.com/conocenos-naturgy/la-energia/gas/gas-renovable/>.
- [75] Gas Renovable, «Energía Renovable: ¿Qué es el gas renovable?,» [En línea]. Available: <https://gasrenovable.com/que-es-el-gas-renovable/>.
- [76] A. Tschernutter, «Gas Guarantees of Origin,» 2019. [En línea]. Available: https://www.aib-net.org/sites/default/files/assets/news-events/events/AIB%20Open%20Markets%20Committee/2019/6_OMC2019%20Gas%20guarantees%20of%20origin%20-%20Angela.pdf.
- [77] AIB, «AIB NEWS - 14 December 2022,» Diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.aib-net.org/newsletter/web.html?n2g=exu6l9s3-h4152jiu-1at5#Austria%20E-Control>.
- [78] AIB, «AIB NEWS - 15 June 2023,» 15 Junio 2023. [En línea]. Available: <https://www.aib-net.org/newsletter/web.html?n2g=exu6l9s3-nqrqj0j-zyo>.
- [79] CNMC, [En línea]. Available: <https://gdo.cnmc.es/CNMC/mostrarPdfexpedicionesPorInstalacion.do>.
- [80] Bester Energy, «Plantas de biomasa más grandes del mundo,» 25 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://bester.energy/plantas-biomasa-mas-grandes-del-mundo/>.
- [81] Confederation suisse, «Energía – datos y cifras,» 7 February 2023. [En línea]. Available: <https://www.eda.admin.ch/aboutswitzerland/es/home/wirtschaft/energie/energie---fakten-und-zahlen.html>.
- [82] Confederation suisse, «Energías renovables,» 19 Marzo 2024. [En línea]. Available: <https://www.eda.admin.ch/aboutswitzerland/es/home/wirtschaft/energie/die-erneuerbaren-energien.html>.
- [83] IEA, «The Netherlands,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/countries/the-netherlands/renewables>.
- [84] International Energy Agency, «Italy 2023 Energy Policy Review,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/italy-2023>.
- [85] Datos Mundial, «Comparación climática,» [En línea]. Available: <https://www.datosmundial.com/comparacion-climatica.php?r1=espana&r2=noruega>.

- [86] EEX, «French Auctions for Guarantees of Origin,» [En línea]. Available: <https://www.eex.com/en/services/registry-services/french-auctions-for-guarantees-of-origin>.
- [87] EEC, «Guarantees of Origin presentation,» [En línea]. Available: <https://www.eex.com/en/search?q=guarantee+origin>.
- [88] EMBER, «European wholesale electricity price data,» 17 Abril 2024. [En línea]. Available: <https://ember-climate.org/data-catalogue/european-wholesale-electricity-price-data/>.
- [89] EMBER Climate, «Data Catalogue,» [En línea]. Available: <https://ember-climate.org/data/data-catalogue/>.
- [90] Eurostat, «Energy supply and use by NACE Rev. 2 activity,» 2024 Abril 22. [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_pefasu/default/table?lang=en.
- [91] Eurostat, «Number of households by household composition, number of children and age of youngest child (1 000),» 24 Abril 2024. [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/lfst_hhnhtych/default/table?lang=en.
- [92] Eurostat, «Enterprises by detailed NACE Rev.2 activity and special aggregates,» 22 Marzo 2024. [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sbs_oww_act/default/table?lang=en.
- [93] Eurostat, «Air emissions accounts by NACE Rev. 2 activity,» 20 Diciembre 2023. [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_ainah_r2/default/table?lang=en.
- [94] Eurostat, «Electricity prices for household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards),» 25 Abril 2024. [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_204/default/table?lang=en.
- [95] M. Gamez, «Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible,» 2024 Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.

ANEXO I – TABLAS Y FIGURAS ADICIONALES

País	Condiciones de Exportación	Condiciones de Importación	Condiciones de Cancelación	Estadísticas de Expedición	Frecuencia de publicación de las Estadísticas	Regla de Validez	Tipos de GdO Aceptadas
Austria	Las GdO subvencionadas no se pueden exportar. Solo se pueden exportar GdO a través del Hub AIB.	Solo posible a través del Hub AIB.	Solo los proveedores de electricidad y gas pueden cancelar GdO para divulgación.	Sí	Mensual	12 meses después del fin del mes de producción	GdO Renovables y No Renovables
Bélgica - Bruselas	No	Importación permitida solo si los procedimientos son similares a los aplicables en Bruselas; en la práctica, solo desde usuarios del Hub AIB.	Solo los proveedores de electricidad pueden cancelar GdO para divulgación.	Sí	Anual	12 meses después del fin del mes de producción	GdO Renovables y de cogeneración de alta eficiencia
Bélgica - Federal	No	Sí	No aplicable	No	No aplicable	12 meses después del fin del mes de producción	No aplicable
Bélgica - Flandes	Solo permitido hacia países del EEE.	Solo permitido desde países del EEE.	No	Sí	Mensual	12 meses después del fin del periodo de producción	GdO Renovables y de alta eficiencia
Bélgica - Valonia	Solo dominios EECS	Solo dominios EECS	Solo proveedores de electricidad licenciados pueden cancelar GdO.	Sí	Trimestral	12 meses después del fin del periodo de producción, con un mínimo de 6 meses de validez después de la emisión	GdO Renovables y No Renovables
Croacia	No	Solo en relación con la importación desde países que no son miembros de AIB.	No	Sí, pero actualmente no disponible	Inmediatamente al emitirse	12 meses después del fin del periodo de producción	GdO Renovables, de Cogeneración de Alta Eficiencia y no Renovables
Chipre	Sí	Sí	Las cancelaciones se realizan al recibir una solicitud de cancelación por parte del personal autorizado.	No (Tarea en curso)	No aplicable	12 meses después del fin del periodo de producción	Solo GdO Renovables
República Checa	Solo en relación con la exportación a países que no son miembros de AIB.	Solo en relación con la importación desde países que no son miembros de AIB.	No	Sí	Diario	12 meses después del fin del periodo de producción	Solo GdO Renovables

Dinamarca	Solo en relación con la exportación a países que no son miembros de AIB.	Solo en relación con la importación desde países que no son miembros de AIB.	No	Sí	Inmediatamente al emitirse	12 meses después del fin del periodo de producción	GdO Renovables, de Cogeneración de Alta Eficiencia y no Renovables
Estonia	No, solo limitación técnica (a través del Hub AIB).	No, solo limitación técnica (a través del Hub AIB).	No	No (Tarea en curso)	No aplicable	12 meses después del fin del periodo de producción	Solo GdO Renovables
Finlandia	No, solo limitación técnica (a través del Hub AIB).	Solo en relación con la importación desde países que no son miembros de AIB.	Los GdO se cancelan para proveedores o usuarios finales y para la conversión de otros portadores de energía.	Sí	Mensual	12 meses después del fin del periodo de producción	GdO Renovables y Nucleares
Francia	Solo en relación con la exportación a países que no son miembros de AIB.	Solo en relación con la importación desde países que no son miembros de AIB.	Los GdO solo pueden ser cancelados por los titulares de cuentas.	Sí	Diario	12 meses después del fin del periodo de producción	Solo GdO Renovables
Alemania	Solo en relación con la exportación a países que no son miembros de AIB.	Solo relación con la importación desde países que no son miembros de AIB.	Los GdO solo pueden ser cancelados por proveedores. El nombre del beneficiario en la declaración de cancelación es voluntario.	Sí	A la vez que las estadísticas de AIB	12 meses después del fin del periodo de producción	Solo GdO Renovables
Islandia	Solo en relación con la exportación a países que no son miembros de AIB.	Solo en relación con la importación desde países que no son miembros de AIB.	Solo los proveedores de electricidad pueden cancelar GdO para divulgación.	Sí	Mensual	12 meses después del fin del periodo de producción	Solo GdO Renovables
Irlanda	Solo en relación con la exportación a países que no son miembros de AIB.	Solo en relación con la importación desde países que no son miembros de AIB.	Solo los proveedores de electricidad pueden cancelar GdO para divulgación	Sí	Inmediatamente al emitirse	18 meses después del fin del periodo de producción	Solo GdO Renovables
Italia	Solo en relación con la exportación a países que no son miembros de AIB.	Solo en relación con la importación desde países que no son miembros de AIB.	Solo los proveedores licenciados pueden cancelar GdO.	Sí	Trimestral	12 meses después del fin del periodo de producción	Solo GdO Renovables
Letonia	No	No	No.	Según el sistema de Grexel.	Inmediatamente al emitirse	12 meses después del fin del periodo de producción	GdO Renovables y de Cogeneración de Alta Eficiencia
Lituania	Participa en AIB solo con esquema de importación.	Solo GdO RES y solo de países de la UE y el EEE.	No	Sí	Inmediatamente al emitirse	18 meses después del fin del periodo de producción	Solo GdO RES

Luxemburgo	Solo en relación con la exportación a países que no son miembros de AIB.	Solo en relación con la importación desde países que no son miembros de AIB.	Los GdO solo pueden ser cancelados por los titulares de cuentas.	Sí	Inmediatamente al emitirse	12 meses después del fin del periodo de producción	GdO Renovables, de Cogeneración de Alta Eficiencia y no Renovables
Países Bajos	Sí	Sí	Solo los titulares de una cuenta de comercio pueden cancelar GdO.	Sí	Mensual	12 meses después del fin del periodo de producción	GdO Renovables y No Renovables
Noruega	No	Importaciones solo posibles a través del Hub AIB y solo para miembros de la UE/EEE.	No	Sí	Inmediatamente al emitirse	12 meses después del fin del periodo de producción	Solo GdO Renovables
Portugal	No	No	Solo los titulares de una cuenta de comercio pueden cancelar GdO.	Sí	Mensual	12 meses después del fin del periodo de producción	GdO Renovables y de Cogeneración de Alta Eficiencia
Eslovenia	No	No	Solo los proveedores de electricidad pueden cancelar GdO.	Sí	Mensual	12 meses después del fin del periodo de producción	Solo GdO Renovables
España	No se pueden exportar GdO subsidiadas	No hay restricciones	No	Sí	Mensual	12 meses después del fin del periodo de producción	GdO Renovables y de Cogeneración de Alta Eficiencia
Suecia	Solo en relación con la exportación a países que no son miembros de AIB.	Solo en relación con la importación desde países que no son miembros de AIB.	No	Sí	Mensual	12 meses después del fin del periodo de producción	GdO Renovables y de Cogeneración de Alta Eficiencia
Suiza	Solo en relación con la exportación a países que no son miembros de AIB.	Solo en relación con la importación desde países que no son miembros de AIB.	Los GdO solo pueden ser cancelados por los titulares de cuentas.	Sí	Diario	12 meses después del fin del periodo de producción	Solo GdO Renovables
Serbia	Solo en relación con la exportación a países que no son miembros de AIB.	El registro no puede aceptar GdO que no sean renovables	Los GdO solo pueden ser cancelados por los titulares de cuentas.	Sí	Inmediatamente al emitirse	12 meses después del fin del periodo de producción	Solo GdO Renovables

Tabla 21. Condiciones impuestas para la negociación, vencimiento y cancelación de GdO por los distintos miembros de AIB.

GdO importadas anualmente por dominio, estructurado por periodo de transacción

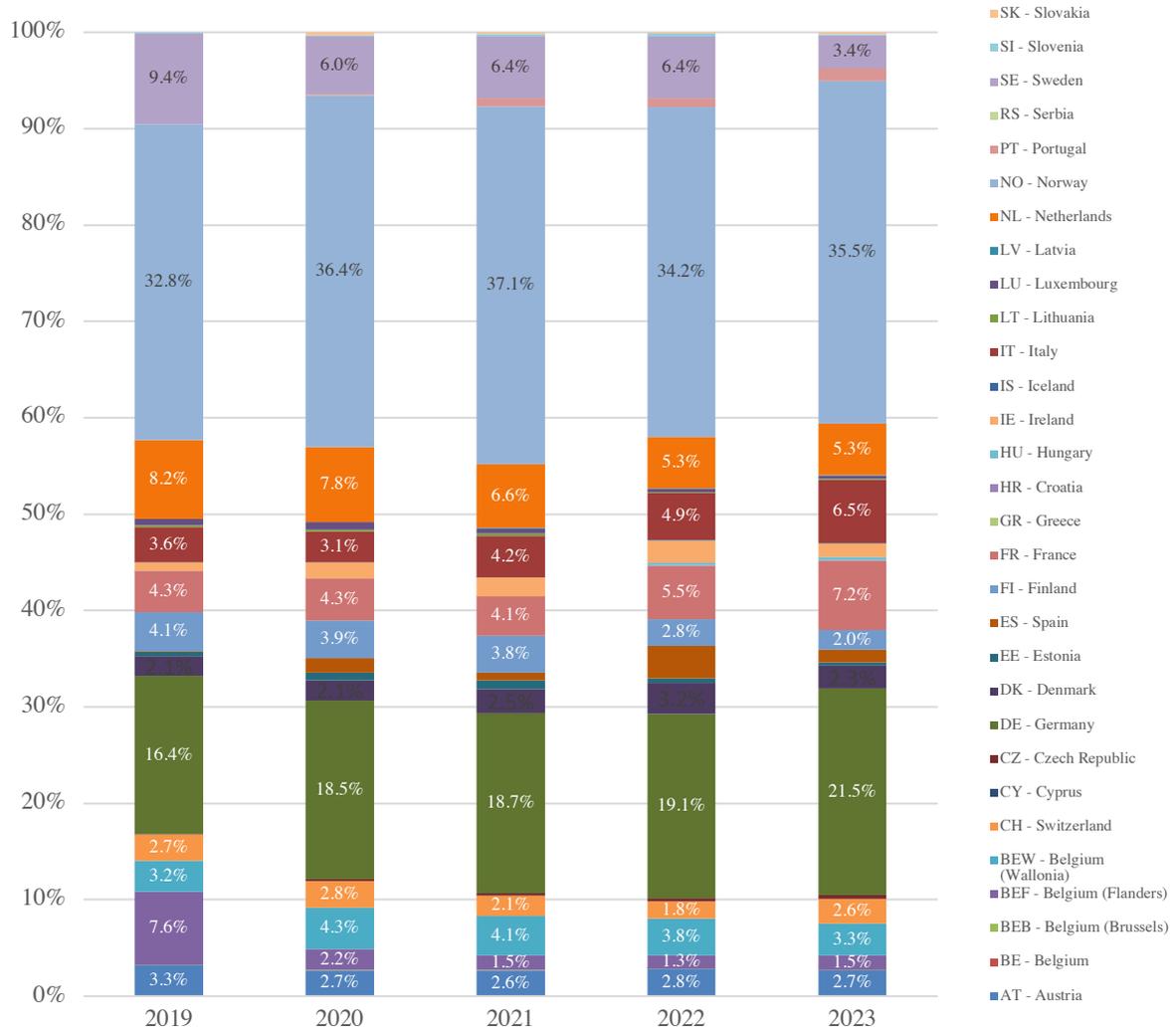


Figura 27. GdO importadas anualmente por dominio, estructurado por periodo de transacción

GdO exportadas anualmente por dominio, estructurado por periodo de transacción

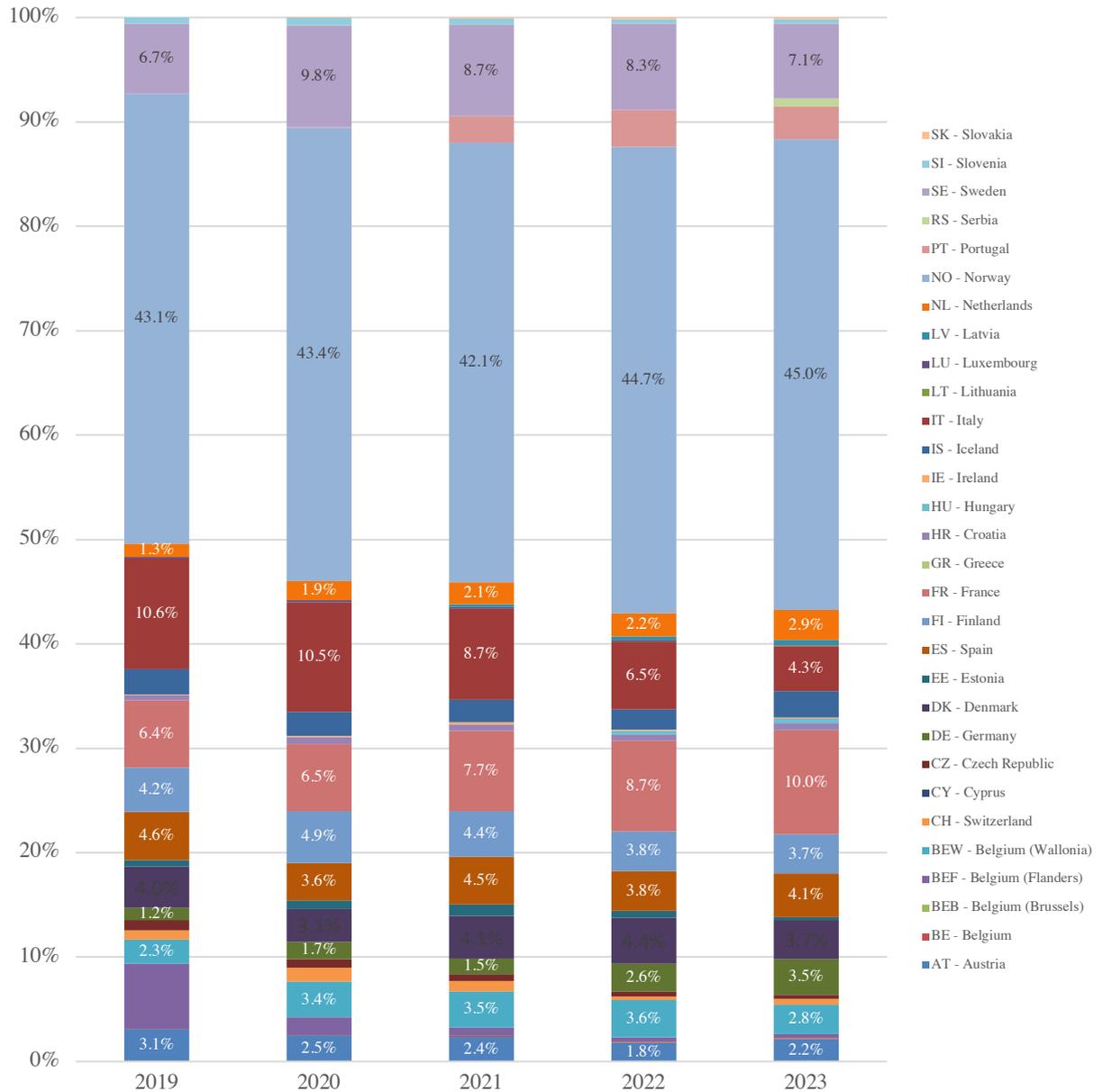


Figura 28. GdO exportadas anualmente por dominio, estructurado por periodo de transacción

GdO canceladas anualmente por dominio, estructurado por periodo de transacción

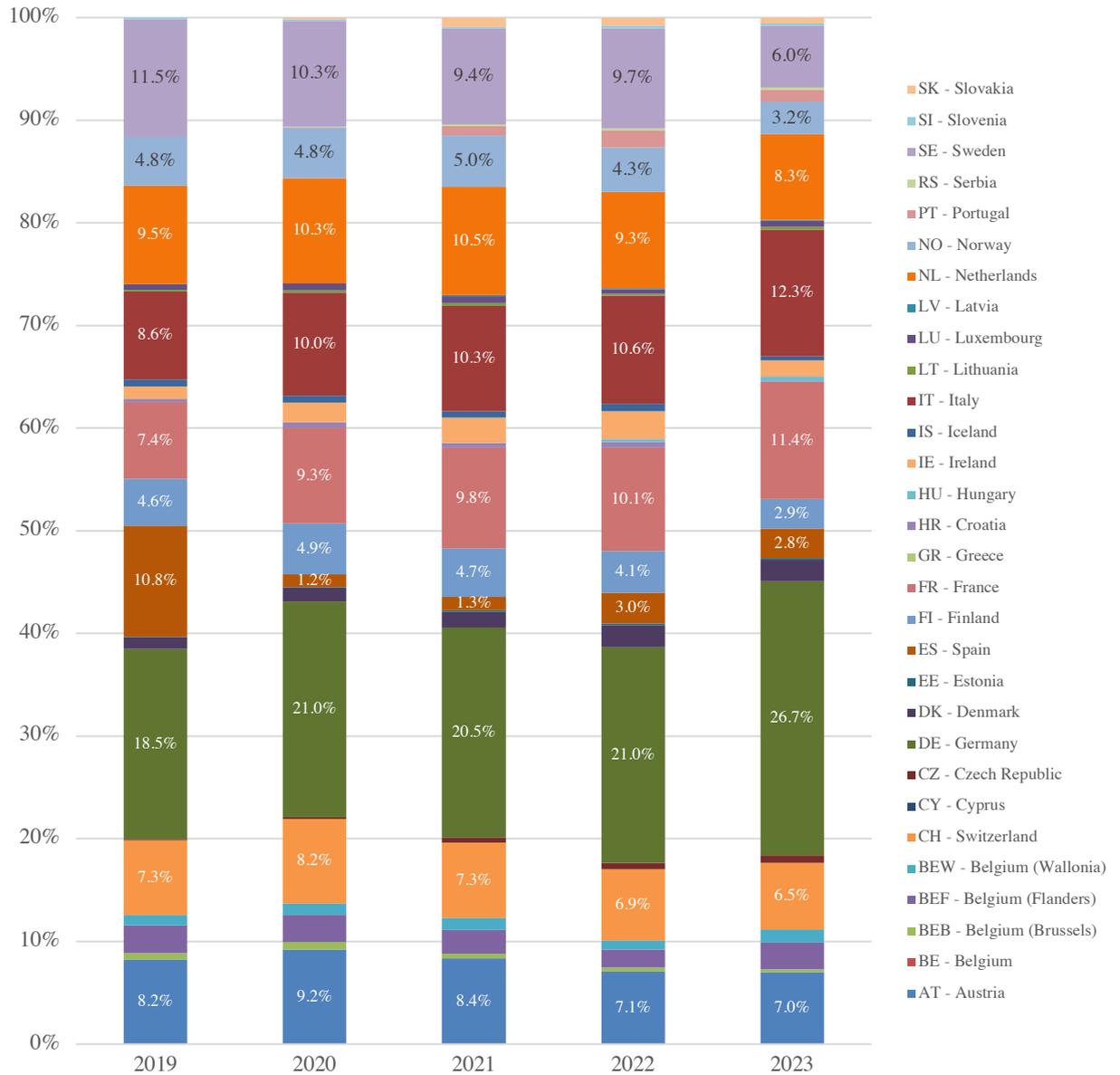


Figura 29. GdO canceladas anualmente por dominio, estructurado por periodo de transacción

Evolución histórica del precio de la electricidad, €/MWh

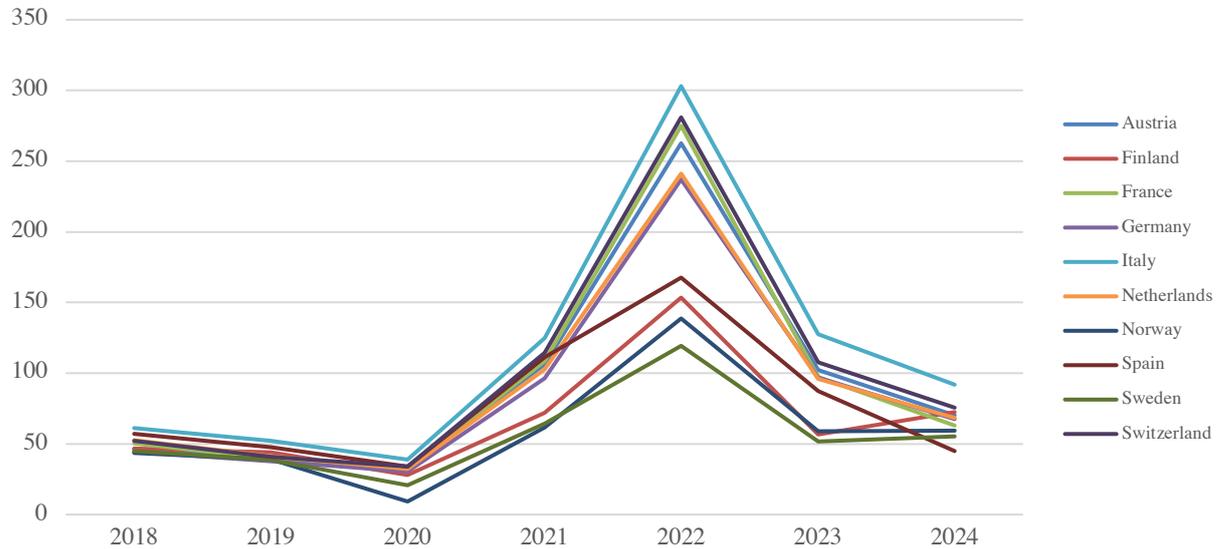


Figura 30. Evolución histórica del precio de la electricidad en los dominios analizados

	Austria	Finlandia	Países Bajos	Noruega	Suecia
Francia	1.01	0.84	1.00	0.68	0.71
España	1.13	0.91	1.10	0.75	0.76
Alemania	1.07	0.88	1.06	0.72	0.75
Italia	0.81	0.66	0.80	0.54	0.56

Tabla 22. Factores de correlación para predecir el precio de la electricidad

	Austria	Finlandia	Países Bajos	Noruega	Suecia
Francia	1.01	0.84	1.00	0.68	0.71
España	1.13	0.91	1.10	0.75	0.76
Alemania	1.07	0.88	1.06	0.72	0.75
Italia	0.81	0.66	0.80	0.54	0.56

Tabla 23. Factores de correlación para predecir la generación hidráulica

	Austria	Finlandia	Países Bajos	Noruega	Suecia
Francia	1.01	0.84	1.00	0.68	0.71
España	1.13	0.91	1.10	0.75	0.76
Alemania	1.07	0.88	1.06	0.72	0.75
Italia	0.81	0.66	0.80	0.54	0.56

Tabla 24. Factores de correlación para predecir la generación solar

	Austria	Finlandia	Países Bajos	Noruega	Suecia
Francia	1.01	0.84	1.00	0.68	0.71
España	1.13	0.91	1.10	0.75	0.76
Alemania	1.07	0.88	1.06	0.72	0.75
Italia	0.81	0.66	0.80	0.54	0.56

Tabla 25. Factores de correlación para predecir la generación eólica

ANEXO II – CÓDIGO

Código para obtener los precios con el modelo desarrollado:

Sub resultados_precios_2()

Dim DAP_demanda(0 To 600, 0 To 1) As Double

Dim j As Integer

Dim i As Integer

Dim z As Integer

Dim temp As Double

Dim temp2 As Double

Dim year As Integer

Dim oferta(0 To 26) As Double

Dim escenario As Integer

Dim precio(0 To 26) As Double

For escenario = 0 To 2

For year = 2024 To 2050

Worksheets("Demanda").Activate

For i = 0 To 600

*DAP_demanda(i, 0) = Cells(i + 6, year - 1992 + 27 * escenario).Value*

DAP_demanda(i, 1) = Cells(i + 6, year - 2019).Value

Next i

For j = 0 To 599

For z = 0 To 599

If (DAP_demanda(z, 0) < DAP_demanda(z + 1, 0)) Then

temp = DAP_demanda(z, 0)

temp2 = DAP_demanda(z, 1)

```
DAP_demanda(z, 0) = DAP_demanda(z + 1, 0)
DAP_demanda(z, 1) = DAP_demanda(z + 1, 1)
DAP_demanda(z + 1, 0) = temp
DAP_demanda(z + 1, 1) = temp2
End If
Next z
Next j

Worksheets("Oferta").Activate
oferta(year - 2024) = Cells(6 * escenario + 5, year - 2022).Value
aux = 0

Do
oferta(year - 2024) = oferta(year - 2024) - DAP_demanda(aux, 1)
If (oferta(year - 2024) > 0) Then
aux = aux + 1
Else
precio(year - 2024) = DAP_demanda(aux, 0)
End If
Loop While (oferta(year - 2024) > 0 And aux < 600)

If (aux = 600) Then
precio(year - 2024) = 0
End If

Worksheets("Resultados").Activate
Cells(3 * escenario + 2, year - 2022).Value = precio(year - 2024)

Next year
Next escenario
End Sub
```

ANEXO III – ALINEAMIENTO DEL PROYECTO CON LOS ODS

Este proyecto, orientado a la predicción del precio de las GdO a largo plazo, está estrechamente relacionado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos en 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas (AG-ONU) para acabar con la pobreza, proteger al planeta y garantizar la prosperidad de todos [95]. En primer lugar, este trabajo está intrínsecamente conectado con el ODS 7: Energía asequible y no contaminante. Entre las metas de este objetivo cabe destacar el aumento de la proporción de la energía renovable en el conjunto de las fuentes energéticas y la promoción de la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias. La comprensión profunda de los fundamentales que configuran el precio de las GdO permitirá dar visibilidad a un sistema cuya finalidad es promover la electricidad procedente de renovables como mecanismo independiente del mercado físico de la electricidad. En otras palabras, este trabajo contribuirá a reducir los problemas de confianza que enfrenta el actual sistema de GdO. Asimismo, la predicción de los precios de las GdO permitirá a los inversores, a los productores y a las comercializadoras disponer de un medio fiable para tomar decisiones informadas, contribuyendo así a superar otro de los grandes retos del mercado, la falta de transparencia.

En segundo lugar, este trabajo está estrechamente relacionado con el ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico. Actualmente, debido al creciente interés en la energía “verde”, el precio de las GdO ha aumentado notablemente. Esto pone de manifiesto la importancia de entender las variables que forman el precio de estos certificados para eliminar los desafíos que atraviesa el mercado y fomentar así su crecimiento. Por otro lado, el proyecto se alinea con el ODS 9: Industria, innovación e infraestructura. La creación de un modelo de previsión de precios basado en fundamentales no solo representa una innovación

en la evaluación del mercado de las GdO, sino que también impulsa el desarrollo de infraestructuras más sostenibles.

La conexión con el ODS 12: Producción y consumo responsables es evidente en el énfasis del proyecto en proporcionar información detallada sobre las variables que determinan el precio de las GdO. Al hacerlo, se facilita a inversores y consumidores la toma de decisiones más informadas y sostenibles, promoviendo prácticas responsables en términos de producción y consumo de energía.

Por último, este trabajo se puede relacionar de forma más indirecta con los ODS 11: Ciudades y comunidades más sostenibles y 13: Acción por el clima. El sistema de GdO proporciona transparencia y trazabilidad a los consumidores sobre la procedencia de la energía que están utilizando. Por tanto, al reducir la falta de transparencia en los precios de la GdO, se promueve un mercado que contribuye a crear ciudades más verdes energéticamente y, en consecuencia, a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, principales responsables del cambio climático.

ANEXO IV – DETALLE DE LOS RESULTADOS

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
Escenario 1 - Hidro	1.89	1.71	1.68	1.67	1.68	1.74	1.74	1.64	1.46	1.35	1.27	1.18	1.20	1.07	1.03	1.00	0.99	0.96	0.90	0.87	0.82	0.81	0.87	0.92	0.95	0.99	1.03
Escenario 1 - Eólica	1.95	1.77	1.73	1.72	1.73	1.79	1.80	1.69	1.50	1.39	1.31	1.21	1.24	1.10	1.06	1.03	1.02	0.98	0.93	0.89	0.85	0.83	0.89	0.94	0.98	1.02	1.06
Escenario 1 - Solar	1.99	1.80	1.77	1.75	1.77	1.83	1.83	1.72	1.53	1.42	1.33	1.24	1.26	1.12	1.08	1.05	1.04	1.00	0.94	0.91	0.86	0.85	0.91	0.96	1.00	1.04	1.08
Escenario 2 - Hidro	1.91	1.55	1.41	1.34	1.31	1.31	1.31	1.39	1.41	1.47	1.53	1.64	1.80	1.84	1.94	2.11	2.18	2.38	2.54	2.73	2.82	2.94	3.19	3.41	3.56	3.65	4.02
Escenario 2 - Eólica	1.97	1.60	1.45	1.38	1.35	1.35	1.34	1.43	1.45	1.51	1.58	1.69	1.85	1.90	1.99	2.17	2.25	2.46	2.61	2.81	2.90	3.02	3.29	3.52	3.66	3.75	4.14
Escenario 2 - Solar	2.01	1.63	1.48	1.40	1.38	1.37	1.37	1.46	1.48	1.54	1.61	1.72	1.89	1.94	2.03	2.22	2.29	2.50	2.67	2.87	2.96	3.08	3.35	3.58	3.73	3.83	4.23
Escenario 3 - Hidro	1.86	1.64	1.56	1.49	1.44	1.44	1.38	1.26	1.08	0.96	0.83	0.72	0.68	0.55	0.33	0.19	0.19	0.18	0.16	0.14	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12
Escenario 3 - Eólica	1.92	1.69	1.60	1.53	1.48	1.48	1.42	1.30	1.12	0.99	0.86	0.75	0.70	0.57	0.34	0.20	0.20	0.19	0.16	0.15	0.13	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12
Escenario 3 - Solar	1.96	1.72	1.63	1.56	1.51	1.51	1.45	1.32	1.14	1.01	0.87	0.76	0.71	0.58	0.35	0.20	0.20	0.19	0.16	0.15	0.14	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Escenario 4 - Hidro	1.64	1.64	1.53	1.41	1.27	1.30	1.22	1.26	1.16	1.14	1.16	1.13	1.20	1.20	1.19	1.19	1.19	1.23	1.27	1.31	1.30	1.36	1.46	1.52	1.57	1.62	1.64
Escenario 4 - Eólica	1.69	1.69	1.58	1.45	1.31	1.34	1.26	1.30	1.20	1.18	1.20	1.16	1.24	1.24	1.22	1.22	1.23	1.27	1.31	1.34	1.34	1.40	1.50	1.57	1.62	1.66	1.69
Escenario 4 - Solar	1.72	1.72	1.61	1.48	1.34	1.36	1.28	1.33	1.22	1.20	1.22	1.18	1.26	1.26	1.25	1.25	1.25	1.30	1.34	1.37	1.36	1.42	1.53	1.60	1.65	1.70	1.72

Tabla 26. Precios de las GdO para los 4 escenarios principales

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
Escenario 1	1.89	1.71	1.68	1.67	1.68	1.74	1.74	1.64	1.46	1.35	1.27	1.18	1.20	1.07	1.03	1.00	0.99	0.96	0.90	0.87	0.82	0.81	0.87	0.92	0.95	0.99	1.03
Condiciones favorables	0.82	0.66	0.60	0.57	0.55	0.54	0.53	0.47	0.38	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12	0.09	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.11	0.12	0.13
Condiciones adversas	4.60	4.86	4.47	4.37	4.27	4.32	4.16	3.92	3.70	3.47	3.18	3.00	3.02	2.88	2.79	2.74	2.68	2.62	2.47	2.33	2.24	2.20	2.30	2.43	2.48	2.58	2.62

Tabla 27. Precios de las GdO para el escenario 1 y los dos subescenarios con condiciones meteorológicas adversas y favorables

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
Escenario 2	1.91	1.55	1.41	1.34	1.31	1.31	1.31	1.39	1.41	1.47	1.53	1.64	1.80	1.84	1.94	2.11	2.18	2.38	2.54	2.73	2.82	2.94	3.19	3.41	3.56	3.65	4.02
Condiciones favorables	0.88	0.51	0.34	0.13	0.13	0.13	0.07	0.08	0.11	0.14	0.17	0.18	0.21	0.21	0.22	0.36	0.63	0.80	0.85	0.95	1.06	1.12	1.28	1.48	1.59	1.63	1.74
Condiciones adversas	4.66	4.60	4.38	4.24	4.00	3.90	3.82	3.94	3.97	3.97	4.08	4.19	4.48	4.51	4.65	4.91	5.03	5.25	5.15	5.73	5.68	5.83	6.14	6.49	6.87	7.02	7.33

Tabla 28. Precios de las GdO para el escenario 2 y los dos subescenarios con condiciones meteorológicas adversas y favorables

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
Escenario 3	1.86	1.64	1.56	1.49	1.44	1.44	1.38	1.26	1.08	0.96	0.83	0.72	0.68	0.55	0.33	0.19	0.19	0.18	0.16	0.14	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12
Condiciones favorables	0.82	0.61	0.55	0.48	0.45	0.44	0.41	0.25	0.11	0.10	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Condiciones adversas	4.60	4.77	4.21	3.96	3.83	3.74	3.49	3.16	2.86	2.52	2.37	2.18	2.06	1.82	1.65	1.58	1.40	1.34	1.21	1.11	1.02	0.97	0.95	0.96	0.96	0.94	0.92

Tabla 29. Precios de las GdO para el escenario 3 y los dos subescenarios con condiciones meteorológicas adversas y favorables

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
Escenario 4	1.64	1.64	1.53	1.41	1.27	1.30	1.22	1.26	1.16	1.14	1.16	1.13	1.20	1.20	1.19	1.19	1.19	1.23	1.27	1.31	1.30	1.36	1.46	1.52	1.57	1.62	1.64
Condiciones favorables	1.03	0.94	0.83	0.74	0.65	0.60	0.50	0.47	0.38	0.22	0.13	0.13	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.31	0.36	0.42	0.46	0.48	0.50	0.51	0.54	0.56
Condiciones adversas	3.34	3.49	3.14	3.06	2.78	2.72	2.53	2.52	2.41	2.39	2.41	2.44	2.67	2.71	2.76	2.82	2.87	2.95	2.90	2.93	2.97	3.23	3.40	3.53	3.58	3.70	3.75

Tabla 30. Precios de las GdO para el escenario 4 y los dos subescenarios con condiciones meteorológicas adversas y favorables