COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Valoración de opciones financieras en trading de energía y aplicación a contratos de gas natural

Autor: Juan Castillo Sotillo

Director: Nombre Apellido1 Apellido2

Co-Director: Nombre Apellido1 Apellido2

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

"VALORACIÓN DE OPCIONES FINANCIERAS EN TRADING DE ENERGÍA. APLICACIÓN A CONTRATOS DE GAS NATURAL."

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2024/25 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.: Juan Castillo Sotillo Fecha: 31/08/2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Daniel Fernández Alonso Fecha: 31/08/2025

Valoración de opciones financieras en trading de energía y aplicación a contratos de gas natural

Autor: Juan Castillo

Director: Daniel Fernández

Entidad: Universidad Pontificia Comillas ICAI

Resumen del Trabajo

El trabajo comienza explicando y desarrollando el funcionamiento de los contratos internacionales de gas natural, su estructuración, las cláusulas más determinantes de los contratos y la fijación del precio. Después se ha abordado toda la teoría de derivados financieros, con más profundidad en las opciones financieras. Luego se han usado métodos de valoración de opciones como Black-Scholes y Monte Carlo para obtener precios de opciones financieras de gas natural y gas natural licuado (GNL). Los activos subyacentes para los que se han calculado las opciones son el gas natural Henry Hub, el "Title Transfer Facility (TTF)" y GNL referenciado a el mercado asiático (JMK). Una vez se han obtenido las opciones con sus primas, se procedió a observar el rendimiento de esas opciones a fecha actual o vencimiento, haciendo una serie de suposiciones necesarias. Asimismo, se revisarán las ventajas y limitaciones inherentes a estas metodologías, proponiendo posibles líneas de investigación que contribuyan a perfeccionar la precisión del análisis.

1. Introducción

Este trabajo aborda el estudio de la valoración de opciones financieras en el ámbito del trading de energía, con una aplicación específica a los contratos de gas natural y gas natural licuado (GNL). Se parte de un análisis del negocio del gas y de las particularidades de su mercado internacional, caracterizado por una elevada volatilidad y una fuerte influencia de factores geopolíticos y regulatorios. Se profundiza en los contratos internacionales de gas natural y GNL. A continuación, se explica los principales derivados financieros utilizados en el sector, entre ellos opciones, forwards, futuros y swaps, haciendo hincapié en el papel de las opciones como instrumentos de cobertura y especulación. El trabajo desarrolla la valoración de opciones mediante los modelos de Black-Scholes-Merton en su versión Black-76 y el método de simulación de Monte Carlo, aplicados a diferentes índices internacionales de referencia como Henry Hub, TTF y JKM. El objetivo es obtener precios de primas de opciones financieras y contrastar esos valores con precios de gas futuros y analizar la coherencia de los resultados obtenidos. Se pretende comprobar si los métodos clásicos de valoraciones de opciones se amoldan correctamente al mercado de gas natural.

2. Objetivo

El objetivo del proyecto consiste en explicar la teoría y funcionamiento de tanto los contratos de internacionales de gas como del trading de energía, comprender la estructura de centros de intercambio de gas ("hubs"), su relación con los principales índices de gas y su papel en la fijación de precios en contratos internacionales de gas natural y GNL. Profundizar en la teoría de derivados financieros con más intensidad en las opciones

financieras. Por último, aplicar la teoría de derivados en el mercado de gas y GNL para obtener datos sobre hipotéticas opciones financieras de gas y GNL y estudiar la viabilidad y coherencia de estas. Además de probar la robustez de los clásicos método de valoración de opciones con activos subyacentes de gas natural y GNL. También se busca comparar la diferencia entre el activo spot de gas natural con el futuro. La mayoría de las operaciones en el mercado de materias primas es mediante futuros. La menor volatilidad y facilidad de previsión de precios y costes los pone por encima del spot. En este trabajo se ha querido comprobar cómo se comportan ambos activos con las opciones financieras. Se han encontrado diferencias, y como se podía intuir, por la menor volatilidad, las opciones de futuros resultaron ser mejores.

3. Métodos de cálculo

Para calcular las primas de las opciones financieras se ha recurrido a métodos tradicionales, Black-Scholes y Monte Carlo. Para poder aplicar las fórmulas y realizar simulaciones, se ha tenido que calcular y determinar todas las variables involucradas. La más crítica era la volatilidad, además de ser una variable fundamental en el cálculo, suponía bastante trabajo calcularla. Para mantener el modelo medianamente sencillo se tomaron datos históricos hasta los 5 años (en algunos casos fueron solo 2 años), y en cifras mensuales. Una vez obtenidos los datos se usaron los rendimientos logarítmicos para encontrar la volatilidad. Una vez obtenida la volatilidad faltaba por determinar la tasa libre de riesgo, la cual se escogió eligiendo el rendimiento del bono del país de referencia del activo subyacente. Para no sesgar los resultados, se usaron rangos de precios de ejercicio (strike) con los que se obtuvieron graficas de precio de opciones en función del strike. Se ha aplicado ambos métodos a todos los casos, y no se han encontrado diferencias muy marcadas entre ellos. Como herramientas de cálculo se ha usado Excel y Matlab. Como fuente de datos se recurrió a cotizaciones de años anteriores de diferentes activos de gas.

4. Resultados

Los resultados obtenidos permiten analizar la coherencia de las primas calculadas, su relación con las características de los mercados de gas y la viabilidad de distintas estrategias de cobertura.

Se ha observado que las opciones con activos subyacentes futuros tienen una prima mucho más atractiva que las de subyacente spot. Los activos futuros poseen una volatilidad menor a la del spot, lo que provoca que las opciones con futuros como activos subyacentes tengan primas más baratas.

Activo	Tipo	Strike	Tiempo	Prima	Variación Activo
Spot GNL	Put	$ 14,96	1	$ 5,51	-27,08%
Spot Henry Hub	Call	$ 2,02	1	$ 1,38	12,62%
Spot TTF	Call	€ 32,12	1	€ 14,93	24,51%
Futuro GNL	Put	$ 15,13	1	$ 2,24	-3,09%
Futuro Henry Hub	Put	$ 3,61	1	$ 0,48	-0,18%
Futuro TTF	Put	€ 44,90	1	€ 7,29	-3,67%

En la tabla se muestran las opciones más tractivas de cada activo estudiado. En primer lugar, no se destaca ninguna anomalía en los resultados, todas las primas se encuentran dentro de un rango razonable. Para poder hacer una comparación entre opciones igualada,

se añade la última columna, la cual indica el porcentaje en el que tendría que variar el precio del activo a vencimiento, para que la opción resultase lucrativa. Analizando los valores de la tabla se comprueba que los porcentajes de las opciones de los futuros es altamente menor que la de sus activos spot. Esto indica que las opciones de futuros son más viables y propensas de generar beneficios.

Aunque las primas obtenidas tienen coherencia con la teoría, las opciones con subyacente spot se descartan para la práctica de estrategias de cobertura. En cambio, las opciones con subyacente futuro son una gran opción para la mitigación de riesgo.

5. Conclusiones

Finalmente, se concluye que las opciones financieras sobre gas natural constituyen una herramienta de gran utilidad para mitigar riesgos de precio y diseñar posiciones más eficientes en contextos de alta incertidumbre. Las primas calculadas entran dentro de un rango aceptable, no se detecta ningún dato fuera de lo normal. Es cierto que las primas de opciones de activos spot resultan algo más caras de lo esperado, pero se debe a la alta volatilidad. Las opciones obtenidas, especialmente las de activos futuros, podrían implementarse en estrategias de cobertura en contratos de gas. Además, se ha hecho una pequeña comparación con algunas opciones financieras de gas natural cotizadas en el "NYMEX" con sus respectivas opciones calculadas en el trabajo, y las primas estaban cerca de las cotizadas salvo en alguna excepción. Sobre todo, se encontró mayor diferencia entre las opciones de venta, las calculadas resultaron ser más baratas. Las diferencias, como se ha explicado en el trabajo, se pueden deber principalmente a la diferencia temporal.

6. Fuentes

CME Group. (s.f.). NYMEX - CME Group.

Intercontinental Exchange. (s.f.). Markets & data.

Investing.com. (s.f.). Investing.com - Stock Market Quotes & Financial News.

Naturgy Energy Group S.A. (s.f.). Home - Naturgy.

Federal Reserve Bank of St. Louis. (s.f.). FRED Economic Data.

Valuation of financial options in energy trading and application to natural gas contracts

Author: Juan Castillo

Director: Daniel Fernández

Entity: Universidad Pontificia Comillas ICAI

Paper Summary

This paper begins by explaining and developing the functioning of international natural gas contracts, their structuring, the most crucial clauses of the contracts, and pricing. The entire theory of financial derivatives is then addressed, with a more in-depth analysis of financial options. Option pricing methods such as Black-Scholes and Monte Carlo are then used to obtain prices for financial options on natural gas and liquefied natural gas (LNG). The underlying assets for which the options were calculated are Henry Hub natural gas, the Title Transfer Facility (TTF), and LNG referenced to the Asian market (JMK). Once the options and their premiums were obtained, the performance of these options was observed at the current date or at expiration, making a series of necessary assumptions. The advantages and limitations inherent to these methodologies are also reviewed, and possible lines of research are proposed that could contribute to improving the accuracy of the analysis.

1. Introduction

This paper addresses the study of financial option pricing in the energy trading space, with a specific application to natural gas and liquefied natural gas (LNG) contracts. It begins with an analysis of the gas business and the specifics of its international market, characterized by high volatility and a strong influence from geopolitical and regulatory factors. It delves into international natural gas and LNG contracts. It then explains the main financial derivatives used in the sector, including options, forwards, futures, and swaps, emphasizing the role of options as hedging and speculation instruments. The paper develops option pricing using the Black-Scholes-Merton model (Black-76 version) and the Monte Carlo simulation method, applied to various international benchmark indices such as Henry Hub, TTF, and JKM. The objective is to obtain financial option premium prices and compare these values with future gas prices, thus analyzing the consistency of the results obtained. The aim is to test whether traditional option pricing methods are appropriately suited to the natural gas market.

2. Objective

The project's objective is to explain the theory and operation of both international gas contracts and energy trading, understand the structure of gas exchange centers ("hubs"), their relationship with the main gas indices, and their role in pricing international natural gas and LNG contracts. It also delves into the theory of financial derivatives, focusing more on financial options. Finally, it applies derivatives theory to the gas and LNG market to obtain data on hypothetical financial options for gas and LNG and study their viability and consistency. It also tests the robustness of traditional option pricing methods with underlying natural gas and LNG assets. It also seeks to compare the difference between the spot natural gas asset and the futures. Most trading in the commodities market is done

through futures. Their lower volatility and ease of forecasting prices and costs put them above spot options. In this work, we sought to test how both assets behave with financial options. Differences were found, and as expected, due to the lower volatility, futures options turned out to be better.

3. Calculation Methods

To calculate the financial option premiums, traditional methods, Black-Scholes and Monte Carlo, were used. To apply the formulas and perform simulations, all the variables involved had to be calculated and determined. The most critical was volatility; in addition to being a fundamental variable in the calculation, it required considerable work to calculate it. To keep the model relatively simple, historical data were taken up to 5 years (in some cases, only 2 years), and in monthly figures. Once the data were obtained, logarithmic returns were used to calculate volatility. Once the volatility was obtained, the risk-free rate needed to be determined, which was chosen by selecting the bond yield of the country of reference for the underlying asset. To avoid biasing the results, strike price ranges were used to obtain option price graphs based on the strike. Both methods were applied to all cases, and no significant differences were found between them. Excel and Matlab were used as calculation tools. Quotes from previous years for various gas assets were used as data sources.

4. Results

The results obtained allow us to analyze the consistency of the calculated premiums and their relationship with the characteristics.

It has been observed that options with future underlying assets have a much more attractive premium than those with spot underlying assets. Future assets have lower volatility than spot assets, which means that options with futures as underlying assets have cheaper premiums.

Asset	Type	Strike	Time	Premium	Asset variation
Spot GNL	Put	$ 14,96	1	$ 5,51	-27,08%
Spot Henry Hub	Call	$ 2,02	1	$ 1,38	12,62%
Spot TTF	Call	€ 32,12	1	€ 14,93	24,51%
Future GNL	Put	$ 15,13	1	$ 2,24	-3,09%
Future Henry Hub	Put	$ 3,61	1	$ 0,48	-0,18%
Future TTF	Put	€ 44,90	1	€ 7,29	-3,67%

The table shows the most attractive options for each asset studied. First, no anomalies are noted in the results; all premiums fall within a reasonable range. To allow for a balanced comparison between options, the last column indicates the percentage by which the asset's price would have to change at maturity for the option to be profitable. Analyzing the values in the table, it is evident that the percentages for futures options are significantly lower than those for spot assets. This indicates that futures options are more viable and likely to generate profits.

Although the premiums obtained are consistent with the theory, options with spot underlyings are ruled out for hedging strategies. In contrast, options with future underlyings are a great option for risk mitigation.

5. Conclusions

Finally, it is concluded that financial options on natural gas are a very useful tool for mitigating price risks and designing more efficient positions in context of high uncertainty. The calculated premiums fall within an acceptable range; no abnormal data were detected. It is true that premiums for spot asset options are somewhat higher than expected, but this is due to high volatility. The options obtained, especially those for future assets, could be implemented in hedging strategies for gas contracts. Furthermore, a brief comparison was made with some natural gas financial options listed on the NYMEX and their respective options calculated in the study, and the premiums were close to those quoted with a few exceptions. The differences, as explained in the study, may be mainly due to the timing difference.

6. Sources

CME Group. (s.f.). NYMEX - CME Group.

Intercontinental Exchange. (s.f.). Markets & data.

Investing.com. (s.f.). Investing.com - Stock Market Quotes & Financial News.

Naturgy Energy Group S.A. (s.f.). Home - Naturgy.

Federal Reserve Bank of St. Louis. (s.f.). FRED Economic Data.

Índice

1. Introducción	Pg. 2
2. Negocio del gas natural	Pg. 3-7
3. Trading de energía	Pg. 8-18
4. Derivados financieros	Pg. 19-34
5. Derivados financieros en trading de gas natural	Pg. 35-56
6. Conclusión	Pg. 57
7. Anexo	Pg. 58-68

1. Introducción

La creciente volatilidad de los mercados energéticos y la importancia estratégica del gas natural en el actual proceso de transición energética han impulsado el uso de instrumentos financieros que permitan gestionar la incertidumbre de precios y asegurar la rentabilidad de las operaciones. El gas natural, además de ser un recurso clave en la generación eléctrica y en la industria, se ha convertido en un activo altamente sensible a factores geopolíticos, regulatorios y de mercado (oferta y demanda), lo que incrementa la necesidad de mecanismos de cobertura eficaces.

Dentro de este contexto, los derivados financieros ocupan un lugar central al ofrecer herramientas tanto para la cobertura de riesgos como para la especulación. Entre ellos, las opciones destacan por su flexibilidad y su capacidad de adaptación a distintos escenarios de mercado. Sin embargo, su valoración resulta compleja y depende de múltiples factores, entre los que se incluyen la volatilidad, los tipos de interés y la naturaleza del contrato subyacente.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la valoración de opciones financieras aplicadas al mercado del gas natural y del GNL, tomando como referencia tres indices de gas internacionales fundamentales: el Henry Hub en Estados Unidos, el TTF en Europa y el GNL referenciado al JKM en Asia. Para ello se emplean dos métodos de valoración ampliamente reconocidos, el modelo Black-Scholes-Merton en su versión Black-76 y el método de Monte Carlo, que permiten comparar resultados y evaluar su aplicabilidad en distintos escenarios. Además de estudiar la coherencia de los cálculos obtenidos, se plantean ejemplos de posibles estrategias de cobertura y se discuten sus implicaciones prácticas en la gestión del riesgo.

La investigación se estructura en varios apartados que abarcan desde la descripción del negocio del gas natural y el funcionamiento del trading de energía hasta el análisis de los principales derivados financieros y su aplicación directa al gas. Con este enfoque se busca no solo profundizar en la teoría de las opciones, sino también aportar una visión práctica sobre su utilidad en un mercado energético caracterizado por la inestabilidad y la necesidad de una gestión financiera avanzada.

2. Negocio del gas natural

2.1. Gas natural

El gas natural (GN) es un combustible fósil producido por la descomposición anaeróbica de restos de animales y plantas. Está constituido por metano principalmente. También presenta contenido en etano, propano, butanos y pentanos.

2.2. Fases del negocio

Upstream:

El término upstream hace referencia al conjunto de actividades que abarcan desde la búsqueda inicial del gas natural hasta su extracción efectiva del subsuelo. Esta fase constituye el primer eslabón de la cadena de valor en la industria del gas y es, además, la más intensiva tanto en capital como en riesgo. Los desafíos en esta etapa son múltiples y variados: desde la incertidumbre geológica asociada con la existencia o no del recurso, hasta los elevados costos que implica perforar pozos exploratorios, instalar la infraestructura productiva y cumplir con las exigencias medioambientales y técnicas.

El proceso comienza con la exploración, que incluye la identificación de posibles yacimientos de gas natural mediante estudios geológicos, geofísicos y sísmicos. Si los resultados son prometedores, se procede a la perforación exploratoria, en la cual se excavan pozos piloto con el objetivo de confirmar la presencia, calidad y volumen del recurso. Una vez comprobada la viabilidad comercial del yacimiento, se pasa a la fase de desarrollo de campos, donde se construyen instalaciones permanentes como plataformas, sistemas de recolección, estaciones de compresión y caminos de acceso. Finalmente, en la etapa de producción, se extrae el gas natural de forma continua, separando impurezas y enviándolo a las estaciones de procesamiento y transporte.

Midstream:

El segmento conocido como midstream se ocupa de todas las operaciones que permiten trasladar el gas natural desde los campos de producción hasta los centros de consumo o transformación industrial. Se trata de un componente fundamental de la cadena, ya que garantiza que el gas, una vez extraído, pueda ser entregado de manera eficiente, segura y en condiciones comerciales adecuadas.

Esta fase comprende el transporte, que suele realizarse principalmente a través de gasoductos, aunque en algunos casos también se utilizan camiones cisterna, especialmente en regiones remotas o con baja infraestructura. A lo largo del trayecto, es necesario comprimir el gas en distintos puntos para mantener la presión del sistema y asegurar su flujo continuo. El gas también puede requerir un procesamiento adicional, que incluye la eliminación de contaminantes o el ajuste de su composición para cumplir con los estándares regulatorios y las especificaciones del mercado. En ocasiones, se recurre a almacenamiento temporal del gas en instalaciones subterráneas o en tanques especiales, como medida de seguridad o para equilibrar la oferta y la demanda.

Downstream:

La fase downstream engloba todas las actividades relacionadas con la entrega final del gas natural al consumidor. En esta etapa, el producto ya ha sido tratado y está listo para ser distribuido o transformado según las necesidades del mercado. El gas puede ser comercializado directamente a grandes consumidores, como industrias manufactureras, plantas de generación eléctrica o flotas de transporte que operan con gas natural vehicular. En otros casos, se licua para convertirlo en gas natural licuado (GNL), lo que facilita su transporte a largas distancias por vía marítima (en barcos), y luego se regasifica en terminales especiales para ser introducido nuevamente a la red de distribución. En las zonas urbanas, se establece una red de distribución doméstica, que lleva el gas a hogares, comercios y pequeñas industrias. Asimismo, una parte del gas puede destinarse a procesos petroquímicos, dando origen a productos como el metanol, fertilizantes, plásticos u otros derivados de alto valor agregado.

Comparación entre Upstream, Midstream y Downstream:

Las tres etapas de la cadena de valor del gas natural presentan características bien diferenciadas. El upstream implica los mayores niveles de inversión y riesgo, debido a la exploración y producción de recursos no siempre garantizados. El midstream, si bien también requiere una infraestructura significativa, está más enfocado en la logística y presenta un riesgo operativo medio. Finalmente, el downstream es la parte más cercana al usuario final, donde los riesgos técnicos son menores y las inversiones tienden a ser más controladas, aunque estratégicamente importantes por su impacto en el suministro energético y el desarrollo económico.

2.3. Transporte de gas natural

El transporte de gas natural es una parte crucial en la cadena de suministro del sector energético. Forma parte de la etapa midstream dentro del sector de gas. Existen dos maneras de transportar gas natural, en estado gaseoso o en estado líquido (GNL), incluso se puede llegar a transportar en forma de gas natural comprimido (GNC) si las distancias son pequeñas.

El método más común para transportar gas natural en estado gaseoso es a través de gasoductos (pipelines). Los gaseoductos son conductos de acero de gran diámetro que operan a altas presiones, generalmente entre 70 y 100 bares. El gas fluye a lo largo de los gasoductos gracias al impulso generado por estaciones de compresión ubicadas estratégicamente. Los gasoductos pueden extenderse por miles de kilómetros y cruzar diferentes tipos de terreno, incluidos fondos marinos mediante gasoductos submarinos. Algunos de los ejemplos más conocidos de grandes gasoductos incluyen el Nord Stream (entre Rusia y Alemania), el Trans-Sahara Gas Pipeline (que conecta Nigeria con Europa), y el Gasoducto del Sur (que une Argentina con Brasil).

Sin embargo, cuando las distancias a cubrir son demasiado grandes o no existen infraestructuras de gasoductos, se recurre al transporte de gas natural licuado. Este proceso comienza con la licuefacción del gas natural, que implica enfriarlo a una temperatura de –162ºC. A esta temperatura, el gas se convierte en líquido y su volumen se

reduce aproximadamente 600 veces, lo que facilita su transporte. El GNL se carga en buques metaneros especialmente diseñados con tanques criogénicos que mantienen la baja temperatura durante todo el viaje. Al llegar a su destino, el gas es descargado en terminales de regasificación donde vuelve a su estado gaseoso para ser inyectado en la red de distribución.

Además de los métodos a gran escala, existe el transporte terrestre de gas natural en pequeña escala, mediante camiones o trenes. En este caso, el gas se transporta comprimido o en forma de GNL si se requiere mayor densidad energética. Este tipo de transporte es habitual en zonas remotas, con baja densidad de población o donde no se justifica económicamente la construcción de gasoductos.

La infraestructura necesaria para el transporte de gas incluye plantas de licuefacción en los países exportadores, buques metaneros con tanques criogénicos, plantas de regasificación en los países importadores, redes de gasoductos troncales y de distribución, y estaciones de compresión. La elección del método de transporte depende de varios factores como la distancia entre el productor y el consumidor, el volumen de gas a trasladar, las condiciones geográficas, el contexto geopolítico, la inversión disponible y la flexibilidad deseada en los contratos de suministro.

2.4. Regulaciones en el sector

El sector del gas natural está sujeto a un conjunto amplio y complejo de regulaciones que tienen como objetivo garantizar la seguridad, la eficiencia, la transparencia y la sostenibilidad del suministro y consumo de este recurso. Estas regulaciones varían según el país o la región, pero generalmente comparten ciertos principios y objetivos comunes.

En primer lugar, se establecen normativas para las actividades de exploración y producción, que incluyen requisitos ambientales, técnicos y económicos. Las empresas que desean operar en esta etapa deben obtener licencias o concesiones por parte del Estado, el cual conserva la propiedad de los recursos naturales. Estas licencias suelen estar sujetas a evaluaciones de impacto ambiental, estudios de viabilidad y compromisos de inversión. Además, se exige a las compañías que cumplan con estándares técnicos de seguridad, protección del medio ambiente y responsabilidad social.

En la fase de transporte y procesamiento del gas natural, las regulaciones están orientadas principalmente a garantizar la integridad de la infraestructura, como los gasoductos y plantas de procesamiento, y a asegurar la continuidad y calidad del servicio. Los organismos reguladores suelen establecer tarifas de transporte, condiciones de acceso abierto a las redes y obligaciones de mantenimiento y seguridad. Asimismo, se regula la operación de estaciones de compresión, plantas de licuefacción y regasificación, así como los sistemas de almacenamiento.

En cuanto al downstream, es decir, la distribución y comercialización del gas, la regulación se enfoca en proteger al consumidor final. Esto implica supervisar las tarifas que pagan los usuarios residenciales, comerciales e industriales, así como velar por la calidad y continuidad del servicio. Los entes reguladores también intervienen para fomentar la competencia en el mercado, prevenir prácticas monopólicas y promover la expansión de la infraestructura de distribución, especialmente en zonas rurales o de bajo desarrollo económico. Además de estas áreas específicas, existen otras regulaciones relacionadas

con la sostenibilidad ambiental, la eficiencia y la transición energéticas. Los gobiernos suelen establecer metas de reducción de emisiones, incentivos para la conversión a gas natural y estándares de eficiencia para equipos y procesos. También se exige a las empresas que reporten sus emisiones de gases de efecto invernadero y desarrollen planes de gestión ambiental.

En resumen, la regulación del sector del gas natural es un componente esencial para su desarrollo ordenado, seguro y sostenible. Implica la intervención activa de autoridades regulatorias en cada etapa de la cadena de valor, con el propósito de equilibrar los intereses del Estado, los operadores privados, los consumidores y el medio ambiente.

2.5. Empresas relevantes

A lo largo de todas las fases del negocio del gas natural operan numerosas compañías globales, algunas de ellas integradas verticalmente y con influencia significativa en todo el proceso, desde la exploración hasta la distribución final. Entre las más destacadas se encuentran ExxonMobil (USA), Shell (UK), Chevron (USA), TotalEnergies (Francia), Equinor (Noruega), Kinder Morgan (USA), Enbridge (Canadá), Williams (USA), Engie (Francia) y Naturgy (España), entre otras.

En el sector upstream, centrado en la exploración y producción de gas natural, compañías como ExxonMobil, Shell, Chevron y TotalEnergies lideran las operaciones globales. Estas empresas desarrollan proyectos en diversas regiones del mundo, como África, América, el Mar del Norte, Asia y Australia. Por ejemplo, Chevron tiene una presencia destacada en proyectos de gas natural licuado (GNL) en Australia. Shell opera en múltiples cuencas globales y ha hecho del gas una pieza central de su estrategia de transición energética. Destaca su presencia en Nigeria, Qatar, Rusia, y su compromiso con el desarrollo de GNL. ExxonMobil combina su fuerza técnica y financiera para liderar grandes campos en Norteamérica, Papua Nueva Guinea y Mozambique. Equinor, empresa estatal de Noruega, se especializa en producción “offshore” en el Mar del Norte, y ha diversificado hacia otros continentes. TotalEnergies también ha invertido fuertemente en África y Asia, con un enfoque claro en aumentar su cartera de gas en el marco de una transición energética más limpia.

En el midstream destacan compañías como Kinder Morgan, Enbridge, Williams y TC Energy. Estas operan extensas redes de gasoductos, plantas de procesamiento y terminales de GNL. Shell también es un actor relevante en este segmento, siendo uno de los mayores comercializadores de GNL del mundo y responsable de innovaciones como la planta flotante Prelude FLNG. Chevron participa en el midstream tanto con gasoductos como en terminales de licuefacción, lo que le permite abastecer mercados asiáticos con GNL desde Australia y América. Kinder Morgan gestiona una de las mayores redes de gasoductos del mundo, conectando cuencas productoras con centros de consumo. Enbridge opera gasoductos que atraviesan Norteamérica, y participa en terminales de GNL. Williams Companies es crucial para el mercado estadounidense, con su sistema Transco que alimenta la costa este del país.

El downstream es liderado por empresas como Engie, Naturgy, Enel y CNPC. Estas compañías suministran gas a usuarios industriales, comerciales y residenciales, y operan redes urbanas y estaciones de GNV. Shell tiene una presencia importante en este sector,

comercializando gas a clientes en Europa, Asia y América, y desarrollando soluciones energéticas que integran gas y renovables. Chevron también opera en downstream, aunque con un enfoque más concentrado en upstream, suministra gas a industrias y plantas eléctricas. Corporación Nacional de Petróleo de China (CNPC) y su filial PetroChina han expandido masivamente la infraestructura de distribución y regasificación en China, respondiendo a la creciente demanda doméstica. Engie tiene una fuerte presencia en Europa, América Latina y Asia, ofreciendo servicios de distribución y soluciones energéticas basadas en gas. Enel, de Italia, actúa en distribución y generación, apostando por la integración del gas con energías renovables. Naturgy opera redes de distribución en España y América Latina, y participa en la comercialización y generación de energía a partir de gas.

En conjunto, estas empresas configuran el entramado global del gas natural. Algunas, como Shell y Chevron, están presentes en todas las fases de la cadena de valor y destacan por su capacidad de inversión, innovación tecnológica y compromiso con la transición energética. Su influencia es clave para asegurar el suministro seguro y eficiente de gas a nivel mundial.

3. Trading de energía

3.1. Funcionamiento del Trading de energía

El trading de energía forma parte del amplio mundo del mercado de materias primas. Los productos principales que se comercian son el petróleo, la electricidad y el gas natural. Estos bienes son limitados y de consumo. Su precio se fija por la ley de la oferta y la demanda, aunque también se ve afectado por las situaciones geopolíticas o fenómenos climáticos.

Las empresas más destacadas dentro de este sector son: Vitol Group (Países Bajos y Suiza), Glencore (Suiza), Trafigura (Singapur y Suiza), Mercuria Energy Group (Suiza), etc. Además, la mayoría de las compañías del sector energía, cuentan con su propio departamento de trading de energía, como Chevron Trading o ExxonMobil Trading…

Trading de petróleo:

El petróleo es una de las materias primas más negociadas en los mercados debido a su alta volatilidad. Entre los mayores países productores se encuentran Arabia Saudita y Estados Unidos. Este mercado es especialmente sensible a factores geopolíticos. La demanda de petróleo es muy elevada, ya que se utiliza no solo como combustible para el transporte, sino también en la fabricación de plásticos, textiles sintéticos, fertilizantes, dispositivos electrónicos y otros productos. Los principales índices de referencia para su cotización son el West Texas Intermediate “WTI” y el Brent.

Trading de electricidad:

A diferencia de otras materias primas, la electricidad no puede guardarse fácilmente en grandes volúmenes, lo que complica y agiliza su proceso de compraventa. El trading de electricidad facilita el equilibrio entre la oferta y la demanda de forma inmediata, mediante el uso de contratos tanto físicos como financieros.

3.2. Trading de gas natural

El trading de gas natural consiste en la compra y venta de contratos relacionados con este recurso energético, aprovechando las fluctuaciones de su precio en los mercados. Este tipo de trading se realiza generalmente en mercados de futuros, como el New York Mercantile Exchange (NYMEX) o el Intercontinental Exchange (ICE), aunque también puede involucrar otros derivados financieros o “Exchange Traded Funds” (ETFs). También son populares los contratos de gas externos a los mercados bursátiles, contratos “over the counter (OTC)”, estos contratos se negocian directamente entre las dos partes (OTC bilateral) o mediante una tercera parte que funciona como intermediario (OTC cleared).

La estructura en la que se sustenta el trading de gas natural son los “National Trading Points (NTP)”. Estos puntos funcionan como centros reales o virtuales de intercambio de gas.

3.3. National trading points

Los NTP sirven como cetros de intercambio y entrega de gas natural. En ellos se liquidan los contratos de gas, se transfiere propiedad sobre gas, y se balancea el sistema, vigilando

las entradas y salidas de gas del NTP. Los NTP también se usan para fijar precios de contratos de derivados financieros. Cada país, salvo alguno en vías de desarrollo, cuenta con un NTP. Aunque son pocos los que se suelen utilizar como referencia.

El Henry Hub es un punto físico de intercambio de gas. Está ubicado en Erath, Louisiana, en Estados Unidos. En el convergen gaseoductos interestatales e intraestatales. Su operación corre a cargo de Sabine Pipe Line LLC, una subsidiaria de EnLink Midstream, la cual fue adquirida por Chevron hace una década. El Henry Hub funciona como centro de entrega oficial tanto para contratos de futuros de gas natural comercializados en el NYMEX, como para otros derivados cotizados en el ICE. Su precio se usa como referencia en el mercado estadounidense y en algún otro mercado internacional.

El Title Transfer Facility (TTF) es un centro virtual, al contrario que el Henry Hub, de intercambio de gas. Se encuentra en Países Bajos. En él se comercializa la titularidad del gas, sin necesidad de entregar el gas físicamente. Está operado por Gasunie Transport Services. El TTF es el mercado más líquido de gas natural de toda Europa. Su precio se usa como principal referencia para contratos de derivados tanto en el continente como fuera de él.

El National Balancing Point (NBP), de Reino Unido, también es un centro virtual. Está operado por National Grid Gas plc. Aunque en un pasado fue el punto de referencia para el precio y contratos de gas natural en Europa, hoy en día es únicamente predominante a nivel nacional, ya que el TTF de Paises Bajos tiene una mayor liquidez.

3.4. Contratos de gas natural y GNL

Los acuerdos a largo plazo han sido determinantes en la expansión del sector del gas natural y del gas natural licuado (GNL). Actualmente, siguen representando el mecanismo principal para llevar a cabo operaciones internacionales de compra y venta de estos recursos. Esta parte del informe se dedica a explorar las características clave de dichos contratos, haciendo énfasis en sus dos formas predominantes: los contratos de suministro de gas (GSA, por su denominación en inglés) y los contratos de compraventa de GNL (conocidos como GNL SPA, GNL “supply purchase agreement”).

3.4.1. Duración

Durante mucho tiempo, los contratos de suministro de gas y GNL han sido acuerdos de larga duración, a menudo superando los 20 o incluso 30 años. Esta práctica respondía a la necesidad de garantizar grandes inversiones en infraestructura, ya que asegurar un contrato estable a largo plazo era fundamental para obtener financiamiento y hacer viables proyectos tan costosos.

Con el paso del tiempo, esta lógica se ha mantenido vigente, sobre todo en nuevos desarrollos que requieren respaldo financiero sólido. Sin embargo, en los últimos años han surgido alternativas de financiación más flexibles y han crecido los mercados a corto (“spot”) y medio plazo. Esto ha generado cambios en la forma de negociar: en algunos contextos, especialmente en regiones con mercados líquidos o en proyectos de expansión, se ha empezado a cuestionar la necesidad de compromisos tan prolongados.

En Asia, los contratos extensos siguen siendo comunes, pero en Europa muchos compradores han optado por acuerdos más breves. Aun así, el contexto actual ha llevado a que varios actores europeos reconsideren los contratos a largo plazo como una forma de asegurar el suministro futuro de GNL.

3.4.2. Precio

El precio pactado representa uno de los elementos clave en cualquier acuerdo de suministro de gas o GNL a largo plazo. Suele ser la parte más compleja del contrato y, al mismo tiempo, la que con mayor frecuencia genera dificultades o conflictos.

A diferencia de otros productos energéticos, el gas natural y el GNL no cuentan con un precio único reconocido a nivel mundial. Cada contrato de suministro a largo plazo debe establecer su propio método de determinación del precio, adaptado a las necesidades de las partes involucradas y a las condiciones del mercado en el momento de la negociación.

Durante décadas, la práctica habitual fue utilizar referencias al petróleo crudo o a productos derivados como base para fijar los precios. Sin embargo, con el tiempo se han desarrollado alternativas más sofisticadas y diversas que permiten una mayor flexibilidad y reflejan mejor la dinámica del mercado actual.

Diseñar un sistema de precios para contratos de largo plazo es una tarea técnica y estratégica. No se trata simplemente de elegir un índice, sino de construir una fórmula que equilibre los riesgos, proporcione estabilidad financiera y sea sensible a la evolución de los precios en los mercados energéticos.

En Europa, especialmente en los últimos diez años, se ha reducido considerablemente la dependencia del petróleo como referencia para contratos de gas y GNL. Muchos acuerdos han pasado a basarse en precios “spot” o en índices de “hubs” de gas bien establecidos, como el TTF en los Países Bajos o el NBP en el Reino Unido.

La moneda en la que los pagos se efectuaran tambien se selecciona en el contrato. Además de para las transacciones, se fija la divisa para los valores dentro de las fórmulas del precio. La elección de la moneda es esencial, ya que determinara la exposición del contrato a situaciones geopolíticas. En los últimos años se han dado problemas con la decisión de implementar el rublo ruso como moneda para estos contratos, en algunos casos, las discusiones llegaron al corte de suministros.

En los contratos internacionales de suministro de gas y GNL, el ratio euro/dólar tiene un impacto directo sobre el coste real que asumen las partes, porque la mayoría de estos acuerdos (incluso en mercado europeo) se pactan y liquidan en dólares estadounidenses.

Cuando el dólar se fortalece frente al euro, el comprador europeo necesita más euros para adquirir la misma cantidad de dólares con los que paga el gas o el GNL. Esto significa que, aunque el precio en dólares del contrato permanezca invariable, el coste efectivo en euros aumenta. En escenarios de dólar fuerte, el gas importado se encarece para Europa, lo que puede afectar no solo a las cuentas del comprador, sino también a la competitividad de toda la cadena de suministro y, finalmente, a los precios para los consumidores.

En sentido contrario, cuando el euro se aprecia frente al dólar, el comprador europeo necesita menos euros para cubrir el mismo pago en dólares. Esto reduce el coste efectivo en moneda local, incluso sin que haya variado el precio absoluto en el contrato.

Para mitigar este riesgo, algunos contratos incluyen cláusulas que permiten fijar el tipo de cambio en determinados momentos o aplicar mecanismos de cobertura financiera, como contratos a plazo de divisas, swaps u otro tipo de derivado financiero. Sin embargo, estas coberturas tienen un coste y no siempre son totalmente seguras. Otra opción es negociar el contrato en euros, aunque esto es poco común, ya que en el comercio internacional de gas y GNL el dólar sigue siendo la moneda de referencia por su liquidez y aceptación global.

En resumen, la volatilidad del euro/dólar altera a gran escala el coste real del suministro y, por tanto, el margen económico de las partes. Para el comprador, un dólar fuerte supone un encarecimiento, mientras que un dólar débil puede abaratar sus condiciones de compra. Para el vendedor, el efecto depende de su estructura de costes y de la moneda en la que esté financiado (si asume gastos en euros, pero cobra en dólares, un dólar fuerte puede beneficiarlo, y uno débil perjudicarlo).

A continuación, se exponen dos fórmulas populares para fijación de precios en contratos de gas:

Contratos de gas natural:

Una forma frecuente de determinar el precio del gas en un contrato GSA es vinculándolo a un valor inicial que sirve como referencia, el cual se modificará a lo largo del tiempo de acuerdo con la evolución de un índice o materia prima previamente definido por ambas partes. Esta fórmula permite que el precio refleje los cambios del mercado sin necesidad de renegociar constantemente.

$$\boldsymbol{P = Po * (f * A^{n})}$$

Po ≡ Precio base

f ≡ Factor de escala del activo referencia (porcentaje)

A ≡ Cotización del activo referencia

n ≡ Duración del periodo

Contratos de GNL:

En muchos contratos de GNL, es habitual utilizar un método tradicional de determinación de precios basado en el petróleo, el cual se expresa generalmente a través de una fórmula lineal básica.

$$\boldsymbol{P = A * Pc + B}$$

Pc ≡ Precio del petróleo crudo (Brent, WTI…), también se puede usar otro activo que interese

A ≡ Factor de escala del precio del petróleo (porcentaje)

B ≡ Constante de inflación y costes de transporte

En los contratos de GNL norteamericanos, es común utilizar el precio del Henry Hub en lugar del precio del petróleo.

3.4.3. Volumen del contrato

En el ámbito de los grandes proyectos de gas natural y GNL, asegurar que el gas producido se comercialice a largo plazo es fundamental para la viabilidad financiera. Dado que estos desarrollos requieren de grandes inversiones, tanto los productores como los inversionistas y demás interesados buscan certezas respecto al flujo de ingresos. Para ello, se utilizan acuerdos que obligan a los compradores a adquirir un volumen mínimo de producto, conocidos como compromisos de "offtake".

Por otro lado, un contrato con clausula "take or pay" establece que el comprador debe recibir y pagar una cantidad determinada de gas o GNL, o bien abonar una cantidad previamente pactada por el volumen no retirado. Es decir, incluso si el comprador no consume el gas, sigue teniendo la obligación de pagar por él, al menos parcialmente. Estos acuerdos son comunes en contratos a largo plazo en el sector energético, aunque no siempre son aplicados de manera uniforme.

La cláusula "take or pay" se fija usualmente para ciertos períodos de tiempo (como anualidades, trimestres o incluso días) y, en el caso de cargamentos de GNL, pueden establecerse por envío. Aunque el objetivo de estas cláusulas es proteger al vendedor frente a la volatilidad de la demanda, su aplicación se negocia intensamente y rara vez se ejecutan sin condiciones.

Existen múltiples excepciones que liberan al comprador de este compromiso, como interrupciones en el suministro por parte del vendedor, entregas que no cumplen las especificaciones técnicas, o circunstancias de fuerza mayor. Además, muchos contratos introducen límites a esta obligación: por ejemplo, se permite aplicar el "take or pay" solo sobre un porcentaje determinado del volumen contratado anualmente, el cual suele oscilar entre el 70 % y el 95 %.

Los compromisos "take or pay" tienden a ser más estrictos en proyectos nuevos (donde los riesgos financieros son más altos), mientras que, en instalaciones existentes, o al renegociar contratos, es habitual ver reducciones en estas obligaciones. La capacidad de negociación del comprador y las condiciones del mercado al momento de firmar el acuerdo también inciden notablemente.

3.4.4. Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

En los últimos años, la sostenibilidad ha pasado a ocupar un lugar relevante en la formulación de políticas energéticas y en la estructuración de acuerdos comerciales internacionales. En este contexto, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), adoptados por la Asamblea General de las Naciones Unidas como parte de la Agenda 2030, han empezado a influir progresivamente en la redacción y contenido de los contratos de suministro de gas natural, tanto en su forma tradicional por gasoducto como en contratos de GNL.

Los contratos de suministro de gas, históricamente centrados en aspectos técnicos, comerciales y jurídicos como el volumen, el precio, la duración y los términos de entrega, han comenzado a evolucionar para incluir cláusulas y principios alineados con metas de

sostenibilidad. Esta transformación responde no solo a compromisos voluntarios de empresas energéticas multinacionales, sino también a presiones regulatorias, requisitos financieros de instituciones de crédito internacional y expectativas sociales crecientes en torno a la responsabilidad ambiental y social de los operadores del sector energético.

Uno de los ODS más directamente relevantes en este ámbito es el Objetivo 7 (Energía asequible y no contaminante), que busca garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. El gas natural, aunque sigue siendo un combustible fósil, es percibido en muchos contextos como una fuente de energía de transición que permite reemplazar fuentes más intensivas en carbono, como el carbón o el fuelóleo, contribuyendo así a la reducción de emisiones en el corto y mediano plazo. En consecuencia, algunos contratos de suministro han comenzado a integrar compromisos relacionados con la eficiencia energética, el uso de tecnologías menos contaminantes y la optimización del transporte y distribución del gas, en línea con este objetivo.

Asimismo, el Objetivo 13 (Acción por el clima) está cobrando un protagonismo cada vez mayor en la negociación de acuerdos de gas. Diversos compradores han comenzado a exigir que los contratos incluyan disposiciones sobre la medición, verificación y reporte de emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo de toda la cadena de valor del gas, desde la producción hasta el consumo. En el caso de contratos de GNL, se han observado avances importantes en la inclusión de cláusulas relativas a la huella de carbono del ciclo completo del combustible, e incluso se ha comenzado a utilizar el concepto de "GNL carbono neutral", que combina eficiencia operativa con la compra de créditos de carbono certificados para compensar las emisiones residuales.

Por otra parte, el Objetivo 12 (Producción y consumo responsables) también ha empezado a manifestarse en la práctica contractual a través de cláusulas que fomentan la trazabilidad del producto, la transparencia en las prácticas de operación, el uso responsable de los recursos naturales y la incorporación de estándares internacionales de sostenibilidad. Algunos contratos más recientes incluyen disposiciones que exigen la utilización de buques de transporte de GNL que cumplan con normas internacionales de eficiencia energética y bajas emisiones, o la implementación de prácticas sostenibles en las instalaciones de licuefacción y regasificación.

Además de los aspectos ambientales, los contratos de suministro de gas también están comenzando a reflejar principios vinculados al Objetivo 16 (Paz, justicia e instituciones sólidas). En este sentido, los contratos incorporan con mayor frecuencia cláusulas de gobernanza corporativa, mecanismos de cumplimiento normativo, disposiciones anticorrupción y obligaciones de debida diligencia en materia de derechos humanos y laborales. Este tipo de estipulaciones resulta especialmente relevante en operaciones que involucran a empresas estatales, jurisdicciones con altos riesgos jurídicos o países donde existen antecedentes de conflictos sociales relacionados con la explotación de recursos naturales.

Finalmente, cabe destacar que el cumplimiento de los ODS no se limita a la incorporación explícita de cláusulas específicas en los contratos. También puede verse reflejado en los procedimientos de licitación, en los criterios de selección de proveedores, en los mecanismos de monitoreo y auditoría incluidos en los contratos a largo plazo, y en los

sistemas de resolución de controversias que priorizan soluciones colaborativas y sostenibles.

Si bien la incorporación de los ODS en los contratos de gas aún no está generalizada, se observa una tendencia creciente en esta dirección, impulsada por factores regulatorios, financieros y reputacionales. Esta evolución normativa y práctica sugiere que, en los próximos años, los contratos de suministro de gas desempeñarán un papel cada vez más importante no solo en la seguridad energética, sino también en la transición hacia una economía baja en carbono y en la promoción de un desarrollo energético más justo, inclusivo y sostenible.

3.4.5. Transporte del gas y GNL

Gas natural

El gas natural suele encontrarse en zonas alejadas y de difícil acceso, lo que implica que transportar el recurso hasta los centros de consumo requiere de una infraestructura especializada. En este contexto, los gasoductos juegan un papel fundamental, especialmente en transacciones internacionales de compraventa de gas. Estos gasoductos pueden ser utilizados tanto para cumplir compromisos de suministro establecidos en contratos específicos (como los GSA), como para facilitar el tránsito de gas entre distintos actores del mercado hacia múltiples destinos.

Los GSA habitualmente especifican detalles sobre el transporte, siendo uno de los elementos clave el punto de entrega. Este punto suele fijarse con claridad contractual, por ejemplo, en una frontera entre dos países. A partir de este punto, el riesgo y la responsabilidad del gas suelen transferirse del vendedor al comprador.

Gas natural licuado

En contraste con el transporte por gasoductos, el GNL se moviliza a través de barcos especializados, que pueden ser del tipo “Moss” o “de membrana”. Esta modalidad permite trasladar el GNL a grandes distancias, incluso entre continentes.

Los contratos de compraventa de GNL (SPA) incluyen habitualmente estipulaciones sobre el tipo de embarcación que debe usarse, quién se encarga de los costos portuarios y cómo deben cumplirse los requisitos técnicos durante las operaciones de carga y descarga. Normalmente, se establece un puerto de carga y otro de descarga, y las partes deben acordar si el suministro se realiza bajo condiciones “Free On Board” (donde el riesgo del transporte y sus costes los asume el comprador) o “Delivered Ex Ship” (en este caso el vendedor asume los riesgos y costes del trasporte). Esta decisión es importante desde el punto de vista comercial, ya que quien controla el transporte suele obtener mayor flexibilidad y posibles beneficios económicos.

El lugar final al que se envía el GNL se ha convertido en un aspecto relevante en la negociación de contratos. En los últimos años, la flexibilidad de destino se ha vuelto habitual, especialmente en contratos de exportación de GNL desde Estados Unidos, que han ganado una presencia significativa en el mercado global. Sin embargo, en Asia este tema sigue generando controversias. Algunos compradores, como los de China, enfrentaron limitaciones importantes durante la pandemia, debido a contratos que no permiten desviar cargamentos. En muchos de estos casos, los contratos estipulan un único

punto de entrega, y prohíben expresamente el envío del GNL a otros destinos fuera del país (como en los SPA chinos que restringen la entrega exclusivamente a la República Popular China).

Otros contratos en la región asiática también imponen condiciones para ejecutar desvíos, como prohibiciones específicas hacia ciertos puertos extranjeros, o la exigencia de obtener la aprobación del vendedor. Este último requisito suele ser el principal obstáculo práctico para desviar las cargas de manera oportuna.

3.4.6. Otras clausulas o situaciones en los contratos

Fallos en la entrega:

En los contratos internacionales de suministro de gas y GNL, los posibles fallos en la entrega suponen una de las situaciones más delicadas, ya que pueden afectar a la continuidad del suministro y generar pérdidas significativas para el comprador. Idealmente, en un acuerdo a largo plazo no deberían producirse interrupciones, pero en la realidad pueden surgir imprevistos que dificulten al vendedor cumplir sus obligaciones. Estos fallos suelen estar vinculados a dificultades operativas, como averías en las instalaciones de producción, problemas logísticos o interrupciones en la infraestructura de transporte.

La manera en que se regula la responsabilidad del vendedor por una entrega fallida varía notablemente de un contrato a otro. Algunos contratos acuerdan que, en caso de incumplimiento, el vendedor debe indemnizar al comprador por los daños ocasionados. En otros casos, la responsabilidad se acota aún más mediante topes cuantitativos, por ejemplo, fijando un límite equivalente a un porcentaje del precio del contrato. También existen contratos que no incluyen ninguna disposición específica sobre las consecuencias de un fallo en la entrega, lo que deja la resolución de la disputa a la interpretación general del acuerdo y a las leyes aplicables.

En los últimos años, este asunto ha cobrado gran visibilidad mediática, en especial por situaciones en las que cargamentos de GNL comprometidos bajo contratos a largo plazo fueron desviados por los vendedores al mercado “spot” para aprovechar precios excepcionalmente altos. Este tipo de comportamientos, aunque lucrativos para el proveedor, pueden considerarse incumplimientos contractuales si no están respaldadas por cláusulas que permitan reasignar el destino de la carga de esa manera. En el caso del gas transportado por gasoducto, los fallos en la entrega también han ganado relevancia en contextos geopolíticos, como los cortes de suministro por parte de Gazprom a determinados compradores europeos tras el inicio de la guerra en Ucrania.

La regulación contractual de los fallos en la entrega no solo cubre la compensación económica, sino también el derecho del comprador a buscar suministros alternativos y, en algunos casos, la posibilidad de rescindir el contrato si las interrupciones son reiteradas o prolongadas. La existencia de cláusulas claras y precisas que definan las causas, los límites y las consecuencias de una entrega incumplida es esencial para reducir la incertidumbre y proteger a ambas partes frente a pérdidas imprevistas. En definitiva, aunque la expectativa es que el suministro se cumpla conforme a lo pactado, el riesgo de interrupciones siempre está presente.

Control de calidad:

La definición de la calidad del producto es un tema crítico, ya que de ella dependen tanto el funcionamiento técnico del suministro como la validez contractual de la operación. Estas condiciones se detallan normalmente en anexos técnicos muy precisos, ya que cualquier desviación respecto a lo acordado puede derivar en importantes consecuencias, como el rechazo de la entrega, reclamaciones por daños o en algunos casos la rescisión del contrato.

En el caso del gas transportado por gasoducto, la calidad se describe a través de su composición química, el contenido energético, la temperatura y la presión en el punto donde se entrega. Se especifican con exactitud la proporción de metano, la presencia de componentes inertes como el dióxido de carbono o el nitrógeno, y el nivel máximo de compuestos con azufre. El valor calorífico debe mantenerse dentro de un rango que asegure un rendimiento adecuado en la red de destino. La presión es otro factor esencial, ya que tanto el vendedor como el comprador deben sostenerla en los niveles pactados para que el flujo sea constante. Cuando varios proveedores utilizan un mismo gasoducto, suele establecerse que la calidad del gas que recibe cada comprador sea equivalente en ese punto de entrega.

En el caso del GNL, los parámetros se adaptan a su estado líquido y a las condiciones necesarias para su regasificación. Con estas especificaciones se garantiza que, una vez regasificado, el producto sea compatible con los requisitos técnicos y normativos del uso al que se destina.

Si la entrega no se ajusta a lo acordado, se habla de un suministro fuera de especificación. Si el gas o GNL no cumple con lo acordado, pero sigue siendo utilizable, es habitual negociar ajustes económicos, como descuentos o compensaciones. Si la desviación lo hace inservible, el comprador puede rechazar la carga y reclamar al vendedor. En gasoductos que transportan mezclas de distintos proveedores, atribuir responsabilidades puede resultar complejo, por lo que los contratos suelen incluir mecanismos claros para determinar quién asume el coste del producto defectuoso.

En los últimos años se ha integrado un nuevo criterio, el perfil de emisiones de gases de efecto invernadero. En mercados con exigencias de descarbonización, se puede requerir que el producto cuente con certificación ambiental y que no supere ciertos límites de emisiones. Si este requisito no se cumple, el comprador puede enfrentarse a sanciones, y la entrega podría tratarse como un incumplimiento técnico.

Por último, cabe destacar que en este aspecto los intereses de las partes suelen divergir. El comprador aspira a imponer especificaciones más estrictas para garantizar la compatibilidad con sus instalaciones y el respeto de la normativa. El vendedor, por el contrario, busca márgenes más amplios que reduzcan la probabilidad de incumplimiento y le den margen para abastecerse de diferentes fuentes. Esta tensión entre ambos intereses es una constante en las negociaciones de este tipo de contratos.

Revisión de precios:

La revisión de precios es un mecanismo diseñado para reajustar el valor pactado del producto durante la vigencia del acuerdo. Su función se basa en modificar el precio del contrato teniendo en cuenta las condiciones del mercado y la situación económica de las

partes, evitando que cambios radicales en el entorno dejen a una de las partes en una posición claramente desfavorable.

En el mercado europeo, las cláusulas de revisión suelen activarse cuando se produce un cambio significativo en las circunstancias del mercado del comprador. El cambio debe ser sustancial, como modificaciones regulatorias o transformaciones estructurales del mercado energético. La liberalización de los mercados de gas en Europa ha dado lugar a numerosas solicitudes de revisión, ya que las fórmulas de precios antiguas dependían del precio del petróleo, y dejaron de reflejar fielmente el valor del gas.

En los contratos referentes al mercado asiático, la revisión de precios se suele permitir únicamente en momentos específicos predeterminados en el contrato, por ejemplo, a partir de un número concreto de años desde la primera entrega y dentro de intervalos fijos. Esto limita la flexibilidad del comprador o del vendedor para adaptar el precio ante fluctuaciones imprevistas.

El procedimiento de revisión normalmente comienza con una fase de negociación directa entre las partes. En Europa, si estas conversaciones no llegan a un acuerdo, es frecuente que el contrato lleve el recurso a arbitraje, donde un tribunal arbitral decide sobre la modificación del precio. En mercados asiáticos, en cambio, se suele evitar el arbitraje, aunque esto está empezando a cambiar con la incorporación de nuevos actores en la industria que buscan mayor seguridad jurídica frente a procesos de negociación prolongados.

Los contratos, en ocasiones, no especifican con detalle la metodología de la revisión de precios, pues la definen como que debe ser justa. Y provoca la intervención de árbitros. Para mitigar este riesgo, algunas fórmulas limitan explícitamente la magnitud de los cambios permitidos o restringen la posibilidad de alterar la estructura fundamental del mecanismo de fijación de precios.

Aunque la revisión de precios se centra en ajustar un único elemento del contrato, en ciertos casos las circunstancias requieren modificaciones más amplias, afectando a otros términos comerciales. Sin embargo, las disposiciones que permiten reabrir el contrato por completo son menos.

La revisión de precios es un instrumento esencial para mantener el equilibrio económico de los contratos de gas a largo plazo. Su eficacia depende no solo de la redacción de la cláusula, sino también del contexto geográfico y regulatorio en el que se opera cada contrato, así como de la capacidad de las partes para llegar a acuerdos o, en su defecto, someter la cuestión a un mecanismo de resolución de disputas.

Arbitraje:

El arbitraje es el mecanismo de resolución de disputas más utilizado cuando las partes no logran llegar a un acuerdo por su cuenta. Se valora principalmente por su neutralidad, flexibilidad y eficacia, ya que evita someter la controversia a los tribunales.

El arbitraje permite a las partes acordar un conjunto de aspectos procesales que en un medio ordinario vendrían impuestos. Entre ellos se incluyen la elección de los árbitros, el lugar donde se desarrollará el procedimiento, las reglas arbitrales aplicables, el idioma y el

grado de confidencialidad. Esta capacidad de personalización convierte al arbitraje en una herramienta adaptable a las particularidades del sector energético y de cada contrato.

En la práctica, el procedimiento arbitral suele comenzar con la presentación de una solicitud formal, seguida de la constitución del tribunal arbitral. Posteriormente se intercambian escritos y pruebas, se celebran audiencias y, finalmente, el tribunal emite una sentencia. La sentencia es vinculante para las partes y, a diferencia de una sentencia judicial, solo puede ser impugnado en circunstancias muy limitadas.

En algunos contratos, el arbitraje se reserva para determinados tipos de disputas, mientras que otras, especialmente las de naturaleza técnica, se confían a la resolución por expertos. Por ejemplo, un desacuerdo sobre la medición de la calidad del gas podría someterse a un especialista técnico, mientras que una controversia sobre la interpretación de la fórmula de precios se llevaría ante un tribunal arbitral.

En el ámbito del gas y el GNL, el arbitraje internacional ha sido clave para resolver disputas complejas relacionadas con revisiones de precios, interpretación de cláusulas de fuerza mayor o incumplimientos en las obligaciones de entrega. Su carácter definitivo, adaptabilidad internacional lo hacen indispensable para dar seguridad jurídica a contratos de largo plazo y alto valor económico expuestos a grandes cambios.

Rescisión del contrato:

En los contratos internacionales de gas y GNL, la rescisión se refiere a la terminación anticipada del acuerdo antes de la fecha de vencimiento prevista. Esta situación se da cuando ocurren circunstancias que hacen inviable continuar con la relación contractual. Una de las causas más comunes es el incumplimiento grave de las obligaciones esenciales pactadas en el contrato. Por ejemplo, si una de las partes deja de cumplir con las entregas o con los pagos y no corrige su situación dentro de un plazo previamente pactado la otra parte puede poner fin al acuerdo.

Otra situación que puede dar lugar a la rescisión es la insolvencia o liquidación de una de las partes, ya que esto compromete su capacidad para cumplir con su obligación contractual. También se contempla la llamada fuerza mayor prolongada, es decir, la ocurrencia de un evento extraordinario (un desastre natural, una guerra o una decisión política, etc) que impida ejecutar el contrato durante un periodo extenso. En estos casos, la parte no afectada tiene la opción de resolver el contrato sin penalización.

La rescisión también puede ser fruto de un acuerdo mutuo, cuando ambas partes reconocen que las condiciones originales ya no son sostenibles o beneficiosas y deciden finalizar la relación de forma ordenada. Sin embargo, incluso después de la rescisión, ciertas obligaciones siguen vigentes. Esto incluye pagos pendientes, indemnizaciones por daños, penalizaciones acordadas y la devolución de equipos, documentos o materiales que pertenecen a la otra parte.

En la práctica, el derecho a rescindir es un elemento de protección, pero su ejercicio debe seguir un procedimiento claro. Primero se ha de notificar por escrito, justificando la causa, dar oportunidad para arreglar el problema (cuando sea posible) y cumplir con los plazos establecidos. Así, se busca evitar abusos y garantizar que la rescisión solo ocurra cuando la relación contractual se ha vuelto realmente insostenible.

4. Derivados financieros

4.1. Fundamentos de los derivados financieros

Los derivados financieros son contratos cuyo valor es determinado por el precio de otro activo. Al activo que determina el precio de un derivado se llama subyacente. Un activo subyacente puede ser prácticamente cualquier activo financiero, desde acciones, bonos, divisas, materias primas, índices bursátiles... Una ventaja esencial de los derivados financieros es que no es necesario poseer el activo subyacente.

Los motivos principales por los que se usan derivados financieros son para cobertura de riesgos y para especulación. El tema de cobertura se tratará más adelante, pero se basa principalmente en protegerte de fluctuaciones en tu contra del precio del activo subyacente. Para especular con derivados financieros basta con elegir un derivado que te genere beneficio si el precio de un activo subyacente fluctúa en el sentido que has predicho que lo hará.

Los derivados financieros pueden negociarse bien en mercados bursátiles (organizados) o bien directamente entre partes (extrabursátiles u "over the counter"). Las negociaciones en mercados organizados (bolsa de valores) son más transparentes y tienen poca flexibilidad. Los contratos "over the counter" permiten más personalización.

Existen multitud de derivados financieros que abordaremos en los siguientes apartados, están las opciones, forwards, futuros y swaps.

4.2. Opciones financieras

Una opción financiera ofrece a su propietario el derecho a realizar una actividad financiera dentro de la vida del contrato. El dueño de la opción puede decidir no ejercer su derecho. La compra de una opción financiera requiere del pago de una prima al vendedor de esta. Existen dos tipos de opciones, las opciones de compra ("call") y las de venta ("put").

Dependiendo de cuando se pueda ejecutar la opción, distinguimos entre opción americana, europea y Bermuda. Las acciones americanas permiten al comprador ejercer su derecho durante la vida del contrato. Las europeas, en contraste, únicamente permiten ejercer el derecho en la fecha de expiración del contrato. Las opciones Bermuda son un hibrido entre las americanas y las europeas, estas permiten ejecutar el derecho únicamente en días específicos dentro de la vida del contrato.

4.2.1. Opción de compra ("call")

Una opción de compra ofrece a su comprador el derecho (pero no la obligación) de comprar un activo (subyacente) a un determinado precio ("strike") hasta una determinada fecha ("maturity").

Cuando en el momento de ejecutar la opción de compra el precio del subyacente está por encima del precio de "strike", se dice que la acción está "in the money". Esto quiere decir que el propietario se beneficiaría al ejecutar la opción. Si por el contrario el precio de la acción es inferior al "strike", la acción se denomina "out of the money". En este último caso, el propietario de la opción no obtendría beneficio ejecutando la opción, le resultaría más barato comprar en el mercado directamente.

Ejemplo compra de "call" (posición larga, "long"):

Supongamos que compramos 100 opciones de compra de una acción "X", con un "strike" de 25€, la prima de cada una de las opciones es de 1€. Estaríamos adoptando una posición larga.

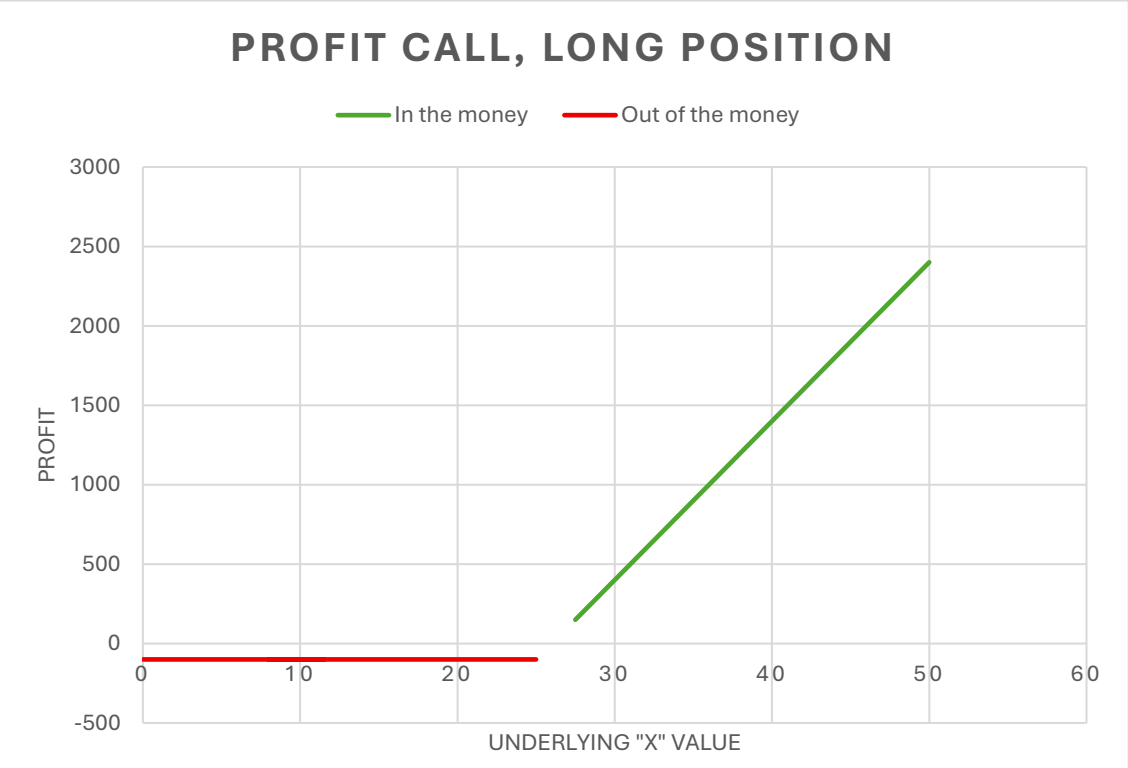
Se pueden dar dos opciones llegados al final del contrato, por un lado, el valor de la acción "X" puede estar por encima del valor del "strike" o por debajo:

Mientras el precio de la acción "X" no esté por encima del "strike", no se ejecutaría el derecho de la opción, ya que se acudiría al mercado para comprar la acción. En este escenario se perdería la prima.

Coste de prima (fijo): $100uds * 1€/ud = 100€$

Ganancia de las opciones: $100uds * \{X\ value - 25€\ (strike)\}$

Según las dos ecuaciones anteriores obtenemos el beneficio total de nuestra cartera según el valor del precio de "X". Con esta exposición, las ganancias pueden llegar a ser infinitas, ya que el precio de una acción puede subir prácticamente sin límite. Por el otro lado, en el peor de los casos, únicamente perderíamos los costes de la prima.



Gráfica 4.1

Ejemplo venta de “call” (posición corta, “short”):

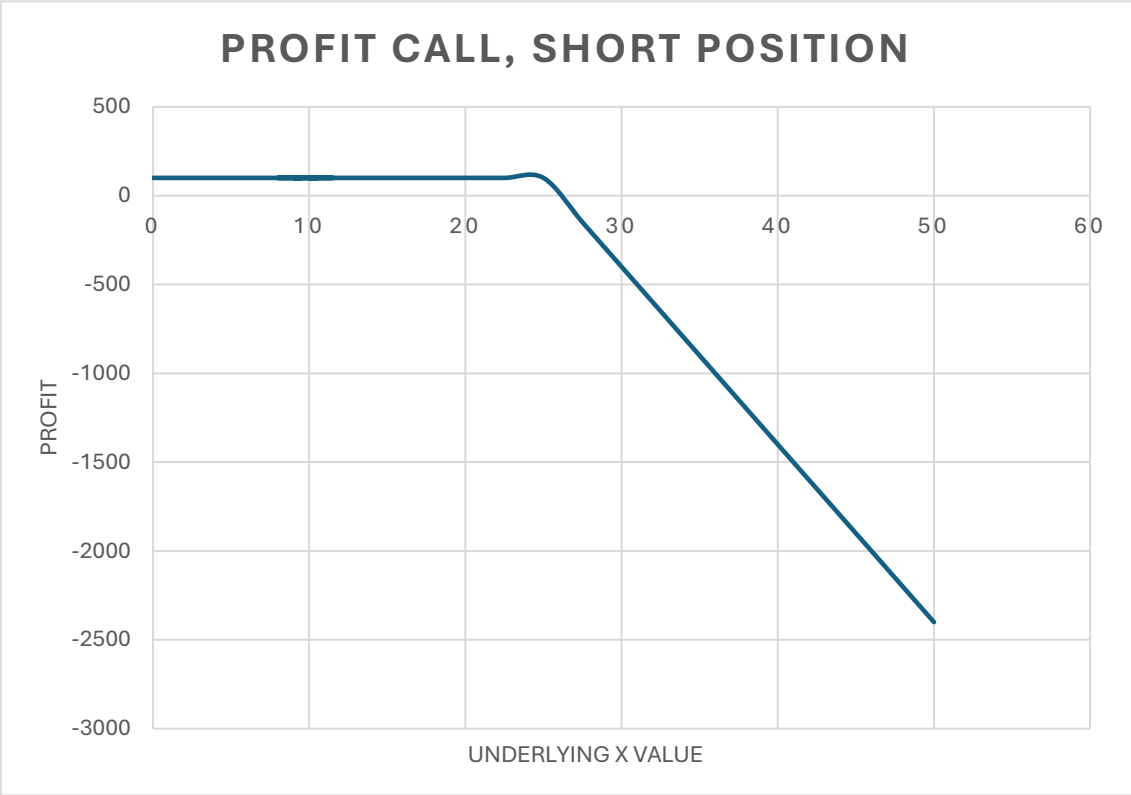
Supongamos la misma cantidad y tipo de opción del ejemplo anterior, pero esta vez venderemos la opción en lugar de comprarla, nos posicionaremos cortos (“short”). En este caso, nuestro beneficio se producirá cuando el valor de la acción este por debajo del “strike”, y las pérdidas llegarán cuando el valor esté por encima del “strike”.

Para calcular la formula del beneficio para esta estrategia, basta con cambiar el signo a la formula del apartado anterior. La recta resultante será la misma pero girada 180 grados alrededor del eje horizontal, y desplazada hacia arriba dos veces el valor de la prima.

Ganancias de prima (fijo): $100uds * 1€/ud = 100€$

Costes de las opciones: $100uds * \{25€\ (strike) - X\ value\}$

Para esta situación, los beneficios serán fijos, en el mejor de los casos solo ganaríamos las primas. Esta exposición, puede llegar a tener perdidas infinitas. Si el valor de la acción sube desproporcionadamente y el comprador ejecuta su opción, nos veremos obligados a comprarla a precio de mercado, y vendérsela a precio “strike”, asumiendo grandes pérdidas.



Gráfica 4.2

4.2.2. Opción de venta (“put”)

Una opción de venta adjudica a su comprador el derecho a vender un activo subyacente a un precio de strike previamente fijado durante la duración del contrato. Si el precio del subyacente es mayor al strike, la opción de venta se encontrará “out of the money”, ya que

será más lucrativo vender directamente a precio de mercado. Si por el contrario el precio de mercado es inferior al de strike, la opción se encontrará "in the money".

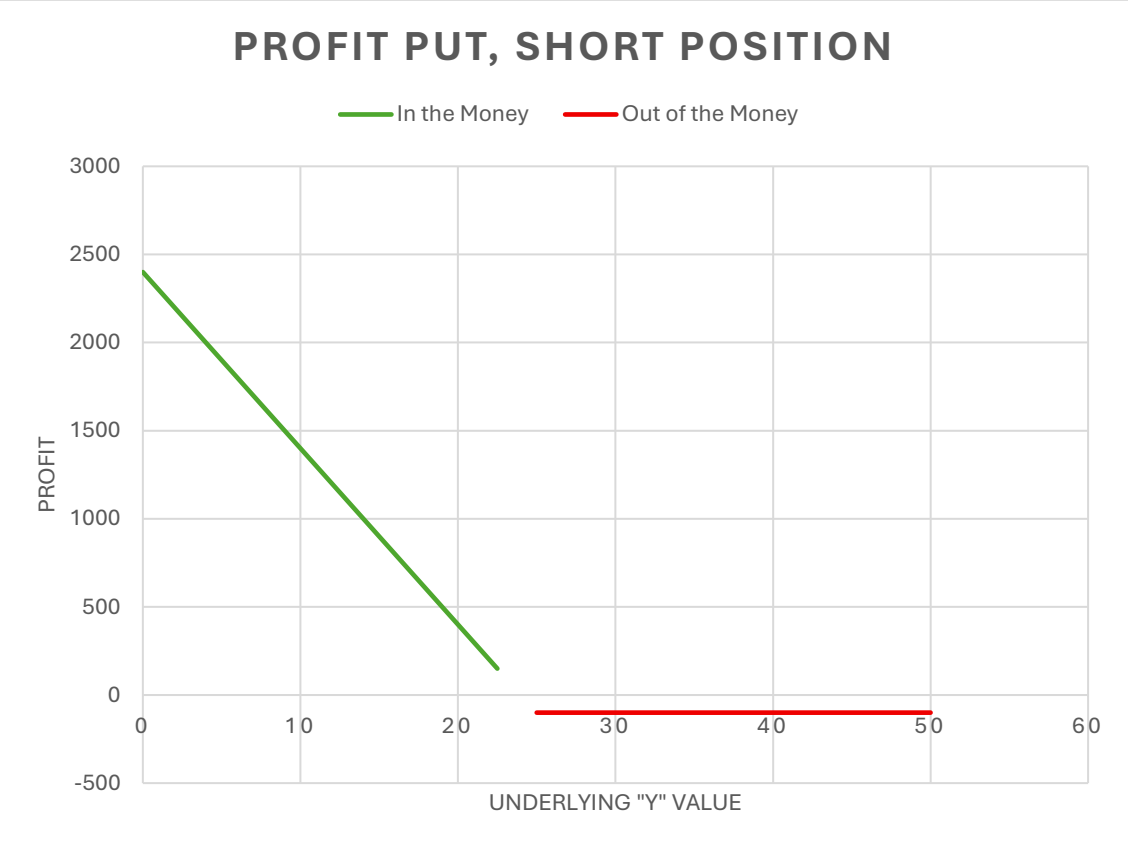
Ejemplo compra de "put" (posición corta, "short"):

Compramos 100 opciones de venta de una acción "Y" a strike 25€ y prima 1€ por opción. De nuevo encontramos dos posibles escenarios. En este caso si el valor del subyacente está por debajo del "strike", la acción estaría "in the money" y obtendríamos beneficio al ejecutarla. Por el contrario, si la acción es mayor que el "strike", no sería beneficioso ejecutar la acción ya que podríamos vender el subyacente directamente en el mercado a mayor precio. Perderíamos por tanto el valor de la prima.

Las ganancias en esta situación son limitadas, y las pérdidas se mantienen fijas siendo el valor de las primas.

Costes de primas (fijos): $100uds * 1€/uds = 100€$

Ganancias de las opciones: $100uds * \{25€\ (strike) - Y\ value\}$



Gráfica 4.3

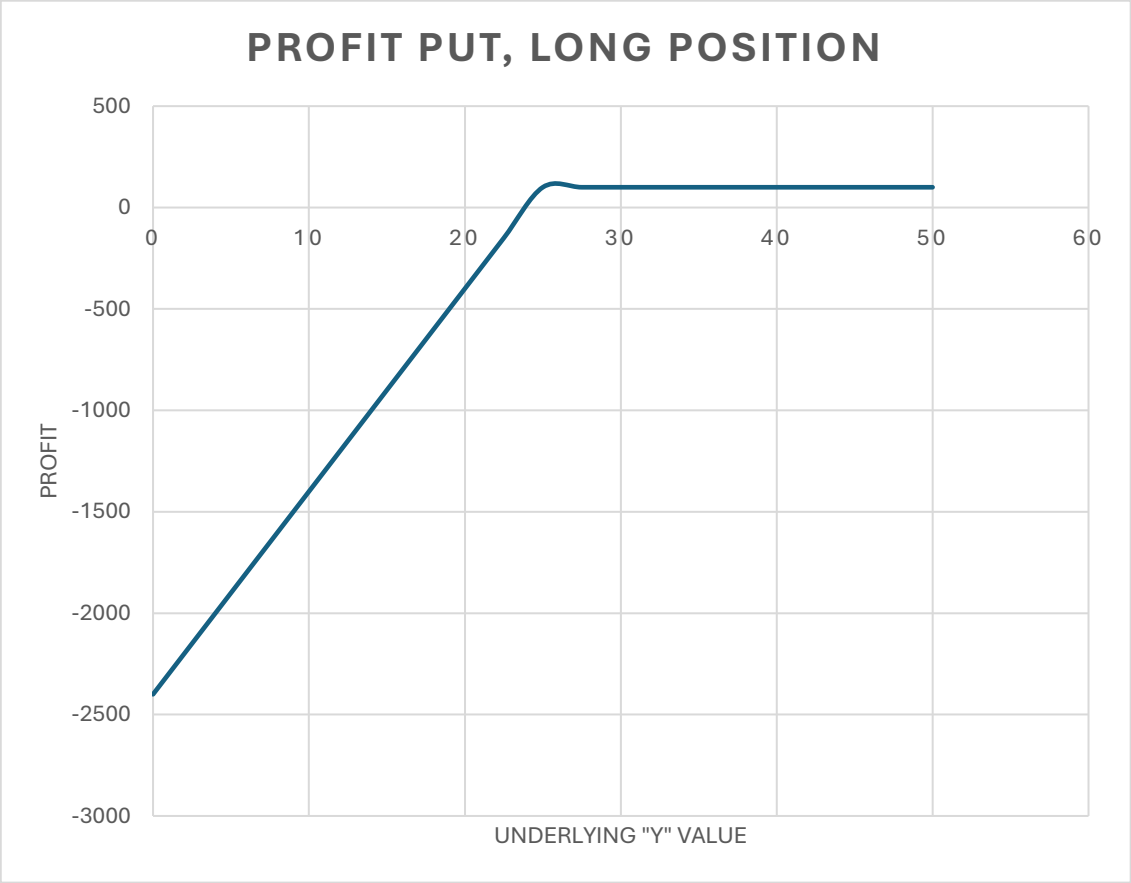
Ejemplo venta de "put" (posición larga, "long"):

Ahora se venderá las opciones en lugar de comprarlas, posicionándose en largo. Los beneficios llegarán en este caso cuando el valor de la acción "Y" se mantenga por encima del "strike". En este caso el comprador no ejecutaría la opción y ganaríamos las primas. Si por el otro lado, la acción cae por debajo del "strike", el vendedor ejecutaría la acción y

estaríamos obligados a comprarle el subyacente a un precio (“strike”) más elevado que en mercado, resultando en pérdidas.

Ganancias de primas (fijos): $100uds * 1€/uds = 100€$

Costes de las opciones: $100uds * \{Y\ value - 25€\ (strike)\}$



Gráfica 4.4

4.2.3. Cálculo de primas de opciones financieras

La prima de una opción financiera es el precio que el comprador de la opción ha de pagar para obtener el derecho de la opción. Su valor depende de varios factores, como el valor intrínseco (diferencia entre el strike y el spot), cuanto mayor es esta diferencia mayor es el precio de la opción, pero hay que tener en cuenta el signo de esta resta dependiendo de si se trata de una opción de venta o de compra. El tiempo a vencimiento tambien influye, resultando más cara la prima cuanto más lejano este el vencimiento de la opción. La volatilidad del subyacente afecta de la misma manera que el tiempo, siendo mayor la prima cuanta más volatilidad presente el activo. La tasa de interés libre de riego es otra variable crucial a la hora de calcular primas de opciones.

Existen varios modelos de cálculo de precio de opciones, en este trabajo se trabajará con el método “Black-Scholes-Merton”, en concreto su variable “Black-76”, la cual omite la influencia de dividendos ya que el subyacente de interés es una materia prima. Tambien se estudiará la posibilidad de analizar el cálculo de primas con el método de “Monte Carlo”, el cual funciona con simulaciones y es más preciso para opciones financieras americanas.

Método de Black-Scholes-Merton (Black-76):

Este método contempla cinco variables, el precio del spot, precio de strike, tiempo a vencimiento, tasa libre de riesgo y la volatilidad del subyacente. Este método calcula el

$$c = S_0\ N(d_1) - K\ e^{-rT} N(d_2)$$

$$p = K\ e^{-rT}\ N(-d_2) - S_0\ N(-d_1)$$

$$\text{where}\quad d_1 = \frac{\ln(S_0 / K) + (r + \sigma^2 / 2)T}{\sigma\sqrt{T}}$$

$$d_2 = \frac{\ln(S_0 / K) + (r - \sigma^2 / 2)T}{\sigma\sqrt{T}} = d_1 - \sigma\sqrt{T}$$

Imagen 4.1: NELOGICA Sistemas de Software. (2025). Entienda o Modelo Black-Scholes.

precio de la opción según el siguiente razonamiento: el precio de la prima será el beneficio si se ejerciese en ese instante (valor intrínseco) sumado al valor adicional por la incertidumbre del futuro. En este último término entran en juego las variables tiempo, volatilidad y tasa libre de riesgo en mayor medida.

Donde:

So ≡ Precio Spot

K ≡ Precio Strike

T ≡ Tiempo a vencimiento

σ ≡ Volatilidad

r ≡ Tasa de interés libre de riego

N ≡ Distribución normal

c ≡ Precio opción call

p ≡ Precio opción put

Se realizará un cálculo, a modo de ejemplo, de precio de opción de compra y venta usando este método. Tanto para este ejemplo como para el del método de Monte Carlo, se usarán los siguientes datos:

So = $100

K = $100

T = 1año

σ = 20%

r = 5%

Se aplican las fórmulas anteriores obteniéndose los siguientes resultados:

Precio opción compra Black-76 (c) = $10.45

Precio opción venta Black-76 (p) = $5.57

Método de Monte Carlo:

Este método es más indicado para opciones financieras americanas ya que tiene en cuenta el hecho de que estas se pueden ejercer en cualquier momento dentro de la vida del contrato, y no únicamente a vencimiento como las europeas. El método simula posibles escenarios en el tiempo calculando el valor de la opción en cada uno y obtiene un precio promedio después de descontarlo todo al presente. Para este método se ha utilizado un código en el programa MATLAB (véase el código en el Anexo 7.2). Para este método se utilizan los mismos parámetros que para el método Black-Scholes-Merton, pero se añade el número de simulaciones y los pasos temporales (para tener en cuenta las opciones americanas).

A continuación, se muestran los resultados de una simulación con los mismos valores del ejemplo del caso anterior. Se fija un numero de simulaciones de 10,000, y 100 pasos temporales:

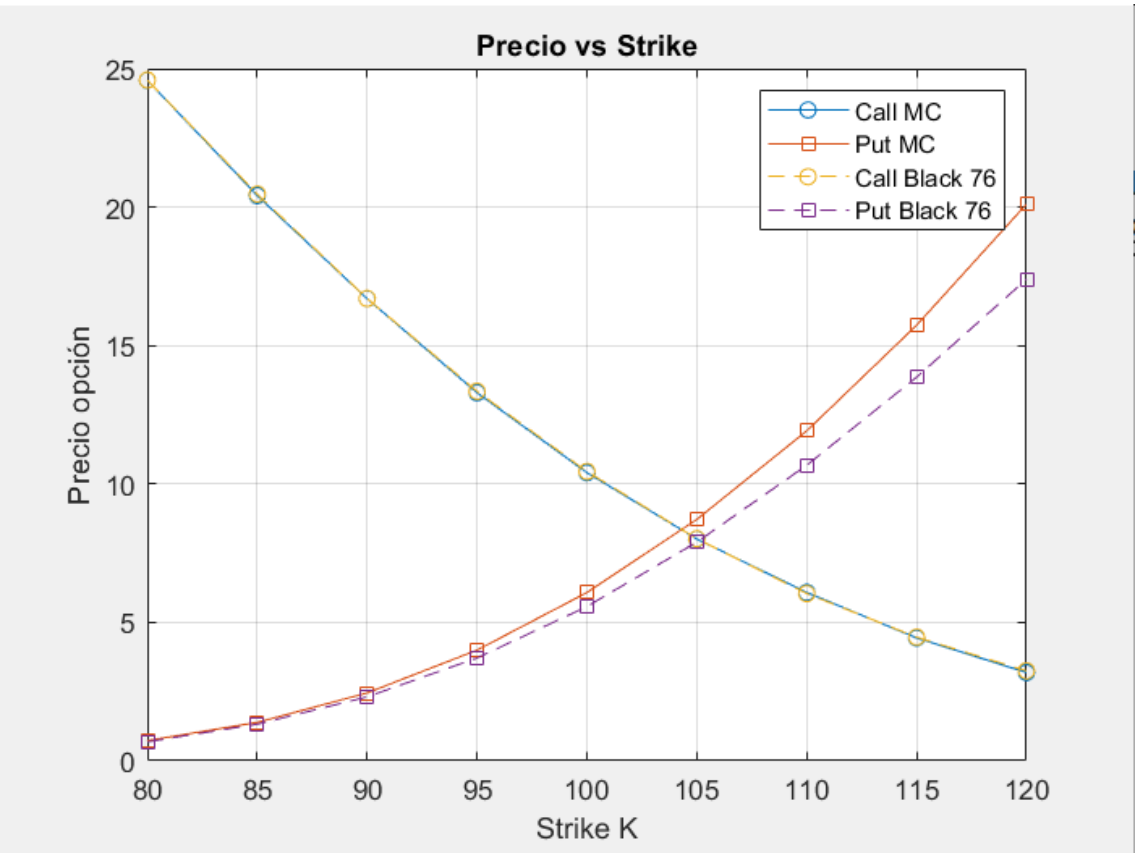
Precio opción compra Monte Carlo (c) = $10.3987

Precio opción venta Monte Carlo (p) = $6.0685

Comparación entre el método de Black-Scholes y Monte Carlo:

Con el objetivo de observar las diferencias entre métodos, se ha realizado un análisis grafico en el que se muestra la evolución del precio de las opciones calculadas con ambos métodos a medida que varían los parámetros (strike, vencimiento, volatilidad y tasa libre de riesgo). Nuevamente se usa de origen el caso de los ejemplos anteriores.

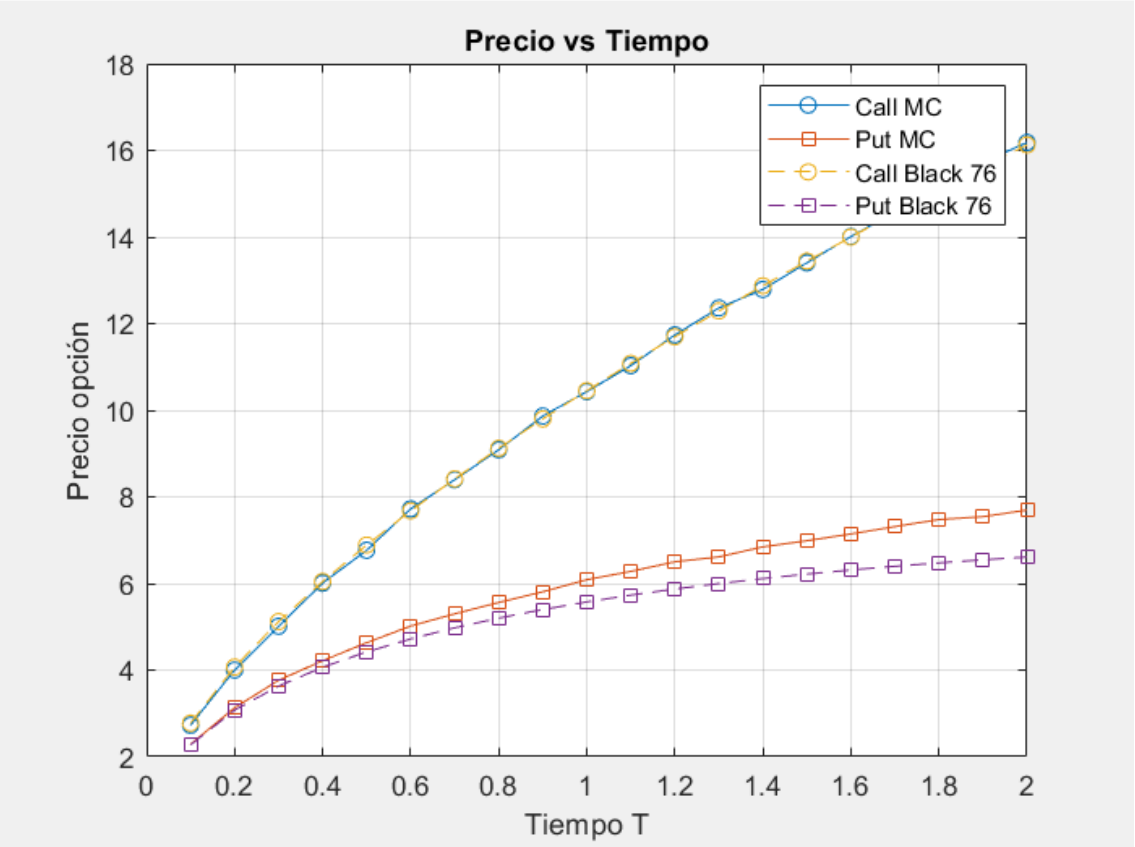
Variación del precio strike:



Gráfica 4.5

En esta gráfica se observa el comportamiento de la prima en función del strike. En las opciones de compra la prima aumenta cuanto mayor es el strike y en las opciones de venta ocurre lo contrario. Se aprecia una ligera diferencia entre métodos en el cálculo de las primas de las opciones de venta.

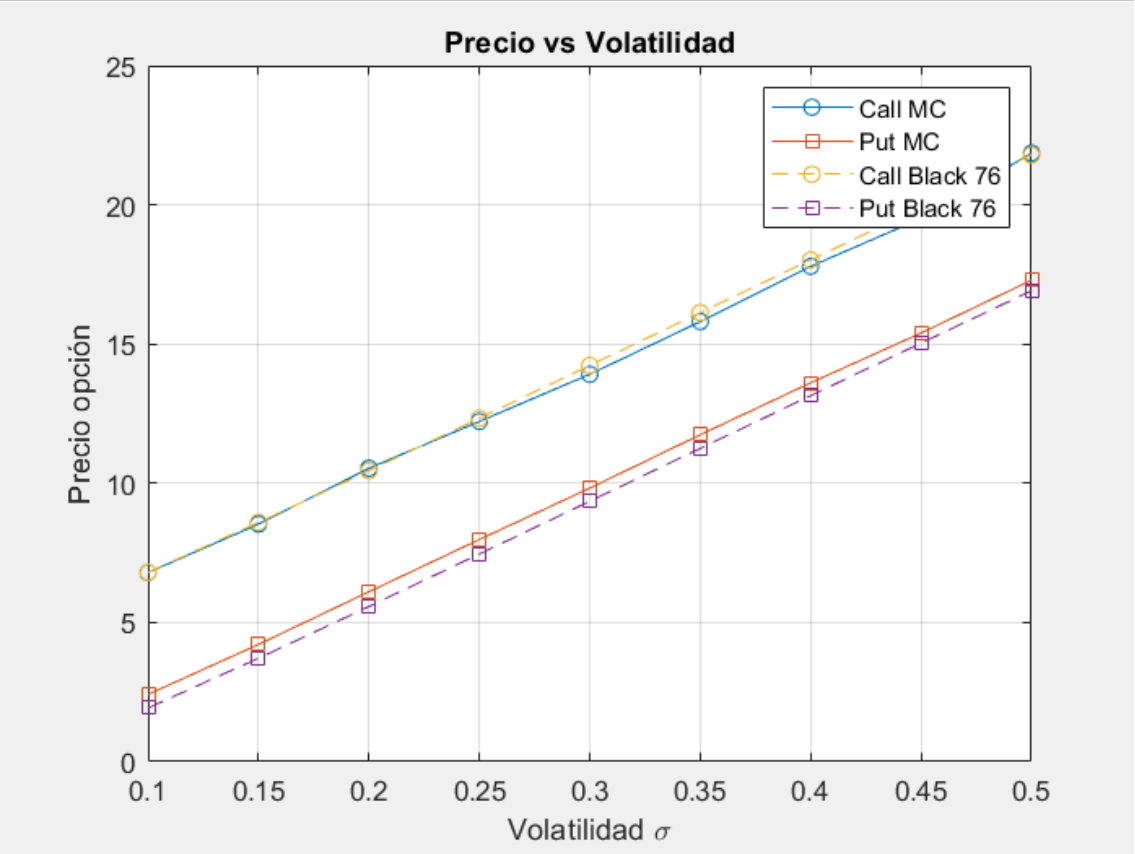
Variación de la fecha de vencimiento:



Gráfica 4.6

Con la variación de la fecha de vencimiento se observa un comportamiento logarítmico creciente. El crecimiento es mucho más pronunciado en el caso de las opciones de compra. El aumento de prima a medida que la duración de la opción aumenta se debe a que el comprador dispone de más tiempo para ejercer el derecho de la opción.

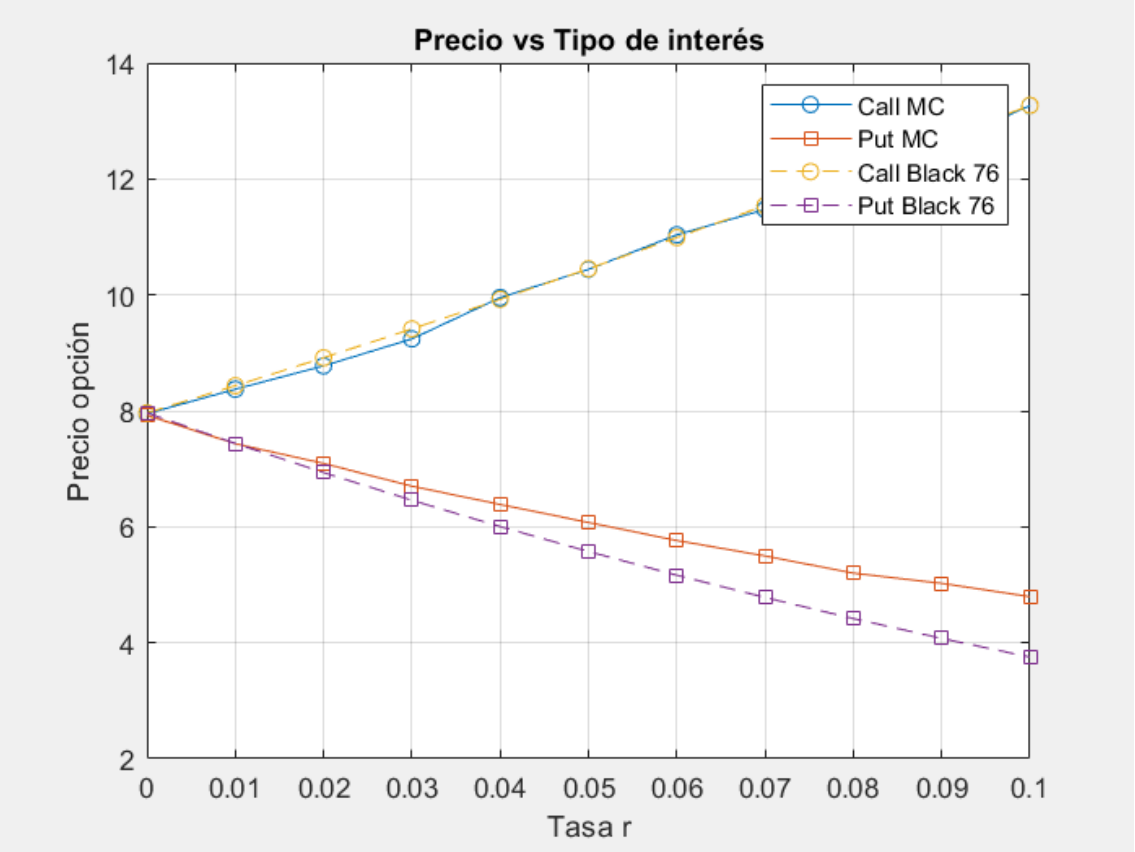
Variación de la volatilidad:



Gráfica 4.7

En el caso de la relación volatilidad y prima, se reconoce un claro comportamiento linear. También se detecta que la recta de las opciones de compra parte de un origen mayor al de las opciones de venta. La diferencia en volatilidad será uno de los factores principales que determine las diferencia de primas entre activos subyacentes.

Variación de la tasa de interés:



Gráfica 4.8

En esta gráfica se aprecian comportamientos completamente distintos entre tipos de opciones. A medida que la tasa libre de riesgo aumenta, disminuye el valor del dinero futuro, debido a un descuento a presente más fuerte. Esto provoca que el valor de pagar un strike en las opciones de compra sea menor (la prima sube) y el valor a recibir un strike en las opciones de venta tambien disminuya (la prima baja).

4.2.4. Letras griegas en opciones financieras

En el ámbito de las opciones financieras, las letras griegas son medidas que permiten cuantificar cómo varía el precio de una opción cuando cambian distintos factores de mercado. Son herramientas fundamentales para quienes gestionan y analizan carteras de derivados, ya que permiten comprender y anticipar la sensibilidad y exposición de una cartera ante variaciones del subyacente, del tiempo, de la volatilidad y de otros elementos.

En conjunto, las letras griegas permiten descomponer el comportamiento de una opción en distintos componentes de riesgo, ofreciendo una visión más completa de cómo podría evolucionar su valor en distintos escenarios.

Matemáticamente hablando, las letras griegas no son más que derivadas del precio de la opción respecto a una variable fundamental para el cálculo de este (precio del subyacente, tipo de interés, tiempo a vencimiento, etc).

Delta (Δ):

La delta mide cuánto cambia el precio de una opción cuando el precio del activo subyacente varía en una unidad. Por ejemplo, si una opción tiene un delta de 0.5, esto significa que, si el subyacente sube $1, el precio de la opción subirá aproximadamente $0.5, manteniendo constantes las demás variables. El delta de una "call" es positiva, lo que refleja que su valor aumenta cuando el subyacente sube, mientras que el de una "put" es negativa, ya que su valor aumenta cuando el subyacente baja.

Gamma (Γ):

Gamma mide la tasa de cambio del delta respecto al precio del subyacente. Dicho de otra forma, el gamma indica cómo de rápido se ajusta el delta a medida que el subyacente se mueve. Un gamma alto implica que el delta varía de forma más brusca con pequeños cambios en el subyacente, lo que es típico en opciones que están "in the money" y cerca de su vencimiento. Esto convierte a la gamma en una medida clave para gestionar riesgos no lineales.

Theta (Θ):

Theta representa la sensibilidad del precio de una opción al paso del tiempo ("time decay"). Generalmente, la theta es negativa para quien compra opciones, ya que cada día que pasa sin movimientos favorables disminuye el valor temporal de la prima. Para el vendedor de opciones, en cambio, la theta suele ser positiva, ya que el paso del tiempo juega a su favor.

Vega:

Vega mide la variación del precio de la opción ante cambios en la volatilidad implícita del subyacente. Una vega de 0.10 indica que, si la volatilidad implícita aumenta en un punto porcentual, el valor de la opción subirá diez centavos, siempre que el resto de los factores permanezcan constantes. Esto lo convierte en un indicador central para estrategias que buscan beneficiarse de cambios en la percepción de riesgo del mercado.

Rho (P):

Rho refleja la sensibilidad del precio de la opción a cambios en el tipo de interés libre de riesgo. Aunque suele tener un impacto menor en opciones de corto plazo, puede ser relevante en contratos con vencimientos largos, especialmente cuando hay movimientos significativos en las tasas de interés.

4.2.5. Estrategias con opciones financieras

Collar:

Una estrategia collar tiene como propósito fundamental limitar la exposición a pérdidas significativas a la vez que restringe las ganancias potenciales. La técnica se implementa manteniendo una posición en el activo subyacente, adquiriendo una opción de venta que asegura un precio mínimo de liquidación y, simultáneamente, emitiendo una opción de compra que obliga a vender el activo si se alcanza un umbral superior previamente establecido. El resultado es un rango acotado de rentabilidad, donde el inversor reduce el riesgo de pérdidas excesivas a costa de renunciar a beneficios extraordinarios. Este enfoque es frecuente en compañías energéticas, agrícolas y financieras que buscan garantizar márgenes estables en contextos de elevada volatilidad.

Straddle/Strangle:

Para inversores que esperan movimientos bruscos, independientemente del sentido de la fluctuación, se utilizan combinaciones como el “straddle”, que consiste en comprar simultáneamente una opción de compra y una de venta con el mismo precio de ejercicio y vencimiento. Esta estrategia genera beneficios si el activo subyacente se mueve con intensidad, pero implica un coste elevado en primas. Una variante más barata es el “strangle”, que mantiene la misma lógica, pero con precios de ejercicio diferentes para la call y la put, lo que reduce el gasto inicial a costa de exigir movimientos de mayor magnitud para ser rentable.

Spreads:

La estrategia “spread” combina la compra y venta de opciones sobre el mismo activo con distintos precios de ejercicio y/o vencimientos. Por ejemplo, el “bull call spread” se emplea cuando se espera una subida moderada del subyacente, consiste en comprar una call con un precio de ejercicio bajo y vender otra call con un precio más alto, reduciendo el coste a costa de limitar el beneficio máximo. En sentido contrario, el “bear put spread” permite beneficiarse de caídas moderadas, combinando la compra de una put más cara y la venta de otra put con un precio de ejercicio inferior.

4.3. Contratos forward

Un contrato forward es un acuerdo privado entre dos partes para el intercambio de un activo a un precio acordado y en una fecha futura previamente fijada. En el momento de la firma del contrato, no se realiza ningún pago o entrega del activo. El intercambio se produce únicamente el día acordado en el contrato. Los forwards al ser acuerdos privados entre partes no cotizan en ningún mercado, son exclusivamente contratos “over the counter”. Al ser de carácter privado, estos contratos tienen una capacidad de personalización generosa, además de no tener mucha regulación gubernamental.

Los forwards son herramientas financieras usadas para estrategias. En primer lugar, estos ofrecen una gran cobertura ante la fluctuación de precios de activos, desde materias primas, acciones, bonos, tipos de interés... En segundo lugar, tambien son utilizados como arma para la especulación, con la que "traders" buscan beneficiarse del precio futuro de un activo.

Ejemplo de contrato forward:

Supongamos que una empresa petrolera está preocupada por la posible bajada del precio del crudo. Esta empresa contacta con un comprador y ambos acuerdan intercambiar en 5 meses, 10,000 barriles de petróleo a $75 el barril. La empresa petrolera se asegura que, aunque el precio del barril caiga por debajo de $75, recibirá los $75 previamente acordados. De la misma forma, el comprador se asegura que, aunque el precio del barril suba por encima de $75, él no pagará esa diferencia.

4.3.1. Estrategias con contratos forward

Existen multitud de formas con las que ganar cobertura en una cartera usando contratos forwards.

Cobertura larga y corta:

La cobertura larga ("long hedge") y corta ("short hedge") son el tipo de estrategia más sencilla con este tipo de contratos. La cobertura corta es interesante para el productor o vendedor del activo, y la larga es beneficiosa para el comprador. Ambas se basan en la compra (cobertura larga) o venta (cobertura corta) de un forward para cubrirse contra fluctuaciones en el precio del activo. Al vender un forward (cobertura corta) se busca protección ante una posible bajada del precio del activo, y ocurre al contrario con la compra de un forward (cobertura larga), donde se estará protegido ante subidas del precio del subyacente.

El inconveniente de este tipo de estrategia es que los posibles beneficios que obtendríamos al encontrarnos con fluctuaciones de precios beneficiosas para nuestra exposición estarán condicionados por el contrato forward.

Cobertura parcial:

En este caso, realizaremos cobertura únicamente en una parte del volumen del activo, dejando parte del volumen expuesto al mercado "spot". De esta manera, aunque dejemos parte de la carga desprotegida, podremos obtener grandes beneficios si el mercado se mueve en nuestro favor.

Forward spread:

Esta estrategia es más un modo de especulación que un método de cobertura. Consiste en comprar y vender un forward con fechas de vencimiento y precios de strike distintos, creando una diferencia ("spread") con la que se obtendrá beneficios a medida que esa diferencia aumente o disminuya (depende de la posición). Con esta estrategia nos exponemos únicamente a movimientos relativos entre dos contratos, y no ha movimientos absolutos del mercado.

Es común también incluir en este tipo de estrategias otros activos que no sean el activo subyacente de interés. Por ejemplo, incluir en la estrategia de "spread", el precio del petróleo, para jugar con la diferencia de precios entre gas y crudo. O crear una posición "spread", comprando y vendiendo forwards de diferentes divisas, para cubrirte de la fluctuación euro/dólar.

4.4. Futuros financieros

Los futuros financieros son contratos similares a los forwards, con varias diferencias. Siguen siendo acuerdos en los que se fija una cantidad y precio de intercambio de un activo en una fecha futura. Una de las grandes diferencias es que los contratos de futuros se liquidan a diario ("marked to market"), esto ayuda a proteger a ambas partes frente a posibles impagos debidos a grandes pérdidas. Además, los contratos de futuros cotizan en los mercados bursátiles, pudiendo ser intercambiados como otro activo más.

En los contratos de futuros, es común que en el día de expiración del contrato no se produzca ninguna entrega física de bienes ("cash settlement"), y se liquide únicamente con dinero. También es raro que un contrato de futuros llegue a su fecha de expiración, ya que suelen liquidarse y cerrarse antes de dicha fecha.

Ejemplo de futuro financiero:

Compramos un futuro para recibir 10,000 MMbtu a $3/MMbtu para dentro de 2 meses. Al final del día el precio del gas baja a $2.5MMbtu, nuestra posición tendría unas pérdidas de $5,000. Si al siguiente día, el gas cierra a $3/MMbtu, nuestra posición obtendría unas ganancias de $5,000. Al siguiente día, el gas vuelve a subir a $3.5MMbtu, nuestra posición sumaria otros $5,000 en ganancias. Nuestra posición hasta la fecha contaría con unas ganancias de $5,000.

4.4.1. Estrategias con futuros financieros

Las estrategias de cobertura con futuros funcionan de la misma manera que con los forwards. La diferencia más grande reside en que los contratos futuros suelen liquidarse antes de la fecha de vencimiento, y los forwards a menudo requieren de entrega física del activo subyacente.

4.5. Swaps

Los swaps son un contrato financiero entre dos partes mediante el cual se acuerda el intercambio de flujos de efectivo futuros. Son acuerdos extrabursátiles (OTC). Al igual que en la mayoría de derivados financieros, es importante definir un periodo de tiempo y un volumen de contrato al crear un "swap". Según el subyacente del que se componga el contrato, se distinguen varios tipos de swaps, los más comunes son los de tipos de interés, divisas, materias primas, etc....

Swap de tipos interés:

En este tipo de contrato las dos partes buscan intercambiar tipos de interés. Una parte busca cambiar un tipo de interés fijo por uno variable, mientras que la contraparte quiere lo contrario. De esta manera pueden conseguir exposición al tipo de interés que crean que pueda generarles más beneficios.

Swaps de divisas:

La finalidad de estos swaps es la de neutralizar una exposición a una moneda por otra. Si una empresa tiene una deuda en dólares y teme una subida de este, puede firmar un contrato swap con el que intercambie esa obligación en dólares por otra en diferente divisa (euro, por ejemplo). La contraparte de este contrato seria la que entraría a asumir la exposición al dólar y perder la exposición al euro.

Swaps de materias primas:

Probablemente este sea el tipo de swap que más aplica al tema de estudio. Dentro de este tipo de contratos, podemos diferenciar entre dos tipos dependiendo de lo que se intercambie.

Se puede querer intercambiar el precio fijo sobre una materia prima a cambio de su precio de mercado ("spot").

Otro tipo de contrato puede definir el intercambio de la diferencia de precios entre dos índices de una materia prima, como pueden ser el "Brent" y el "West Texas Intermediate" en referencia al petróleo.

5. Derivados financieros en trading de gas natural

En este último apartado, se intentará conectar los bloques tratados anteriormente. Se busca encontrar el valor de primas para posibles opciones financieras con gas natural y GNL como subyacente. Después se analizará la coherencia y posibles rendimientos de los resultados para llegar a conclusiones. Además, se intentará construir estrategias de cobertura con los derivados tratados con anterioridad, usando las opciones previamente creadas (si resultan ser viables), buscando la mitigación del riesgo a diferentes situaciones (fluctuaciones en el precio de la materia prima, divisas...).

5.1. Opciones financieras de gas natural y GNL

Para el cálculo de primas se usará los métodos de Black-Scholes y Monte Carlo explicados con anterioridad. Con el objetivo de obtener más resultados y estudiar un rango de casos más amplio se calcularán primas para GNL (referenciado al mercado asiático, "JKM"), gas natural Henry Hub (Estados Unidos) y gas natural europeo (referenciado en mayor medida al "TTF").

El primer paso consiste en el cálculo de los parámetros integrados en las fórmulas. Se empezará con la volatilidad. Se calculará la volatilidad de los activos, se aplicará la tasa de interés libre de riego que corresponda a cada situación, y se fijará (en principio) una duración de 1 año. El margen estará en variar el precio strike y observar diferentes valores de primas.

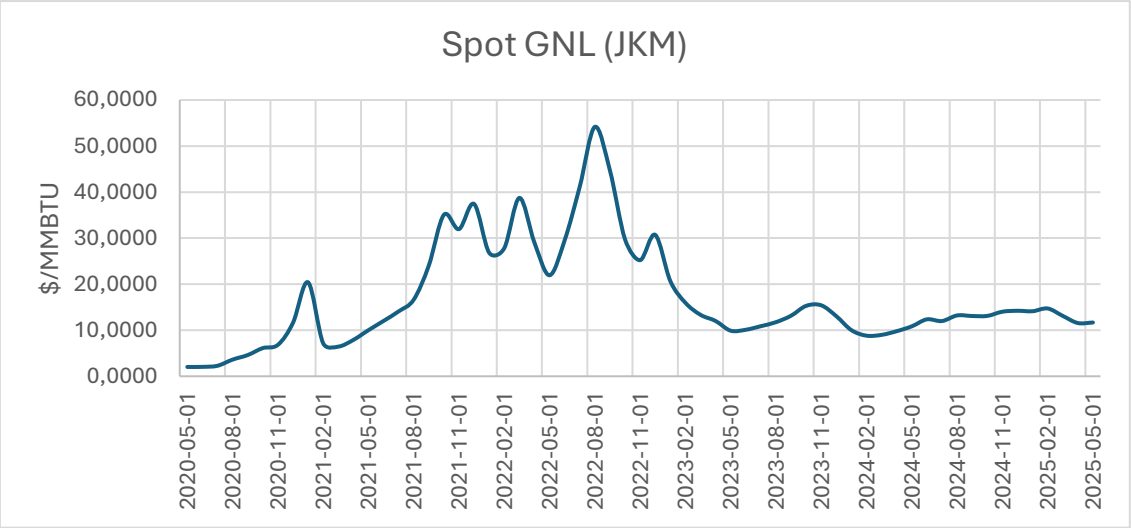
5.1.1. Opciones con subyacente spot

En primer lugar, se estudiarán los valores spot de los tres activos mencionados antes (GNL, Henry Hub y TTF). Aunque no es común incluir el spot en derivados (en materias primas se suele usar futuros), se quiere analizar el comportamiento de los modelos con este tipo de activos. El objetivo es llegar a valores de primas y estudiar la viabilidad de las opciones, ver si los resultados son coherentes y poder compararlos con los del activo futuro.

<u>Spot GNL (JMK):</u>

Para los cálculos de la volatilidad del spot de GNL se ha usado como fuente la "Federal Reserve Economic Data". A continuación, se muestra la gráfica del precio del GNL referenciado al JMK (Hub asiático) ya que es un punto de referencia clave para el mercado de GNL tanto en Asia como en el resto del mundo.

Los cálculos de la volatilidad se han hecho con los retornos logarítmicos (método indicado para finanzas) de los precios mensuales del GNL. Una vez obtenidos, se ha usado el comando "STDEV.S" en Excel para obtener la variación mensual y por último se ha anualizado multiplicando por la raíz cuadrada de 12.



Gráfica 5.1: Federal Reserve Bank of St. Louis. (s.f.). FRED Economic Data.

Volatilidad del GNL (5 años) = 89.43%

Para la selección de la tasa libre de riesgo, se escogerá el rendimiento del bono estadounidense (U.S Treasury Yield) a 1 año (se podrá cambiar a 6 meses o 2 años si procede) ya que es la duración que en principio se asignará a la opción. Se escoge este bono porque los contratos de GNL que aplican a estos datos suelen estar referenciados en dólares.

U.S 6-month bond yield = 4.08%

U.S 1-year bond yield = 3.94%

U.S 2-year bond yield = 3.76%

Una vez obtenidos la volatilidad y la tasa de interés faltan por determinar duración del contrato y precio strike. El tiempo, como se ha mencionado antes, se fijará en un año, también se analizarán resultados con vencimientos más cortos (6 meses) y más largos (2 años).

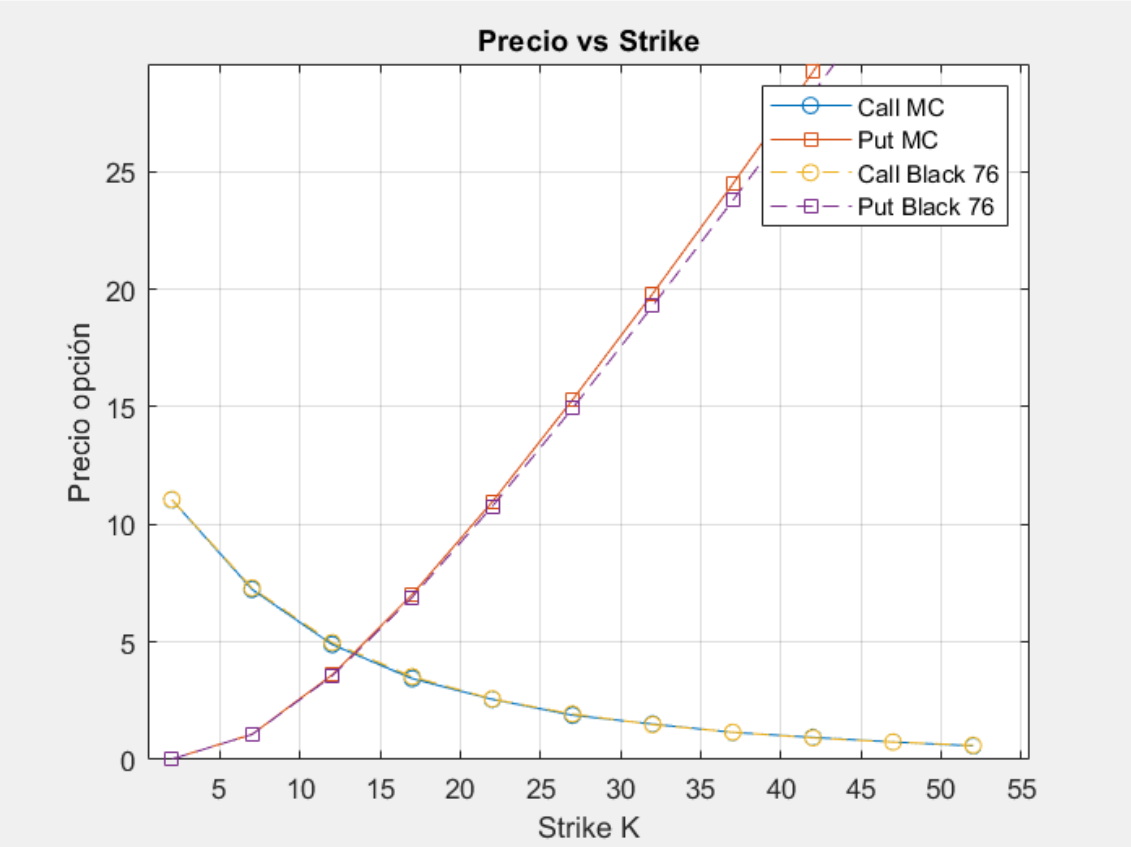
La elección del precio strike es la más determinante. Para un análisis más completo de la prima se utilizará un rango extenso de precios (entre mínimo a máximo histórico), para crear una gráfica que represente el precio de la prima en función del precio strike.

Como precio spot se usará el precio spot del GNL (JMK) del mes de junio del año 2025, el siguiente dato al último usado para calcular la volatilidad.

Precio spot GNL (JMK) junio 2025 = $12.96/MMBTU

Al tratarse de contratos referidos a dólares, se entiende que la opción resultante debe ser de tipo americana, no obstante, también se tratará como una opción europea y por tanto se usarán ambos métodos de cálculo de primas.

En la gráfica se aprecia que la zona de interés realista es la relativamente cercana al strike. Si en opciones de compra se elige un strike muy por debajo del spot, o en opciones de venta se fija un strike significativamente superior al spot, la prima de dichas opciones será elevada y no se podría obtener beneficio. También se aprecia una diferencia mínima entre los dos métodos de cálculo.



Gráfica 5.2

En la gráfica se aprecia que la zona de interés realista es la relativamente cercana al strike. Si en opciones de compra se elige un strike muy por debajo del spot, o en opciones de venta se fija un strike significativamente superior al spot, la prima de dichas opciones será elevada y no se podría obtener beneficio. También se aprecia una diferencia mínima entre los dos métodos de cálculo.

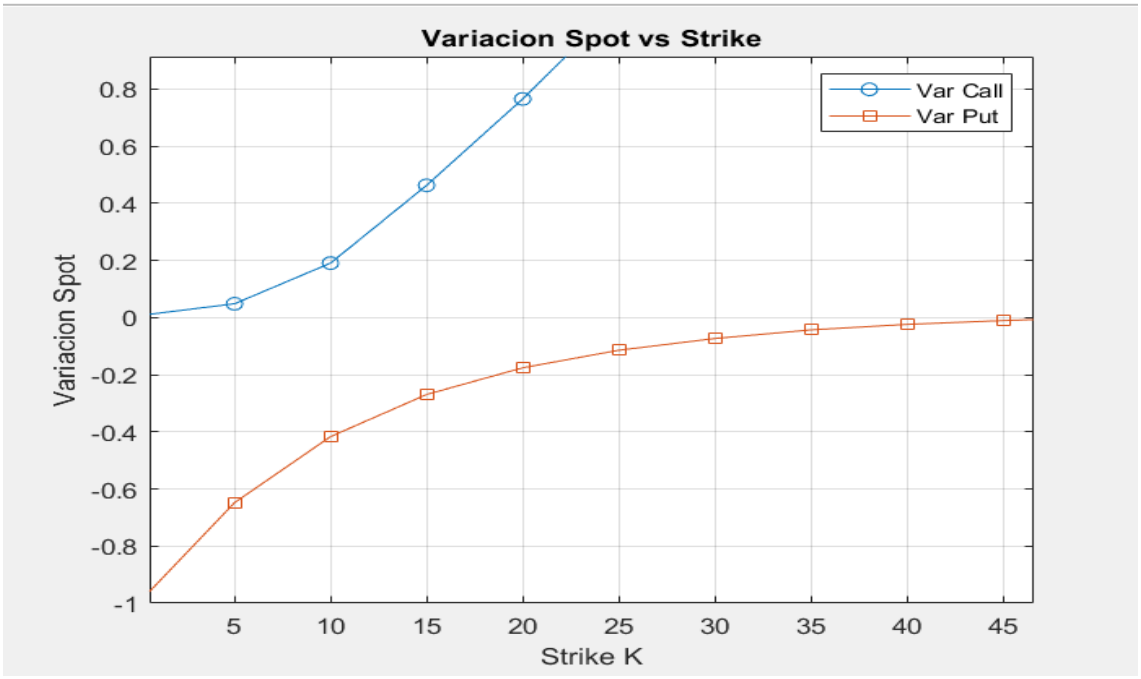
Además de una gráfica comparando primas en función de precios strike, se incluye una tabla con strikes significativos:

Método	Tipo	Strike	Tiempo	Prima	Variación Spot
Black76	Call	$ 10,96	1	**$ 5,37**	26,00%
Black76	Call	$ 12,96	1	**$ 4,64**	35,80%
Black76	Call	$ 14,96	1	**$ 4,04**	46,60%
Black76	Put	$ 10,96	1	**$ 2,94**	-38,12%
Black76	Put	$ 12,96	1	**$ 4,14**	-31,94%
Black76	Put	$ 14,96	1	**$ 5,46**	-26,70%
MonteCarlo	Call	$ 10,96	1	**$ 5,27**	25,23%
MonteCarlo	Call	$ 12,96	1	**$ 4,56**	35,19%
MonteCarlo	Call	$ 14,96	1	**$ 4,07**	46,84%
MonteCarlo	Put	$ 10,96	1	**$ 2,96**	-38,27%
MonteCarlo	Put	$ 12,96	1	**$ 4,18**	-32,23%
MonteCarlo	Put	$ 14,96	1	**$ 5,51**	-27,08%

Tabla 5.1

La tabla muestra primas con strikes cercanos al spot e incluso con el valor spot. Se ha añadido una columna donde se refleja el porcentaje en el que debería variar el precio del GNl para obtener beneficio. Esta relación indica el porcentaje que debería subir (en caso de las call) o bajar (para las put) el activo subyacente para que las opciones comiencen a ser rentables y generen beneficios en el momento de ejercerlas.

Para identificar de una manera más clara el precio de strike que reduce al máximo el valor de variación del spot para que la opción sea rentable (última columna de la tabla), se ha configurado una gráfica en la que se muestra el valor de la variación del spot en función del strike:



Gráfica 5.3

La gráfica muestra resultados muy contundentes. Se aprecia claramente que las opciones que requieren menos cambios en el precio spot para dar beneficios, son las que poseen un strike muy alejado al precio spot inicial, además de tener una prima muy elevada, ya que estas se encontrarían "in the money" en el momento inicial. Con estos resultados y teniendo en cuenta que el objetivo del trabajo es buscar cobertura en contratos de gas a largo plazo, deja a estas opciones financieras fuera de juego. No obstante, estas opciones podrían llegar a ser útiles para fines completamente especulativos.

Como ayuda para analizar estos resultados se ha calculado también la volatilidad del GNL en el último año, para valorar si esas fluctuaciones son posibles o improbables.

Volatilidad del GNL (último año) = 23.42%

Al comparar la volatilidad del GNL del último año con las fluctuaciones que debería sufrir el precio del GNL para que las opciones potenciales (destacadas en verde) acaben siendo lucrativas, se ve que la volatilidad es ligeramente inferior. Para plasmar estos resultados en magnitudes de riego, se calculará la probabilidad de que el precio del GNL suba o baje en el siguiente año (la duración de la opción) el porcentaje requerido. Para ello se aproximará el problema a una distribución normal.

Probabilidad de que callMC_Strike10.96 (volatilidad 5 años) = 37.9%

Probabilidad de que callMC_Strike10.96 (volatilidad 1 año) = 66.2%

Probabilidad de que putMC_Strike14.96 (volatilidad 5 años) = 38.3%

Probabilidad de que putMC_Strike14.96 (volatilidad 1 año) = 32%

Las probabilidades de obtener beneficios son bajas salvando la de la opción de compra con strike de $10.96 calculada con los datos del último año. Una vez se ha obtenido estos resultados, se puede concluir que estas opciones no resultarían muy beneficiosas a ese vencimiento.

Como estudio adicional se reducirá la duración de las opciones a 6 meses, también se planteó aumentarla a 2 años, pero los resultados eran peores que los anteriores.

Método	Tipo	Strike	Tiempo	Prima	Variación Spot
Black76	Call	$ 10,96	0,5	**$ 4,18**	16,82%
Black76	Call	$ 12,96	0,5	**$ 3,32**	25,62%
Black76	Call	$ 14,96	0,5	**$ 2,64**	35,80%
Black76	Put	$ 10,96	0,5	**$ 1,95**	-30,48%
Black76	Put	$ 12,96	0,5	**$ 3,05**	-23,53%
Black76	Put	$ 14,96	0,5	**$ 4,34**	-18,06%
MonteCarlo	Call	$ 10,96	0,5	**$ 4,11**	16,28%
MonteCarlo	Call	$ 12,96	0,5	**$ 3,28**	25,31%
MonteCarlo	Call	$ 14,96	0,5	**$ 2,60**	35,49%
MonteCarlo	Put	$ 10,96	0,5	**$ 1,97**	-30,63%
MonteCarlo	Put	$ 12,96	0,5	**$ 3,07**	-23,67%
MonteCarlo	Put	$ 14,96	0,5	**$ 4,39**	-18,44%

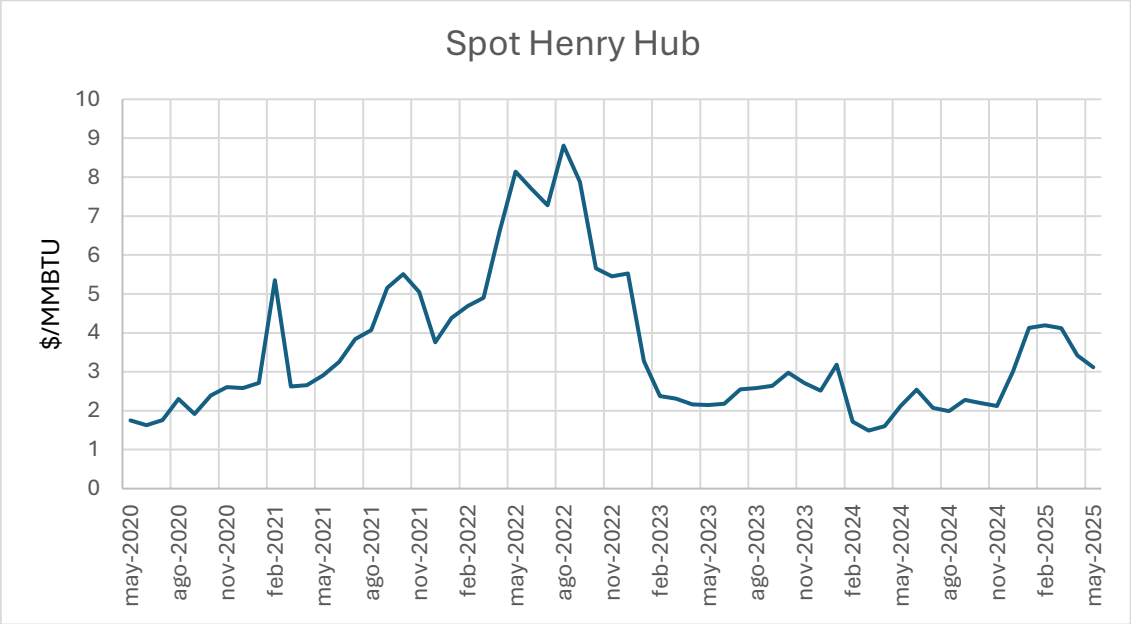
Tabla 5.2

Volatilidad GNL (últimos 6 meses) = 26.34%

Cambiando la duración del contrato a 6 meses (y el valor de la tasa libre de riego), los resultados son semejantes a los de un 1 año.

Spot Henry Hub:

En el caso de los datos del Henry Hub, se han obtenido a través de "U.S Energy Information Administration". Para el cálculo de la volatilidad se utilizará el mismo método que con el caso anterior.



Gráfica 5.4: International Energy Agency (IEA). (2024). Gas Market Report

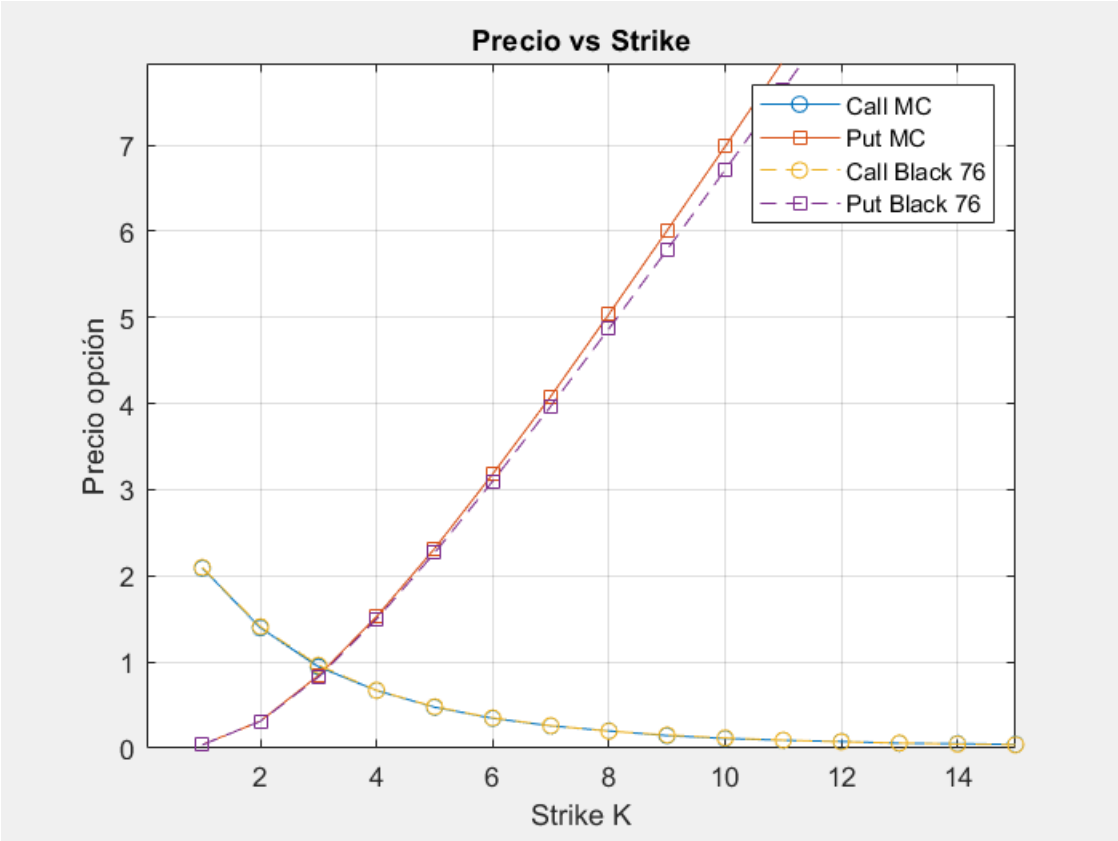
Volatilidad Henry Hub (5 años) = 77.65%

Para la tasa libre de riesgo se volverá a usar el bono americano a un año. La duración de las opciones se mantiene en 1 año.

U.S 1-year bond yield = 3.94%

Como precio spot se seguirá usando el siguiente dato al ultimo usado para calcular la volatilidad:

Precio Henry Hub spot junio 2025 = $3.02/MMBTU



Gráfica 5.5

De esta gráfica se sacan conclusiones similares a las del caso anterior.

Método	Tipo	Strike	Tiempo	Prima	Variación Spot
Black76	Call	$ 2,02	1	**$ 1,40**	13,25%
Black76	Call	$ 3,02	1	**$ 0,95**	31,46%
Black76	Call	$ 4,02	1	**$ 0,67**	55,30%
Black76	Put	$ 2,02	1	**$ 0,32**	-43,71%
Black76	Put	$ 3,02	1	**$ 0,84**	-27,81%
Black76	Put	$ 4,02	1	**$ 1,51**	-16,89%
MonteCarlo	Call	$ 2,02	1	**$ 1,38**	12,62%
MonteCarlo	Call	$ 3,02	1	**$ 0,93**	30,92%
MonteCarlo	Call	$ 4,02	1	**$ 0,67**	55,30%
MonteCarlo	Put	$ 2,02	1	**$ 0,32**	-43,84%
MonteCarlo	Put	$ 3,02	1	**$ 0,85**	-28,08%
MonteCarlo	Put	$ 4,02	1	**$ 1,54**	-17,80%

Tabla 5.3

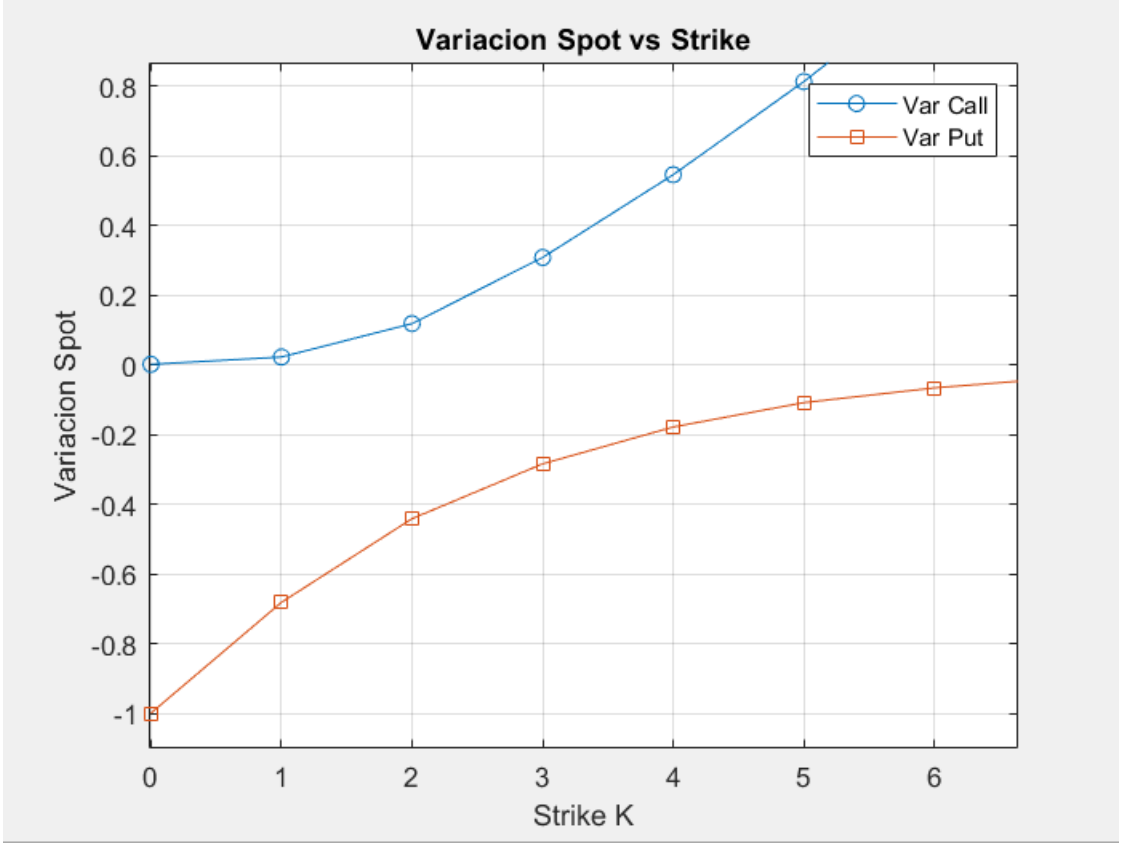
Volatilidad Henry Hub (último año) = 59.97%

De nuevo se destacan en verde las opciones más atractivas dentro de la tabla, y al tratarse del Henry Hub (americano) se seleccionan las calculadas con el método de Monte Carlo (opciones americanas), aunque se sigue sin observar diferencias notables entre métodos. En este caso, sorprendentemente todas las opciones de la tabla podrían llegar a ser interesantes, ya que la volatilidad del Henry Hub en el último año es elevada y mayor a cualquier valor de la última columna de la tabla.

Si se toma el precio actual (agosto de 2025) del futuro del Henry Hub con entrega en junio de 2026 como el precio aproximado del Henry Hub spot en el vencimiento de las opciones, se puede analizar que opciones serían más interesantes.

Precio futuro Henry Hub (Jun-26) (06/2025) = $3.67

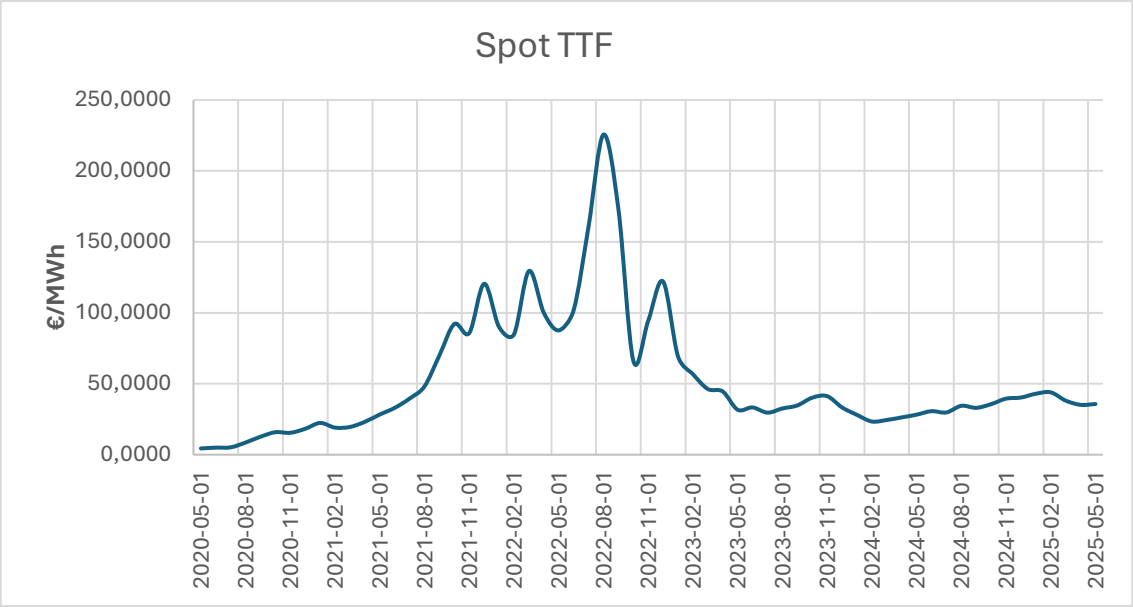
A ese precio del gas llegado el vencimiento de las opciones, la única opción con la que se obtendría beneficio seria la opción de compra con strike $2.02 y prima $1.38, y se obtendrían unas ganancias de $0.27 por opción. Esto supondría un beneficio cercano al 8%, un retorno bastante atractivo.



Gráfica 5.6

Spot gas natural europeo (TTF):

Para el TTF se han usado datos de “Federal Reserve Economic Data”, al estar referida en “US$/MMBTU”, se ha tenido que hacer el cambio a “€/MWh”, para ello se ha usado la cotización del euro/dólar correspondiente a cada dato histórico del TTF.



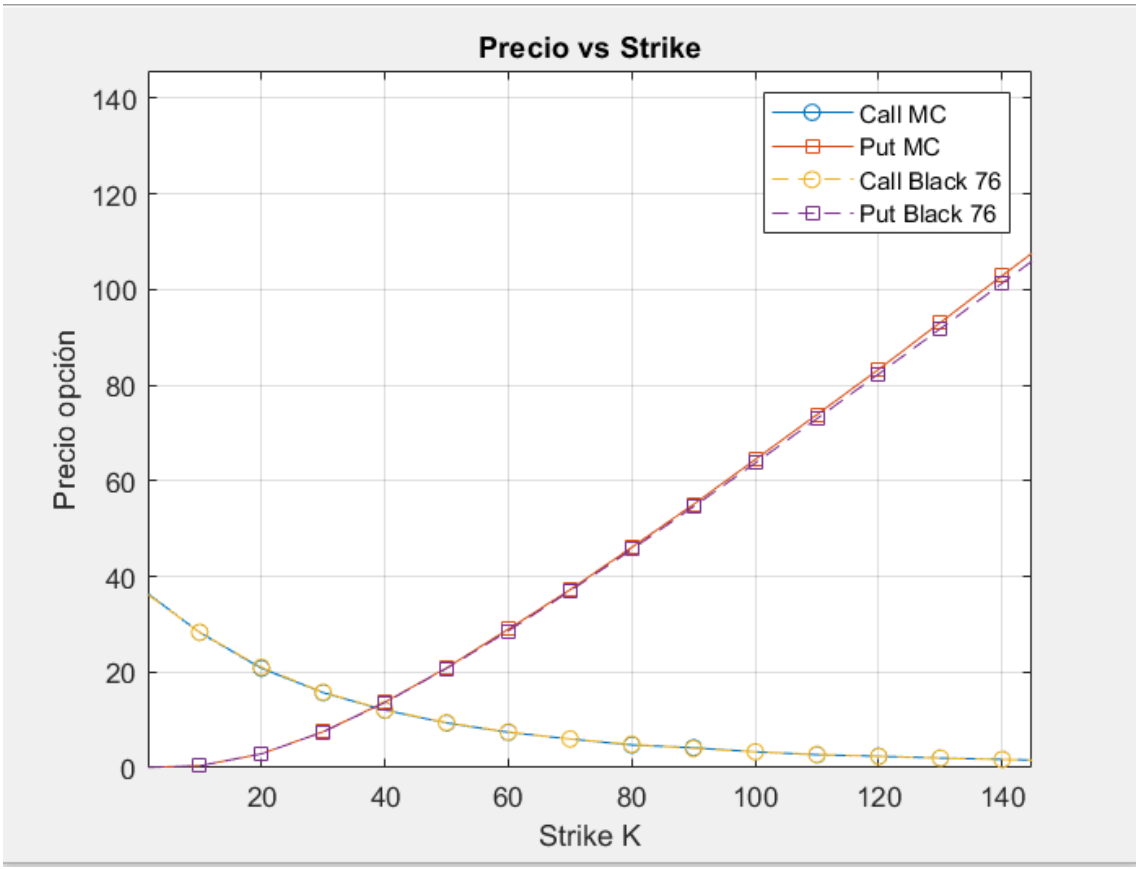
Gráfica 5.7: Federal Reserve Bank of St. Louis. (s.f.). FRED Economic Data.

Volatilidad gas natural europeo (5 años) = 86.15%

Precio gas natural spot junio 2025 = 37.79€/MWh

Para el caso del gas europeo, como tasa de interés libre de riesgo se usa el bono alemas a 1 año.

Bono alemán a 1 año = 1.91%



Gráfica 5.8

Se continua sin ver diferencia apenas entre métodos de cálculo. A pesar de que no se aprecia diferencia entre métodos, como el activo subyacente en este caso es gas europeo, se tendrá como referencia de resultados los cálculos con el método de Black-Scholes, indicadas para opciones europeas.

Método	Tipo	Strike	Tiempo	Prima	Variación Spot
Black76	Call	€ 32,12	1	**€ 14,93**	24,51%
Black76	Call	€ 37,79	1	**€ 12,84**	33,98%
Black76	Call	€ 43,46	1	**€ 11,10**	44,37%
Black76	Put	€ 32,12	1	**€ 8,65**	-37,89%
Black76	Put	€ 37,79	1	**€ 12,12**	-32,07%
Black76	Put	€ 43,46	1	**€ 15,95**	-27,21%
MonteCarlo	Call	€ 32,12	1	**€ 14,85**	24,30%
MonteCarlo	Call	€ 37,79	1	**€ 12,81**	33,90%
MonteCarlo	Call	€ 43,46	1	**€ 10,95**	43,98%
MonteCarlo	Put	€ 32,12	1	**€ 8,63**	-37,84%
MonteCarlo	Put	€ 37,79	1	**€ 12,16**	-32,18%
MonteCarlo	Put	€ 43,46	1	**€ 16,03**	-27,42%

Tabla 5.4

Volatilidad gas europeo (último año) = 29.03%

De nuevo los resultados no acaban de ser del todo atractivos. Son bastantes similares a los anteriores debido a que los tres activos tienen volatilidades parecidas, la diferencia más notable entre el cálculo de la prima del gas europeo y la del Henry Hub o GNL es la diferente tasa libre de riesgo.

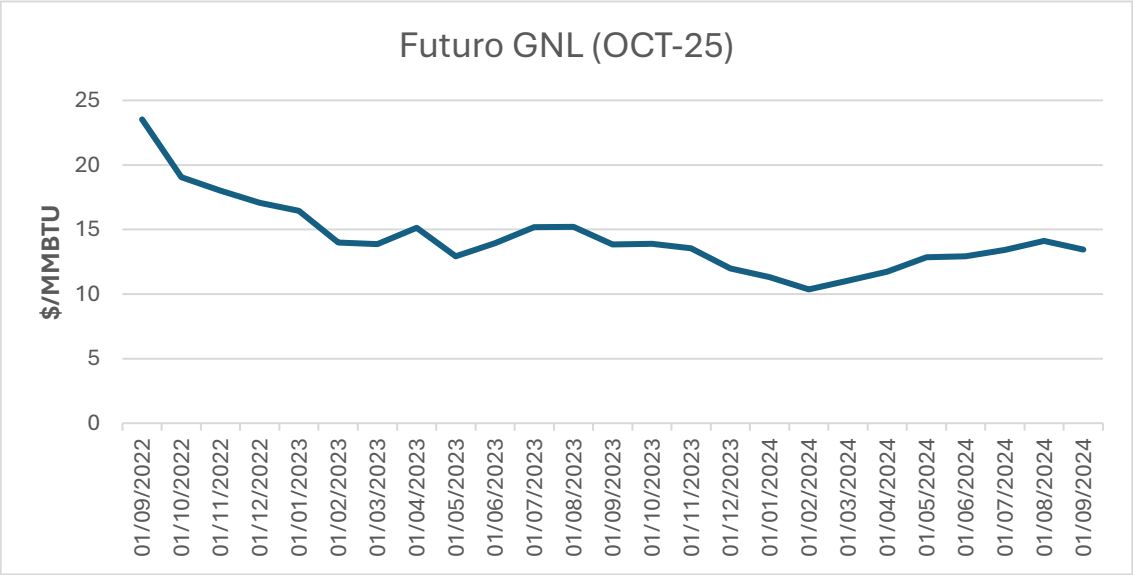
Gráfica 5.9

5.1.2. Opciones con subyacente futuros

La mayoría de las operaciones en el mercado de materias primas se realiza con futuros. En este caso, las acciones se calcularán para los futuros de GNL, Henry Hub y TTF con entrega en octubre de 2025. Se han usado los datos procedentes de New York Mercantil Exchange".

La diferencia en este apartado reside en que se simulará que se está en septiembre de 2024 (1 año antes del vencimiento del futuro). De esta manera, y asignando vencimiento a un año a las opciones, se podrá analizar si las opciones hoy en día (1 mes antes de vencimiento del futuro) serían lucrativas o por el contrario se encontrarían "out of the money".

Futuro GNL (JMK):



Gráfica 5.10: CME Group. (s.f.). NYMEX - CME Group.

Volatilidad futuro GNL (Oct-25) (09/2022-09/2024) = 26.79%

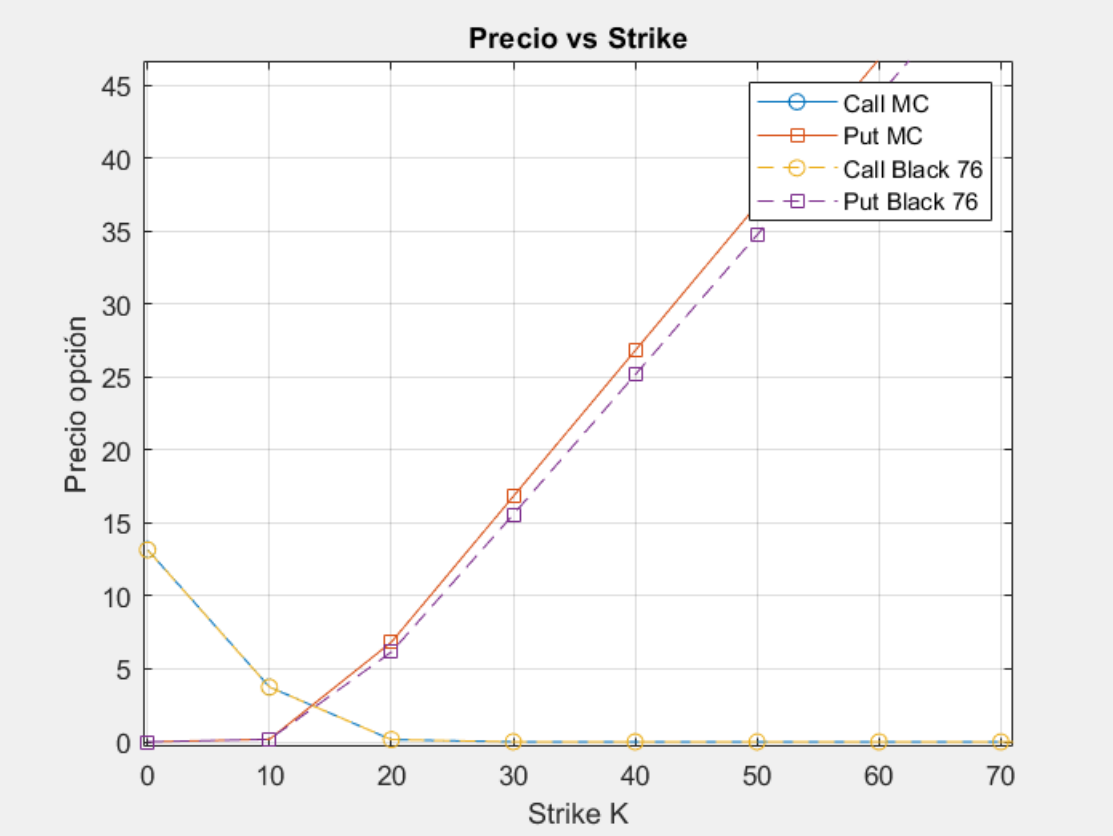
Como tasa libre de riego se usará las de los apartados anteriores, pero se escogerá el valor de septiembre de 2024.

U.S 1-year bond yield (09/2024) = 4.27%

Para el valor spot del futuro se utilizará el valor del futuro del siguiente mes al último usado para la volatilidad (octubre de 2024).

Precio spot del futuro GNL (Oct-25) (10/2024) = $13.16

De nuevo se construye la gráfica prima-strike para cada opción y método de cálculo:



Gráfica 5.11

En este caso sí que se nota algo más de diferencia entre métodos de cálculo, sobre todo en el caso de las opciones de venta. Esto se puede deber a que con volatilidades altas ambos métodos convergen en soluciones iguales.

Método	Tipo	Strike	Tiempo	Prima	Variación Spot
Black76	Call	$ 11,19	1	$ **2,84**	6,58%
Black76	Call	$ 13,16	1	$ **1,67**	12,69%
Black76	Call	$ 15,13	1	$ **0,90**	21,84%
Black76	Put	$ 11,19	1	$ **0,40**	-18,04%
Black76	Put	$ 13,16	1	$ **1,12**	-8,51%
Black76	Put	$ 15,13	1	$ **2,24**	-2,02%
MonteCarlo	Call	$ 11,19	1	$ **2,82**	6,43%
MonteCarlo	Call	$ 13,16	1	$ **1,62**	12,31%
MonteCarlo	Call	$ 15,13	1	$ **0,88**	21,69%
MonteCarlo	Put	$ 11,19	1	$ **0,42**	-18,19%
MonteCarlo	Put	$ 13,16	1	$ **1,17**	-8,89%
MonteCarlo	Put	$ 15,13	1	$ **2,38**	-3,09%

Tabla 5.5

Volatilidad Futuro GNL (Oct-25) (09/2023-09/2024) = 24.24%

Los resultados para el futuro del GNL son significativamente mejores que los de los valores spot de los apartados anteriores. Las primas son notablemente más bajas que con GNL

spot. Además de que la tasa libre de riesgo varía entre activos por la diferencia temporal, la diferencia principal es la diferencia en volatilidades. Los activos futuros tienen volatilidades más bajas que los spots, resultando en primas más bajas.

Ahora se estudia el comportamiento de las acciones de la tabla con el valor actual del activo (agosto de 2025):

Valor futuro GNL (Oct-25) (agosto 2025) = $11.49

Método	Tipo	Strike	Tiempo	Prima	Beneficio
Black76	Call	$ 11,19	1	$ 2,84	**$ -2,54**
Black76	Call	$ 13,16	1	$ 1,67	**$ -3,34**
Black76	Call	$ 15,13	1	$ 0,90	**$ -4,54**
Black76	Put	$ 11,19	1	$ 0,40	**$ -0,70**
Black76	Put	$ 13,16	1	$ 1,12	**$ 0,55**
Black76	Put	$ 15,13	1	$ 2,24	**$ 1,40**
MonteCarlo	Call	$ 11,19	1	$ 2,82	**$ -2,52**
MonteCarlo	Call	$ 13,16	1	$ 1,62	**$ -3,29**
MonteCarlo	Call	$ 15,13	1	$ 0,88	**$ -4,52**
MonteCarlo	Put	$ 11,19	1	$ 0,42	**$ -0,72**
MonteCarlo	Put	$ 13,16	1	$ 1,17	**$ 0,50**
MonteCarlo	Put	$ 15,13	1	$ 2,38	**$ 1,26**

Tabla 5.6

En la tabla se ha incluido una columna en la que se indica los beneficios/perdidas de las opciones si se ejerciesen actualmente (agosto de 2025). Las opciones destacadas en rojo están “out of the money”, y no se ejercerían (o se ejercerían para disminuir perdidas). En cambio, las destacadas en verde obtendrían beneficio al ejercerse. Al estar el precio spot (agosto de 2025) por debajo de la mayoría de los strikes, las opciones de compra se encuentran todas “out of the money”. Las opciones de venta, por el contrario, al tener en su mayoría el strike superior al spot, se encuentran “in the money”, ya que se estaría vendiendo más caro que en mercado.

Se ha obtenido algunos datos de opciones sobre el activo subyacente de interés (futuro GNL Oct-25) cotizados en el el "NYMEX". Con esos datos se puede comparar primas de opciones sobre el mismo subyacente del "NYMEX" con las creadas en este trabajo ("TFG").

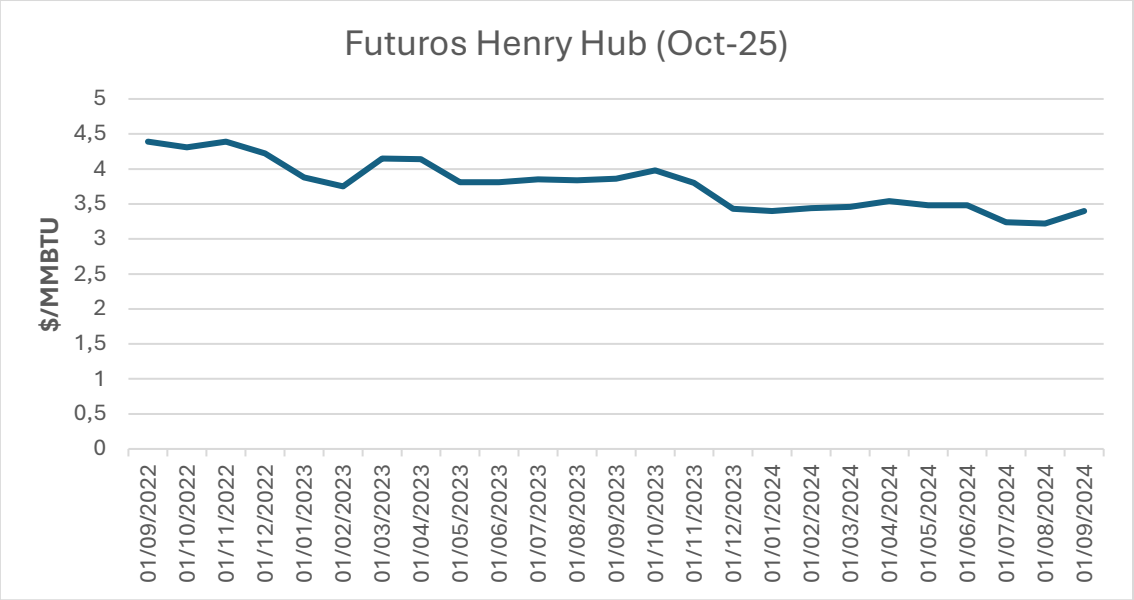
Origen	Opción	Strike	Prima
NYMEX	Call	$ 8,50	**$ 7,54**
NYMEX	Call	$ 11,00	**$ 2,78**
NYMEX	Call	$ 12,00	**$ 2,18**
TFG	Call	$ 8,50	**$ 5,51**
TFG	Call	$ 11,00	**$ 2,98**
TFG	Call	$ 12,00	**$ 2,25**
NYMEX	Put	$ 8,50	**$ 1,58**
NYMEX	Put	$ 11,00	**$ 0,71**
NYMEX	Put	$ 12,00	**$ 1,11**
TFG	Put	$ 8,50	**$ 0,02**
TFG	Put	$ 11,00	**$ 0,36**
TFG	Put	$ 12,00	**$ 0,67**

Tabla 5.7

En la tabla se observan los valores de las primas de distintos orígenes. Las primas de las opciones de compra calculadas con los métodos de este trabajo son relativamente parecidas a las cotizadas en el NYMEX. Es en las opciones de venta donde las primas no son semejantes. La opción de venta con strike 8.5 calculada tiene una prima demasiado baja. También es interesante resaltar que la prima de la opción de venta con strike 8.5 es mayor a la prima de la opción de venta a strike 11, ambas con cotización en el NYMEX. Esta diferencia no se ajusta a la teoría ya que, en las opciones de venta, strikes más altos suponen primas más elevadas. Por el contrario, las primas calculadas con los métodos de este trabajo cuadran con la teoría. En general las opciones calculadas son suficientemente semejantes a las cotizadas en el NYMEX para dar por valido el modelo de cálculo usado en este trabajo. Hay que tener en cuenta que las ligeras diferencias pueden deberse a la diferencia temporal. Las opciones calculadas en el trabajo están creadas con datos de hace un año, mientras que estas cotizan en el mercado actualmente.

Futuro Henry Hub:

Gráfica del precio del futuro Henry Hub (Oct-25) desde septiembre de 2022 hasta el mismo mes de 2024, datos de NYMEX:



Gráfica 5.12: CME Group. (s.f.). NYMEX - CME Group.

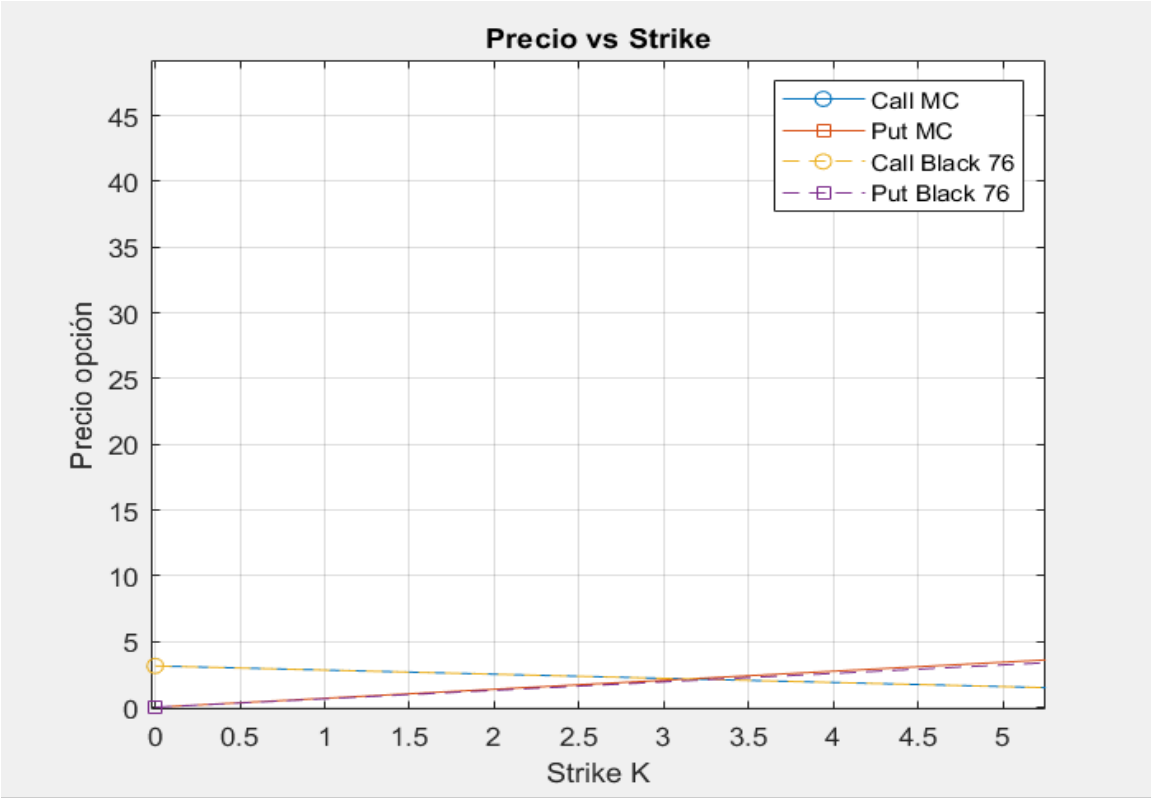
Volatilidad futuro Henry Hub (Oct-25) (09/2022-09/2024) = 15.65%

Se mantiene la tasa libre de riego como el rendimiento del bono estadounidense a un año.

U.S 1-year bond yield (09/2024) = 4.27%

Para el valor spot del futuro se utilizará el valor del futuro del siguiente mes al último usado para la volatilidad (octubre de 2024).

Precio spot del futuro Henry Hub (Oct-25) (10/2024) = $3.14



Gráfica 5.13

Los resultados de esta gráfica se mantienen en concordancia con las de los otros activos.

Tabla de opciones:

Método	Tipo	Strike	Tiempo	Prima	Variación Spot
Black76	Call	$ 2,67	1	**$ 0,60**	4,13%
Black76	Call	$ 3,14	1	**$ 0,26**	8,29%
Black76	Call	$ 3,61	1	**$ 0,08**	17,55%
Black76	Put	$ 2,67	1	**$ 0,02**	-15,64%
Black76	Put	$ 3,14	1	**$ 0,13**	-4,15%
Black76	Put	$ 3,61	1	**$ 0,40**	2,24%
MonteCarlo	Call	$ 2,67	1	**$ 0,60**	4,03%
MonteCarlo	Call	$ 3,14	1	**$ 0,26**	8,44%
MonteCarlo	Call	$ 3,61	1	**$ 0,08**	17,60%
MonteCarlo	Put	$ 2,67	1	**$ 0,02**	-15,68%
MonteCarlo	Put	$ 3,14	1	**$ 0,15**	-4,63%
MonteCarlo	Put	$ 3,61	1	**$ 0,48**	-0,18%

Tabla 5.8

Volatilidad Futuro Henry Hub (Oct-25) (09/2023-09/2024) = 14.92%

Los resultados de las opciones del futuro del Henry Hub con vencimiento en octubre son significativamente mejores que los de su valor spot. Las primas son mucho más bajas para strikes similares. De nuevo, puede deberse a la gran diferencia en volatilidad y al ligero cambio en la tasa libre de riesgo.

A continuación, se vuelve a estudiar el rendimiento de la opción si se ejerciese a día de hoy, comparándola con el precio actual del futuro:

Valor futuro Henry Hub (Oct-25) (agosto 2025) = $2.8

Método	Tipo	Strike	Tiempo	Prima	Beneficio
Black76	Call	$ 2,67	1	$ 0,60	**$ -0,47**
Black76	Call	$ 3,14	1	$ 0,26	**$ -0,60**
Black76	Call	$ 3,61	1	$ 0,08	**$ -0,89**
Black76	Put	$ 2,67	1	$ 0,02	**$ -0,15**
Black76	Put	$ 3,14	1	$ 0,13	**$ 0,21**
Black76	Put	$ 3,61	1	$ 0,40	**$ 0,41**
MonteCarlo	Call	$ 2,67	1	$ 0,60	**$ -0,46**
MonteCarlo	Call	$ 3,14	1	$ 0,26	**$ -0,60**
MonteCarlo	Call	$ 3,61	1	$ 0,08	**$ -0,89**
MonteCarlo	Put	$ 2,67	1	$ 0,02	**$ -0,16**
MonteCarlo	Put	$ 3,14	1	$ 0,15	**$ 0,19**
MonteCarlo	Put	$ 3,61	1	$ 0,48	**$ 0,33**

Tabla 5.9

El caso de las opciones del fututo del Henry Hub es muy similar al del GNL. El precio actual del subyacente es menor a la mayoría de los precios strike de la tabla, por lo tanto, las opciones de compra están todas "out of the money". Las opciones de venta con strikes superiores al precio del subyacente actual son las que generarían beneficio al ejercerse.

También se han conseguido cotizaciones de opciones del futuro de Henry Hub con vencimiento en octubre de 2025, procedentes de NYMEX. Se comparan en la tabla siguiente:

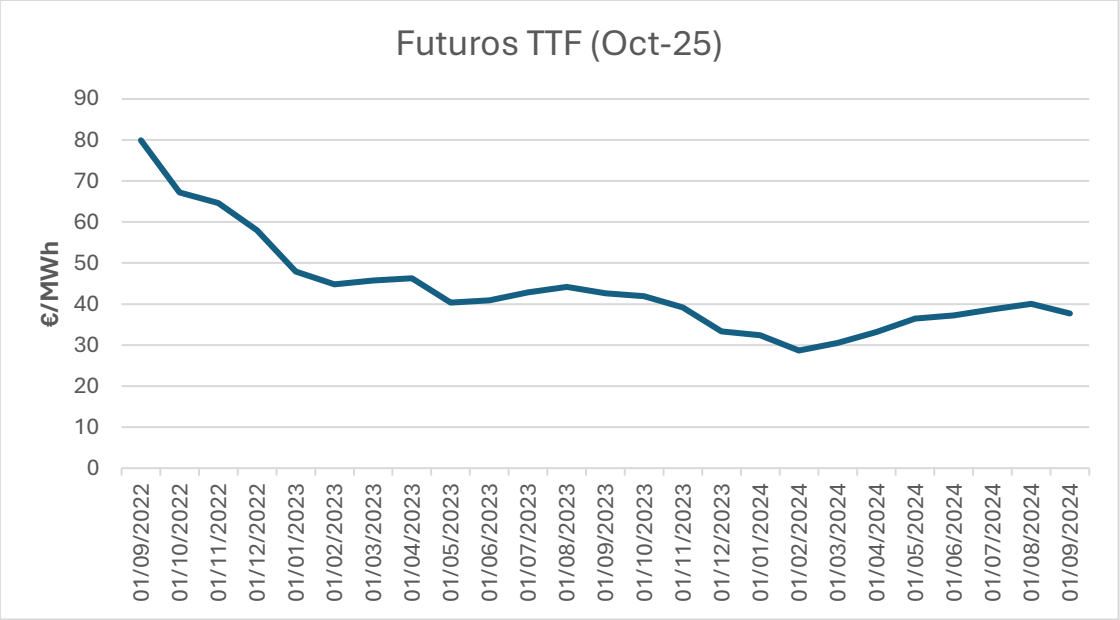
Origen	Opción	Strike	Prima
NYMEX	Call	$ 2,60	**$ 0,29**
NYMEX	Call	$ 2,80	**$ 0,17**
NYMEX	Call	$ 3,00	**$ 0,10**
TFG	Call	$ 2,60	**$ 0,66**
TFG	Call	$ 2,80	**$ 0,49**
TFG	Call	$ 3,00	**$ 0,35**
NYMEX	Put	$ 2,60	**$ 0,10**
NYMEX	Put	$ 2,80	**$ 0,18**
NYMEX	Put	$ 3,00	**$ 0,31**
TFG	Put	$ 2,60	**$ 0,01**
TFG	Put	$ 2,80	**$ 0,04**
TFG	Put	$ 3,00	**$ 0,09**

Tabla 5.10

Al contrario que con las opciones de GNL del NYMEX, las del Henry Hub cumplen con la teoría. En cuanto a la comparación con las creadas en el trabajo, es curioso que las primas de las opciones de compra resultan más caras que las del NYMEX. Pero en las opciones de venta sucede lo contrario, las del NYMEX cotizan a una prima mayor. Nuevamente la diferencia puede estar condicionada por la diferencia temporal.

Futuro gas natural europeo (TTF):

Gráfica del precio del futuro TTF (Oct-25) desde septiembre de 2022 hasta el mismo mes de 2024, datos de NYMEX:



Gráfica 5.14: CME Group. (s.f.). NYMEX - CME Group.

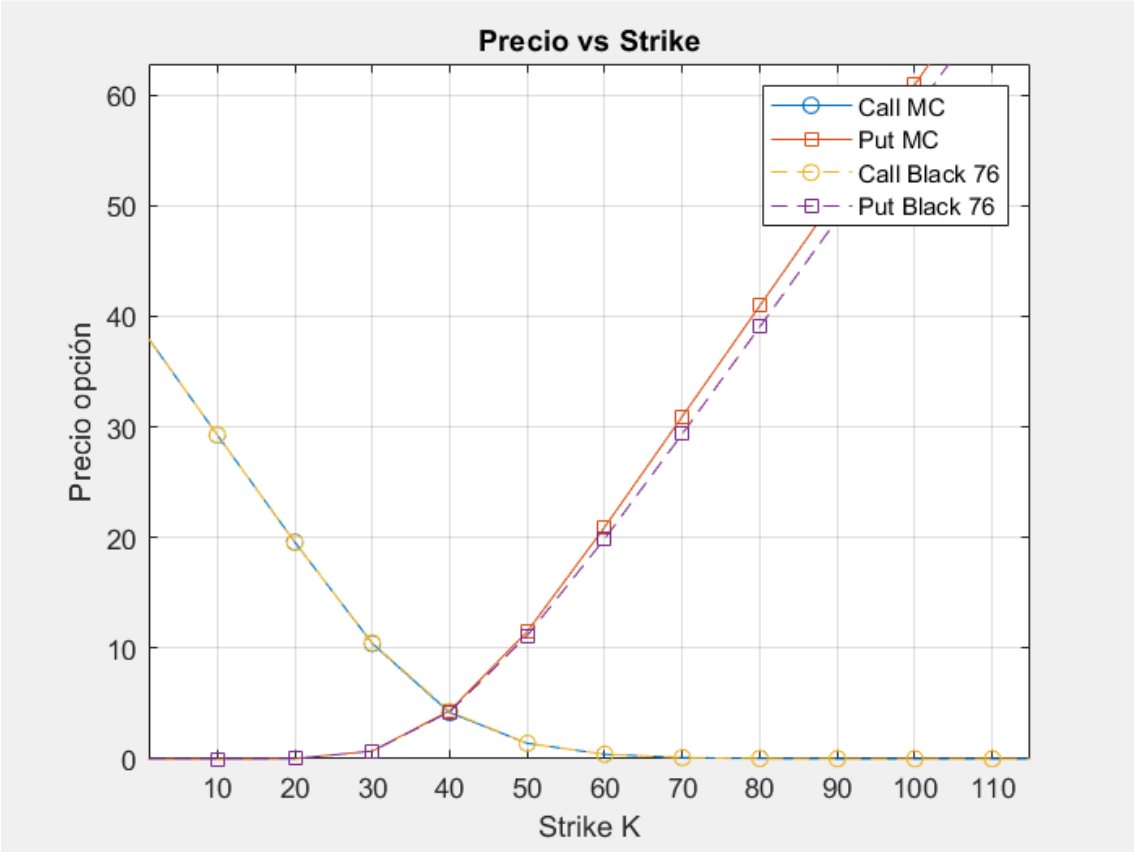
Volatilidad futuro TTF (Oct-25) (09/2022-09/2024) = 27.43%

La tasa libre de riesgo en este caso cambia a ser el rendimiento del bono alemán a 1 año, ya que el gas europeo cotiza en euros.

Bono alemán 1 año (09/2024) = 2.47%

Para el valor spot del futuro se utilizará el valor del futuro del siguiente mes al último usado para la volatilidad (octubre de 2024).

Precio spot del futuro TTF (Oct-25) (10/2024) = 39.04€



Gráfica 5.15

En la gráfica precio-strike se vuelve a observar una ligera diferencia entre métodos de cálculo para las opciones de venta.

Tabla de opciones para futuros de TTF (Oct-25):

Método	Tipo	Strike	Tiempo	Prima	Variación Spot
Black76	Call	€ 33,18	1	€ **8,09**	5,72%
Black76	Call	€ 39,04	1	€ **4,70**	12,04%
Black76	Call	€ 44,90	1	€ **2,53**	21,48%
Black76	Put	€ 33,18	1	€ **1,43**	-18,66%
Black76	Put	€ 39,04	1	€ **3,75**	-9,61%
Black76	Put	€ 44,90	1	€ **7,29**	-3,67%
MonteCarlo	Call	€ 33,18	1	€ **7,94**	5,34%
MonteCarlo	Call	€ 39,04	1	€ **4,60**	11,78%
MonteCarlo	Call	€ 44,90	1	€ **2,50**	21,40%
MonteCarlo	Put	€ 33,18	1	€ **1,45**	-18,71%
MonteCarlo	Put	€ 39,04	1	€ **3,83**	-9,81%
MonteCarlo	Put	€ 44,90	1	€ **7,48**	-4,16%

Tabla 5.11

Volatilidad Futuro TTF (Oct-25) (09/2023-09/2024) = 28.6%

De nuevo, los resultados para el futuro del TTF son más prometedores que para el spot de este. La volatilidad más baja del futuro hace que la prima se disminuya en gran medida.

Como ya se observó en el apartado de teoría de opciones, la prima y volatilidad tienen una relación lineal fuerte.

Seguidamente, se examina de nuevo el desempeño de la opción al ejercerse hoy, en comparación con la cotización actual del futuro.

Valor futuro TTF (Oct-25) (agosto 2025) = 32.9€

Método	Tipo	Strike	Tiempo	Prima	Beneficio
Black76	Call	€ 33,18	1	€ 8,09	- **8,37 €**
Black76	Call	€ 39,04	1	€ 4,70	- **10,84 €**
Black76	Call	€ 44,90	1	€ 2,53	- **14,53 €**
Black76	Put	€ 33,18	1	€ 1,43	- **1,15 €**
Black76	Put	€ 39,04	1	€ 3,75	**2,39 €**
Black76	Put	€ 44,90	1	€ 7,29	**4,71 €**
MonteCarlo	Call	€ 33,18	1	€ 7,94	- **8,22 €**
MonteCarlo	Call	€ 39,04	1	€ 4,60	- **10,74 €**
MonteCarlo	Call	€ 44,90	1	€ 2,50	- **14,50 €**
MonteCarlo	Put	€ 33,18	1	€ 1,45	- **1,17 €**
MonteCarlo	Put	€ 39,04	1	€ 3,83	**2,31 €**
MonteCarlo	Put	€ 44,90	1	€ 7,48	**4,52 €**

Tabla 5.12

El comportamiento de las opciones sobre el futuro del TTF resulta análogo al observado en el caso del GNL y Henry Hub. Dado que el precio actual del subyacente se sitúa por debajo de la mayoría de los precios de ejercicio de la tabla, todas las opciones de compra se encuentran “out of the money”. En cambio, las opciones de venta con strikes superiores al valor actual del subyacente serían las únicas que generarían beneficio en caso de ejercerse.

De la misma manera que en casos anteriores se comparan las acciones calculadas con los métodos del trabajo con las del respectivo subyacente cotizadas en el NYMEX.

Origen	Opción	Strike	Prima
NYMEX	Call	€ 37,00	**€ 6,86**
TFG	Call	€ 37,00	**€ 5,73**
NYMEX	Put	€ 37,00	**€ 6,46**
TFG	Put	€ 37,00	**€ 2,79**

Tabla 5.13

En el caso del futuro de TTF con vencimiento en octubre de 2025 solo está disponible la opción con strike de 37€. Comparándola con la creada en el trabajo, se observa un descuento importante. La opción de compra es sutilmente más barata, pero la opción de venta es considerablemente más barata que la del NYMEX.

5.2. Viabilidad y coherencia de las opciones financieras de gas natural

Más del 90% de las operaciones en los mercados de materias primas se realiza mediante futuros financieros, el mercado spot representa un porcentaje pequeño. La alta volatilidad del mercado spot hace que empresas e inversores se decanten por contratos de futuros para satisfacer sus intereses. En los cálculos de los apartados anteriores, se ha podido comprobar la diferencia entre opciones financieras con distintos activos subyacentes. Las opciones con subyacentes spot presentaban unas primas elevadas, lo que las descarta en un principio para estrategias de cobertura medianamente realistas y accesibles. Es cierto que en situaciones de alta incertidumbre y volatilidad en la escena económica y política mundial pueden llegar a ser herramientas útiles frente a altas fluctuaciones, pero en escenarios relativamente calmados, pueden resultar excesivamente caras. Por el otro lado, las opciones con activo subyacente futuro han resultado completamente exitosas. Las primas obtenidas son más bajas que las de las opciones de sus respectivos activos spot.

Los precios de las primas calculadas en el trabajo se encuentran en un marco considerable. Pero se observa que los modelos de cálculo utilizados se ajustan mejor a activos menos volátiles. Cuando se ha comparado las opciones calculadas con el valor del activo subyacente en el vencimiento de las opciones, los resultados no reflejaban ninguna señal de que el modelo estuviese alejado de la realidad o no se amoldase correctamente al activo de interés. Se puede afirmar que los métodos utilizados para el cálculo de primas de opciones financieras de gas natural y GNL son robustos y viables para su uso en el mercado real.

Al comparar las opciones obtenidas con las conseguidas de la pagina del NYMEX, se observa una similitud en valores de primas. Las opciones de venta calculadas resultan se mucho mas baratas que sus análogas del NYMEX. Esto puede deberse a la diferencia temporal, el rango de datos que se ha usado para calcular la volatilidad o bien el factor oferta y demanda. Aun asi se puede concluir que la magnitud de los valores obtenidos es razonable. Las primas obtenidas no son desproporcionadas comparadas con el precio del activo, ni demasiado baratas. Se puede afirmar que el método de Black-Scholes y Monte Carlo pueden valer como método de valoración de opciones de gas natural y GNL.

6. Conclusión

El análisis realizado en este trabajo ha puesto de manifiesto la relevancia de los derivados financieros, y en particular de las opciones, como herramientas para gestionar la volatilidad inherente al mercado del gas natural. A lo largo del estudio se ha comprobado que este recurso energético, por su elevada sensibilidad a factores externos como la geopolítica, la regulación y la dinámica de la oferta y la demanda, presenta un perfil de riesgo que justifica plenamente la utilización de coberturas financieras.

Los modelos de valoración aplicados, Black-76 y Monte Carlo, han demostrado ser métodos eficaces y coherentes para estimar el precio de las primas. El primero destaca por su simplicidad y utilidad en opciones europeas, mientras que el segundo aporta un mayor grado de precisión en el análisis de opciones americanas (sobre todo con bajas volatilidades), al incorporar múltiples escenarios de ejercicio anticipado. Aunque en la práctica no han demostrado proporcionar resultados muy distintos. Los resultados obtenidos reflejan que ambos enfoques pueden complementarse en la práctica, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones financieras.

Asimismo, el estudio de estrategias de cobertura ha puesto de relieve la capacidad de las opciones para protegerse frente a movimientos adversos en los precios del gas, aunque también se ha evidenciado que su implementación conlleva costes y limitaciones. La liquidez de los mercados de opciones sobre gas es aún reducida en comparación con otros derivados, y el valor de las primas puede resultar elevado, lo que condiciona su uso generalizado por parte de agentes comerciales.

En conclusión, la valoración de opciones financieras aplicadas a contratos de gas natural constituye una herramienta de gran utilidad para “traders” y empresas del sector energético, ya que aporta flexibilidad y capacidad de adaptación en un entorno caracterizado por la incertidumbre. No obstante, su aplicación requiere un conocimiento profundo de los parámetros de mercado y de los modelos de valoración.

Como líneas futuras de investigación, resultaría de interés explorar la integración de criterios de sostenibilidad en la estructuración de contratos, analizar escenarios asociados a la transición energética y aplicar técnicas avanzadas de simulación que permitan mejorar la precisión de los resultados en entornos de alta volatilidad. Además, se podría profundizar en estrategias de cobertura que involucrasen otros derivados financieros y protegiesen frente a otras situaciones, como inflación o la variación del precio entre divisas.

7. Anexo

7.1. Bibliografía

Oxford Institute for Energy Studies. (2022). *Contratos internacionales de gas*. Fundación Naturgy.

MIBGAS S.A. (2025). *Overview of the Iberian gas market operator*

Chevron Corporation. (s.f.). *Natural Gas Overview*. https://www.chevron.com/sustainability/environment/natural-gas

CNPC - China National Petroleum Corporation. (s.f.). *Corporate Profile*. https://www.cnpc.com.cn/en/

Energy Institute. (2024). *Statistical Review of World Energy*. https://www.energyinst.org/statistical-review

Enbridge Inc. (s.f.). *Gas Transmission and Midstream*. https://www.enbridge.com/

Engie. (s.f.). *Gas supply & services*. https://www.engie.com/en/businesses/gas

Equinor ASA. (s.f.). *Oil and gas*. https://www.equinor.com/energy/oil-and-gas

ExxonMobil Corporation. (s.f.). *Energy and innovation*. https://corporate.exxonmobil.com/

International Energy Agency (IEA). (2024). *Gas Market Report – Q1 2024*. https://www.iea.org/reports/gas-market-report

International Gas Union (IGU). (2023). *Global Gas Report 2023*. https://www.igu.org/

Kinder Morgan. (s.f.). *Natural Gas Pipelines*. https://www.kindermorgan.com/

Naturgy Energy Group. (s.f.). *About Us*. https://www.naturgy.com/

OECD. (2023). *Regulatory Policy and Governance*. https://www.oecd.org/gov/regulatory-policy/

Royal Dutch Shell. (s.f.). *Natural gas and LNG*. https://www.shell.com/energy-and-innovation/natural-gas.html

TotalEnergies. (s.f.). *Natural Gas and LNG*. https://totalenergies.com/energy-expertise/oil-and-gas/natural-gas

U.S. Energy Information Administration (EIA). (s.f.). *Natural Gas Explained*. https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/

Williams Companies. (s.f.). *Transco Pipeline Overview*. https://www.williams.com/

World Bank. (2023). *Regulatory Indicators for Sustainable Energy (RISE)*. https://rise.worldbank.org/

Gasunie Transport Services (GTS). “What is the Title Transfer Facility (TTF)?” Gasunie, 2023. https://www.gasunietransportservices.nl/

Intercontinental Exchange (ICE). TTF Natural Gas Futures – Contract Specifications and Market Data. ICE, 2024. https://www.theice.com/

European Energy Exchange (EEX) – PEGAS Platform. Market Overview and Gas Trading Volumes in Europe. EEX Group, 2024. https://www.eex.com/

International Energy Agency (IEA). (2024). Gas Market Report – Q4 2024. https://www.iea.org/reports/gas-market-report-q4-2024

Gas Strategies. (2022). LNG Contracts: Pricing, Flexibility, and Take-or-Pay. https://www.gasstrategies.com

Oxford Institute for Energy Studies. (2021). The Evolution of Gas Contracting Practices in Europe. https://www.oxfordenergy.org/publications

Smith, R. (2024). *Apuntes de clase sobre opciones financieras*. Wharton School of the University of Pennsylvania.

Investopedia. (s. f.). *Investopedia*. https://www.investopedia.com

Federal Reserve Bank of St. Louis. (2025). *FRED: Economic data*. https://fred.stlouisfed.org

U.S. Energy Information Administration. (2025). *Official energy statistics from the U.S. government*.

European Energy Exchange. (2025). *Market data*.

Intercontinental Exchange. (2025). *Markets data*.

CME Group. (2025). *Markets home*.

7.2. Código del método de Monte Carlo en MATLAB

```
% Parámetros
So = 100;     % Precio inicial
K = 80;      % Strike
r = 0.05;    % Tasa libre de riesgo
sigma = 0.2;  % Volatilidad
T = 1;       % 1 año
M = 100;     % Pasos temporales
N = 100000;   % Simulaciones Monte Carlo

% Put americano
precio_put = american_option_LSM(So, K, r, sigma, T, M, N, 'put');
disp(['Precio estimado del Put Americano: ', num2str(precio_put)]);

% Call americano
precio_call = american_option_LSM(So, K, r, sigma, T, M, N, 'call');
disp(['Precio estimado del Call Americano: ', num2str(precio_call)]);



function precio = american_option_LSM(So, K, r, sigma, T, M, N, tipo)
  % american_option_LSM - Valoración de opciones americanas con Monte Carlo LSM
  %
  % Inputs:
  %  SO   : Precio inicial del subyacente
  %  K    : Precio strike
  %  r    : Tasa libre de riesgo (tanto por uno)
  %  sigma : Volatilidad (tanto por uno)
  %  T    : Tiempo a vencimiento (años)
  %  M    : Número de pasos en el tiempo
```

```
%   N    : Número de simulaciones (trayectorias)
%   tipo  : 'call' o 'put'
%
% Output:
%   precio : Valor estimado de la opción americana

dt = T/M;                   % Paso temporal
disc = exp(-r*dt);          % Factor de descuento

% Simulación de trayectorias del subyacente (GBM)
S = zeros(N,M+1);
S(:,1) = So;
for t = 2:M+1
   Z = randn(N,1);
   S(:,t) = S(:,t-1) .* exp((r - 0.5*sigma^2)*dt + sigma*sqrt(dt).*Z);
end

% Valor intrínseco según tipo
if strcmpi(tipo,'put')
   payoff = max(K - S, 0);
elseif strcmpi(tipo,'call')
   payoff = max(S - K, 0);
else
   error('El tipo de opción debe ser ''call'' o ''put''');
end

% Inicializamos con el valor al vencimiento
V = payoff(:,end);

% Retroceso en el tiempo (backward induction)
```

```
  for t = M:-1:2
    % Consideramos solo trayectorias ITM
    itm = find(payoff(:,t) > 0);

    if ~isempty(itm)
      % Variables dependientes: valores descontados futuros
      Y = V(itm) * disc;

      % Variables independientes: precios actuales
      X = S(itm,t);

      % Ajuste polinómico (regresión de segundo orden)
      A = [ones(size(X)) X X.^2];
      coeff = A \ Y;
      % Estimación del valor de continuar
      C = [ones(size(S(itm,t))) S(itm,t) S(itm,t).^2] * coeff;
      % Decisión de ejercicio: comparar con payoff inmediato
      exercise = payoff(itm,t) > C;
      % Actualizamos los valores
      V(itm(exercise)) = payoff(itm(exercise),t);
      V(itm(~exercise)) = V(itm(~exercise)) * disc;
    end
    % Trayectorias fuera de dinero: solo descontamos
    V(setdiff(1:N,itm)) = V(setdiff(1:N,itm)) * disc;
  end
  % Precio de la opción = media de valores descontados
  precio = mean(V) * disc;
end
```

7.3. Código de la comparación entre Monte Carlo y Black-Scholes-Merton (Black-76) en MATLAB

```
%% Script de gráficas: MC (American) vs Black 76 (Europea)
%% Parámetros iniciales
S0 = 100;        % Spot
K_base = 100;    % Strike fijo
r = 0.05;        % Tipo de interés
sigma = 0.2;     % Volatilidad
T = 1;           % Tiempo a vencimiento
M = 100;         % Pasos temporales
N = 100000;      % Simulaciones

%% Variaremos diferentes parámetros para graficar
K_values = 80:5:120;
T_values = 0.1:0.1:2;
r_values = 0:0.01:0.1;
sigma_values = 0.1:0.05:0.5;

%% --------------------------
%% Comparación por strike
MC_call_K = zeros(size(K_values));
MC_put_K  = zeros(size(K_values));
B76_call_K = zeros(size(K_values));
B76_put_K  = zeros(size(K_values));

for i = 1:length(K_values)
   MC_call_K(i) = american_option_LSM(S0, K_values(i), r, sigma, T, M, N, 'call');
   MC_put_K(i)  = american_option_LSM(S0, K_values(i), r, sigma, T, M, N, 'put');
   B76_call_K(i) = black76_call(S0, K_values(i), r, sigma, T);
   B76_put_K(i)  = black76_put(S0, K_values(i), r, sigma, T);
```

```
end

figure;
plot(K_values, MC_call_K, '-o', 'DisplayName','Call MC');
hold on;
plot(K_values, MC_put_K, '-s', 'DisplayName','Put MC');
plot(K_values, B76_call_K, '--o', 'DisplayName','Call Black 76');
plot(K_values, B76_put_K, '--s', 'DisplayName','Put Black 76');
xlabel('Strike K'); ylabel('Precio opción'); title('Precio vs Strike');
legend; grid on;

%% --------------------------
%% Comparación por tiempo
MC_call_T = zeros(size(T_values));
MC_put_T  = zeros(size(T_values));
B76_call_T = zeros(size(T_values));
B76_put_T  = zeros(size(T_values));

for i = 1:length(T_values)
   MC_call_T(i) = american_option_LSM(S0, K_base, r, sigma, T_values(i), M, N, 'call');
   MC_put_T(i)  = american_option_LSM(S0, K_base, r, sigma, T_values(i), M, N, 'put');
   B76_call_T(i) = black76_call(S0, K_base, r, sigma, T_values(i));
   B76_put_T(i)  = black76_put(S0, K_base, r, sigma, T_values(i));
end

figure;
plot(T_values, MC_call_T, '-o', 'DisplayName','Call MC');
hold on;
plot(T_values, MC_put_T, '-s', 'DisplayName','Put MC');
plot(T_values, B76_call_T, '--o', 'DisplayName','Call Black 76');
```

```
plot(T_values, B76_put_T, '--s', 'DisplayName','Put Black 76');
xlabel('Tiempo T'); ylabel('Precio opción'); title('Precio vs Tiempo');
legend; grid on;

%% --------------------------
%% Comparación por tipo de interés
MC_call_r = zeros(size(r_values));
MC_put_r  = zeros(size(r_values));
B76_call_r = zeros(size(r_values));
B76_put_r  = zeros(size(r_values));

for i = 1:length(r_values)
   MC_call_r(i) = american_option_LSM(S0, K_base, r_values(i), sigma, T, M, N, 'call');
   MC_put_r(i)  = american_option_LSM(S0, K_base, r_values(i), sigma, T, M, N, 'put');
   B76_call_r(i) = black76_call(S0, K_base, r_values(i), sigma, T);
   B76_put_r(i)  = black76_put(S0, K_base, r_values(i), sigma, T);
end

figure;
plot(r_values, MC_call_r, '-o', 'DisplayName','Call MC');
hold on;
plot(r_values, MC_put_r, '-s', 'DisplayName','Put MC');
plot(r_values, B76_call_r, '--o', 'DisplayName','Call Black 76');
plot(r_values, B76_put_r, '--s', 'DisplayName','Put Black 76');
xlabel('Tasa r'); ylabel('Precio opción'); title('Precio vs Tipo de interés');
legend; grid on;

%% --------------------------
%% Comparación por volatilidad
MC_call_sigma = zeros(size(sigma_values));
```

```
MC_put_sigma  = zeros(size(sigma_values));
B76_call_sigma = zeros(size(sigma_values));
B76_put_sigma  = zeros(size(sigma_values));

for i = 1:length(sigma_values)
   MC_call_sigma(i) = american_option_LSM(S0, K_base, r, sigma_values(i), T, M, N, 'call');
   MC_put_sigma(i)  = american_option_LSM(S0, K_base, r, sigma_values(i), T, M, N, 'put');
   B76_call_sigma(i) = black76_call(S0, K_base, r, sigma_values(i), T);
   B76_put_sigma(i)  = black76_put(S0, K_base, r, sigma_values(i), T);
end

figure;
plot(sigma_values, MC_call_sigma, '-o', 'DisplayName','Call MC');
hold on;
plot(sigma_values, MC_put_sigma, '-s', 'DisplayName','Put MC');
plot(sigma_values, B76_call_sigma, '--o', 'DisplayName','Call Black 76');
plot(sigma_values, B76_put_sigma, '--s', 'DisplayName','Put Black 76');
xlabel('Volatilidad \sigma'); ylabel('Precio opción'); title('Precio vs Volatilidad');
legend; grid on;

%% --------------------------
%% Funciones auxiliares

function precio = american_option_LSM(So, K, r, sigma, T, M, N, tipo)
   dt = T/M;
   disc = exp(-r*dt);
   S = zeros(N,M+1);
   S(:,1) = So;
   for t = 2:M+1
      Z = randn(N,1);
```

```
    S(:,t) = S(:,t-1) .* exp((r - 0.5*sigma^2)*dt + sigma*sqrt(dt).*Z);
  end
  if strcmpi(tipo,'put')
    payoff = max(K - S, 0);
  elseif strcmpi(tipo,'call')
    payoff = max(S - K, 0);
  else
    error('Tipo debe ser call o put');
  end
  V = payoff(:,end);
  for t = M:-1:2
    itm = find(payoff(:,t) > 0);
    if ~isempty(itm)
      Y = V(itm) * disc;
      X = S(itm,t);
      A = [ones(size(X)) X X.^2];
      coeff = A \ Y;
      C = [ones(size(X)) X X.^2] * coeff;
      exercise = payoff(itm,t) > C;
      V(itm(exercise)) = payoff(itm(exercise),t);
      V(itm(~exercise)) = V(itm(~exercise)) * disc;
    end
    V(setdiff(1:N,itm)) = V(setdiff(1:N,itm)) * disc;
  end
  precio = mean(V) * disc;
end

function precio = black76_call(S0,K,r,sigma,T)
  F = S0 * exp(r*T);
  d1 = (log(F/K) + 0.5*sigma^2*T)/(sigma*sqrt(T));
```

```
    d2 = d1 - sigma*sqrt(T);
    precio = exp(-r*T)*(F*normcdf(d1) - K*normcdf(d2));
end


function precio = black76_put(S0,K,r,sigma,T)
    F = S0 * exp(r*T);
    d1 = (log(F/K) + 0.5*sigma^2*T)/(sigma*sqrt(T));
    d2 = d1 - sigma*sqrt(T);
    precio = exp(-r*T)*(K*normcdf(-d2) - F*normcdf(-d1));
end
```