

RIESGOS ENERGÉTICOS Y CREACIÓN DE VALOR

ANTONIO MORENO-TORRES GÁLVEZ

Universidad Politécnica de Madrid

«Cuando la única herramienta que tienes es un martillo, todo te parece un clavo».

A. Maslow

Las empresas productoras, las transformadoras, las comercializadoras y las consumidoras intensivas de energía –empresas “energívoras”, “electrointensivas”,...– se enfrentan a una volatilidad de precios para cuya gestión disponen de instrumentos y técnicas que, con origen en el sector financiero, han sido debidamente adaptadas a las peculiaridades de lo energético.

Pero más allá de esta dimensión operativa, en este caso de complejas carteras de activos que pueden ser físicos –con sus restricciones y flexibilidades operativas– y/o financieros –en muchos casos sofisticados y no estandarizados–, y para que la toma de decisiones sobre las mismas esté orientada hacia la generación de valor, se hace necesaria una gestión estratégica que se fundamente en un análisis coste-beneficio de las diferentes alternativas y que tenga en cuenta el grado de apetencia por el riesgo de la organización.

Con carácter general, en el mundo corporativo se denomina «factor de riesgo» a toda variable que cause cambios en el valor de los activos. En un primer nivel, estos podrían dividirse en factores estratégicos o “macro” –generalmente cualitativos, a menudo no controlables y determinantes del posicionamiento competitivo– y factores operativos o “micro” –generalmente cuantificables y controlables– que incluirían, según una taxonomía no exhaustiva, «riesgos de mercado» (o financieros o de tesorería) –incertidumbres con respecto a las variables financieras que como precios de las materias primas, tipos de cambio y tipos de interés afectan a los resultados–, «ries-

gos operativos» –pérdidas potenciales resultantes de eventos causados por procesos inadecuados o que han fallado– y «riesgos de crédito o contraparte» -incumplimiento de obligaciones por una contraparte con la que se tiene un contrato comercial o financiero-.

Por definición, la actividad empresarial es una asunción de riesgos en expectativa de recibir a cambio un beneficio (1), teniendo toda ventaja competitiva su origen último en una habilidad para gestionar un riesgo operativo ligado a procesos, personas o sistemas. Por tanto, la gestión del riesgo no consiste en su sistemática evitación, sino en su identificación, medida y valoración, y su optimización en base al apetito corporativo por el mismo y las opciones disponibles para su mitigación, que son: en el ámbito de la gestión de carteras, su diversificación; en el caso de riesgos de crédito, su limitación o exigencia de una garantía colateral; y en el ámbito de la cobertura, su transferencia a una contraparte que tenga una ventaja comparativa en su manejo, ya sea porque tiene potencial de diversificación estadística o actuarial de un riesgo operativo (empresa aseguradora), o porque con respecto a un riesgo de mercado tiene

una posición contraria por la naturaleza de su negocio o de avaricia por motivos o especulativos o de conocimiento por el que haya detectado una oportunidad de arbitraje (2) (cobertura con derivados).

La liberalización de los mercados energéticos viene desarrollándose desde hace ya medio siglo en un proceso inacabado y dinámico que es complejo debido a, por una parte, la influencia de múltiples factores "macro" –de tipo geopolítico, tecnológico, socio-económico o regulatorio– que definen su ámbito geográfico y estructura según muestra el cuadro 1 y, por otra, su doble sistemicidad externa –los mercados de productos energéticos están influidos por otros mercados no energéticos– e interna –los diferentes productos energéticos están interrelacionados–.

Esta sistemicidad interna se manifiesta en un efecto de vasos comunicantes entre precios de productos energéticos que se observa en múltiples casos: la indexación es algo común –por ejemplo, del gas natural con referencia al petróleo–; muchas industrias tienen capacidades de sustitución de combustibles (*fuel switching*) –por ejemplo, entre productos petrolíferos y carbón–; el precio en mercados eléctricos marginalistas viene fijado por la última unidad necesaria para atender la demanda –que será o gas natural o carbón en un contexto de caída de precios de aquél por exceso de su oferta–; o la generación de electricidad con fuentes renovables en sistemas eléctricos aislados requiere un *back up fósil* –usualmente gas natural–.

En la dimensión más "micro" de la liberalización, la sustitución de mecanismos de abastecimiento internos por la provisión en mercados, causada por el desmembramiento de las empresas verticalmente integradas –muchas veces públicas– que otrora actuaban en la totalidad de la cadena de valor –producción/transformación/transporte/distribución–, ha expuesto a los segmentos resultantes (y en particular a los intermedios o "procesadores de energía" físicos o comerciales –*trading* o comercialización mayorista o minorista– que están sometidos a tensiones tanto por el lado de los *inputs* como por el lado de los *outputs*) a importantes riesgos de mercado en forma de incertidumbres en precios y cantidades que antes no afrontaban, al eliminarse la cobertura natural que el anterior paradigma organizativo proporcionaba. Si en el modelo eléctrico previo a la liberalización se aprobaban las inversiones –a través de la planificación energética– y se regulaba su retribución de forma *ex-ante* traspasándose íntegramente los riesgos a los consumidores, en un marco liberalizado, y en contraposición, los riesgos se reasignan –para pasar a ser soportados los de inversión por las empresas energéticas y los de precios por los consumidores, respectivamente– en un reparto que proporciona incentivos adecuados para la cobertura.

El riesgo de mercado se constituye por tanto en factor de riesgo principal, con una volatilidad de precios

energéticos superior a la de los productos financieros –mucho más en el caso de la electricidad por su no almacenabilidad–. Una evidencia de la preocupación que genera su gestión es la proliferación, constante innovación y creciente importancia de los derivados energéticos entre los derivados sobre *commodities*, si bien aún estos representan una modesta minoría en el total de los productos derivados frente a la mayoría que constituyen los de subyacente financiero (Lautier y Simon, 2009).

En este artículo se describirán de forma intuitiva las particularidades de los productos energéticos desde el punto de vista de la gestión de riesgos de mercado, que fundamentalmente vienen dadas por sus posibilidades limitadas de almacenamiento, la utilidad espacial, temporal y de calidad ligada a su consumo, y la necesidad de conocimiento de los fundamentos de la realidad física del sector en lo que, si se toma como referencia al caso del petróleo, se conoce como análisis "del pozo a la rueda" (*from well to wheel*). En una exposición "de abajo a arriba", se revisarán los diferentes instrumentos –comenzando por los más elementales–, los modelos para su valoración individual y las técnicas para su gestión estratégica como parte de la cartera de activos corporativos entendida en sentido amplio, discutiendo sus implicaciones organizativas y puntualizando en todo momento las diferencias entre las Finanzas convencionales y lo que se denominan "Finanzas Energéticas". Se presentarán asimismo algunas aplicaciones en política energética.

Para los lectores con mayor interés en aspectos formales de formulación cuantitativa, se incluyen una serie de recuadros a modo de prontuario, que son de lectura opcional en el resto de casos.

INSTRUMENTOS Y ESTRATEGIAS DE COBERTURA ELEMENTALES †

Un «contrato derivado» o simplemente «derivado» es un acuerdo de transferencia de riesgo cuyo valor se deriva –de ahí el nombre– del de un activo subyacente, siendo contratos a plazo, futuros, opciones y contratos por diferencias o *swaps* sus formatos más elementales.

En un «contrato a plazo» (*forward*) las partes se obligan a vender –«posición corta»– o comprar –«posición larga»– un determinado activo subyacente (*underlying asset*) en una fecha futura de vencimiento (*maturity*) y a un precio de entrega (*delivery price*) pre-establecidos. Si un contrato a plazo se negocia bilateral y privadamente (*over the counter-OTC*) al margen de un mercado organizado estando sometido por tanto a riesgo de crédito o contraparte, un «futuro» es un contrato a plazo estandarizado negociado en un mercado organizado con una cámara de compensación que actúa de nodo con el que interactúan los múltiples participantes preservando su anonimato y que, al requerir un depósito inicial que

CUADRO 1
LIBERALIZACIÓN Y TENDENCIAS EN LOS MERCADOS ENERGÉTICOS

	Petróleo	Gas Natural	Electricidad
Ámbito geográfico actual	Mercado global	Grandes mercados regionales: Norte América, Europa, Asia	Mercados necesariamente locales, pero con alto potencial de integración a mayor escala
Motivantes del inicio de la liberalización	<ul style="list-style-type: none"> Geopolíticos: descolonización de los años 60 y crisis de los 70. De las "Seven Sisters" a la nacionalización de las actividades <i>upstream</i>, con creación de las <i>National Oil Companies-NOC</i>'s y su agrupación en cártel (OPEC). 	<ul style="list-style-type: none"> Tecnológicos: desarrollo de tecnologías limpias de turbina de gas, licuefacción y regasificación (buques de GNL vs transporte punto a punto por gasoducto). Socio-económicos: en los años 80 el gas deja de ser un subproducto del petróleo para convertirse en producto energético <i>per-se</i>. Preocupaciones medioambientales. Impulso del gas natural como energía fósil de transición 	<ul style="list-style-type: none"> Tecnológicos: desarrollo de ciclos combinados, energías renovables y tecnologías de la información y las comunicaciones-TIC en los años 90 que eliminan la barrera de entrada por escala y propician la gestión de actividades de red de manera separada
Tendencia	<ul style="list-style-type: none"> Diálogo entre países productores y consumidores. Fórmulas de <i>partenariado</i> que abran proyectos <i>upstream</i> a participación de <i>Independent Oil Companies-IOC</i>'s 	<ul style="list-style-type: none"> Desindexación del petróleo, desarrollo de nuevos <i>hubs</i> y mercados a plazo, renegociación de contratos a largo plazo con cláusulas de destino y <i>take-or-pay</i> a raíz de la caída en la demanda y el énfasis en la políticas de ahorro y eficiencia energética 	<ul style="list-style-type: none"> Integración en mercados regionales. Nuevo paradigma de generación distribuida cercana al consumo y bidireccional (vs generación a gran escala y transporte unidireccional a largas distancias) y demanda como agente activo del sistema
Factores clave	<ul style="list-style-type: none"> Tecnológicos: <i>peak oil</i> y nuevas reservas (aguas profundas en México y Brasil), fuentes no convencionales (pizarras bituminosas), biocarburantes segunda generación. Geopolíticos: demandas económicas emergentes (China, India, Brasil...) 	<ul style="list-style-type: none"> Tecnológicos: perforación horizontal y fractura. <i>Fracking/shale gas</i>. Geopolíticos: nuevo papel de Estados Unidos como exportador, una vez se completan las inversiones (construcción de trenes de licuefacción) y cambios regulatorios (autorización exportaciones) necesarios. En Europa, desarrollo de nuevos corredores gaseístas alternativos al Rusia-Ucrania como el Nabucco e implementación del flujo inverso sur-norte y oeste-este. Socio-económicos: inquietudes medioambientales (sismicidad inducida, contaminación de acuíferos,...) generadas por nuevas técnicas de extracción 	<ul style="list-style-type: none"> Tecnológicos: vehículo eléctrico, generación distribuida, redes inteligentes, nuclear de cuarta generación -4G-, fusión... Regulatorios: impulso de integración física (interconexiones) y coordinación técnica (operadores de red) y regulatoria (separación o <i>unbundling</i> de actividades de red que son monopolio natural). Nuevos desarrollos regulatorios para el nuevo paradigma de demanda activa. Socio-económicos: post-Fukushima

Carbón

En general en el artículo apenas se menciona el carbón. El motivo es que, aun teniendo indiscutible importancia tanto histórica -por haber propiciado la revolución industrial- como actual -por ser un recurso doméstico clave en economías emergentes como China e India-, desde el punto de vista de su oferta -abundante y atomizada y por tanto sin tensiones geoestratégicas-, producción -en minería subterránea o de cielo abierto-, transformación -simple y de tipo mecánico, realizada en origen-, logística -transporte y almacenamiento sin requerimientos especiales- y consumo -tecnologías convencionales que han venido a ser la evolución de la máquina de vapor, con un énfasis reciente en las tecnologías de "carbón limpio" por inquietudes medioambientales- no tiene las complicaciones que tienen el resto de materias primas energéticas.

Dado que el transporte es una actividad costosa, suele ser habitual el consumo de carbón cercano a su centro de producción. Asimismo, es común la integración vertical de la producción de electricidad con carbón con su minería. Con estos antecedentes, y siendo muy variable la calidad del carbón, es sólo para los de muy buena calidad para los que existen mercados globales. En ellos, se observa una volatilidad menor que para otros productos energéticos.

Apuntar que un efecto del *boom* del gas pizarra en Estados Unidos ha sido el desplazamiento en la generación doméstica de electricidad del carbón de los Apalaches, que ha inundado y por consiguiente deprimido los precios en los mercados globales de carbón.

FUENTE: Elaboración propia.

se ajusta diariamente (*margin call*) a los valores de liquidación (*marking to market*), elimina así el riesgo de contraparte. Todo ello da a las operaciones con futuros mayor transferibilidad o liquidez, transparencia de precios y, en general, eficiencia transaccional al servir de referencia para los productos OTC, que como contrapartida ofrecen personalización y mayor eficacia en las coberturas, así como confidencialidad y menor coste en comisiones e intermediaciones.

Una «opción» da a su comprador o tenedor -posición larga- el derecho pero no la obligación de vender -acción de venta (*put*)- o comprar -acción de compra (*call*)- un determinado activo subyacente en -opción europea- o antes -opción americana- (3) de una determinada fecha futura de vencimiento, a un cierto precio de ejercicio (*strike*) y a cambio del pago al vendedor o emisor -*writer*, posición corta- de una prima (*premium*) que, como se verá más adelante,

CUADRO 2
ESTRATEGIAS ELEMENTALES CON DERIVADOS

Estrategia descubierta elemental	Liquidación al vencimiento	Posición física	Posición cubierta al vencimiento
Larga en un contrato a plazo o futuro	$S(T)-K$	Compradora o corta	$-S(T)+(S(T)-K)=-K$
Corta en un contrato a plazo o futuro	$K-S(T)$	Vendedora o larga	$S(T)+(K-S(T))=K$
Larga en una opción de compra	$\max(S(T)-X,0)$	Compradora o corta	$-S(T)+\max(S(T)-X,0)=\max(-S(T),-X)$
Corta en una opción de compra	$\min(X-S(T),0)$	-	0
Larga en una opción de venta	$\max(X-S(T),0)$	Vendedora o larga	$S(T)+\max(X-S(T),0)=\max(X,S(T))$
Corta en una opción de venta	$\min(S(T)-X,0)$	-	0

$S(T)$ el precio a contado a vencimiento; K es el precio de entrega; X el precio de ejercicio.

FUENTE: Elaboración propia.

le habrá de compensar adecuadamente del riesgo que el comprador le transfiere y que se materializa cuando este decide ejercitar su derecho.

En la práctica la liquidación de los contratos derivados no tiene por qué llevar aparejada la entrega física del subyacente –es por ello que en el caso del petróleo se habla de intercambio de “barriles de papel”– sino que puede hacerse de manera financiera en función de la diferencia entre el precio a contado a fecha de liquidación y el precio de entrega o ejercicio acordado, lo que abarata los costes de transacción y facilita el cierre o cancelación de una posición antes del vencimiento con la simple toma de una posición contraria.

Son posiciones descubiertas (*naked*) o especulativas las que se tienen antes de hacer una cobertura. En el caso de las opciones son cuatro las posiciones descubiertas básicas: compra de una opción de compra (*long on a call*), venta de una opción de compra (*short on a call*), compra de una opción de venta (*long on a put*) y venta de una opción de venta (*short on a put*). El hecho de que las posiciones largas –compradoras– en opciones presenten un alto apalancamiento –expectativa de un gran retorno con poca inversión y pérdida limitada a la prima en caso de no ejercitar el derecho– incentiva a veces su uso especulativo, a diferencia de lo que ocurre en el caso de las posiciones cortas –vendedoras– especulativas en las que la ganancia máxima a obtener es la prima.

Por el contrario, posiciones cubiertas (*hedged*) son las que buscan eliminar el riesgo. Cubrir la posición física natural descubierta de un productor energético –que es larga al beneficiarse de subidas del precio del subyacente– o la contraria del consumidor –posición corta– supone tomar una posición opuesta en un producto derivado: corta o vendedora en el caso del productor y larga o compradora en el caso del consumidor. El cuadro 2 muestra las estrategias descubiertas elementales y su efecto sobre una posición física.

Así, un productor de petróleo expuesto a que los precios del crudo bajen, puede cubrirse vendiendo crudo a plazo (*short hedger*) de manera que la pérdi-

da por la caída del precio al contado por debajo del precio a plazo se compense con la ganancia en la posición a plazo. Análogamente, y en el caso de subida del precio al contado por encima del de a plazo, el contrato a plazo generará una pérdida que compensaría el beneficio extra obtenido en el mercado al contado. De tal manera que el efecto total de la cobertura es asegurar el nivel que marca el precio de entrega acordado en el contrato. La renuncia del vendedor al sobreprecio que en el mercado a contado al vencimiento pudiera obtener con respecto al precio a plazo es la contrapartida en forma de prima de riesgo que ha de sacrificar a cambio de eliminarlo.

Alternativamente, puede comprar una opción de venta asegurándose así el precio de ejercicio como suelo por debajo del cual no caerá el precio de venta –«estrategia floor»–. El carácter de derecho que no de obligación de la opción otorga una flexibilidad que se traduce en que su ejercicio sólo se da si las circunstancias son propicias: que el precio de ejercicio de la opción de venta sea mayor que el precio al contado –opción *in the money*– y no menor –opción *out of the money*–, resultando indiferente cuando coinciden ambos valores –opción *at the money*–. Una opción equivale por tanto a un seguro cuyo parte de reclamación se da cuando está *in the money*. Siendo mayor la liquidación a vencimiento de la opción frente a la venta a plazo –puesto que permite beneficiarse de subidas de precio por encima del de ejercicio–, ésta no exige desembolso inicial alguno frente a la opción, por la que se ha de pagar anticipadamente la prima.

Por su parte, una refinería expuesta a que los precios del crudo suban, puede cubrirse comprando crudo a plazo (*long hedger*). Alternativamente, puede comprar una opción de compra de crudo asegurándose así el precio de ejercicio como techo por encima del cual no subirá su precio de compra –«estrategia cap»–. Del riesgo de que los precios de los productos refinados bajen puede cubrirse como se ha visto vendiendo productos refinados a plazo –posición corta– o comprando opciones de venta.

Este tipo de situación en la que los riesgos de mercado se manifiestan tanto por el lado de la materia

**CUADRO 3
ESTRATEGIAS COMBINADAS CON DERIVADOS**

Estrategia	Descripción
<i>Strangle</i>	Compra simultanea de una opción de venta con precio de ejercicio X_1 y una opción de compra de mismo vencimiento y con precio ejercicio $X_2 > X_1$, lo que da cobertura ante movimientos de los precios fuera del rango $[X_1, X_2]$. Si $X_1 = X_2$ (típicamente el precio actual del subyacente) la estrategia se denomina <i>straddle</i> . Estas estrategias tienen sentido en mercados volátiles, no en mercados "planos", y en ellas la contrapartida al sobrecoste de pagar dos primas por dos opciones es que el tenedor se puede beneficiar tanto de subidas como de bajadas en el subyacente.
<i>Collar o cylinder</i>	Compra de una opción de compra con precio de ejercicio X_1 y venta de una opción de venta con precio ejercicio X_2 , con $X_1 < X_2$, lo que acota la posición cubierta dentro del rango $[X_1, X_2]$
<i>Bullish</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Vertical bull call spread</i>: compra de una opción de compra con precio de ejercicio X_1 y venta de una opción de compra con mismo vencimiento y precio de ejercicio $X_2 > X_1$ • <i>Vertical bull put spread</i>: compra de una opción de venta con precio de ejercicio X_1 y venta de una opción de venta con mismo vencimiento y con precio de ejercicio $X_2 > X_1$ Ambas estrategias dan cobertura ante pequeñas subidas del subyacente en el rango $[X_1, X_2]$ (sentimiento alcista)
<i>Bearish</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Vertical bear call spread</i>: compra de una opción de compra con precio de ejercicio X_1 y venta de una opción de compra con mismo vencimiento y precio de ejercicio $X_2 < X_1$ • <i>Vertical bear put spread</i>: compra de una opción de venta con precio de ejercicio X_1 y venta de una opción de venta con mismo vencimiento y con precio de ejercicio $X_2 < X_1$ Ambas estrategias dan cobertura ante pequeñas bajadas del subyacente en el rango $[X_1, X_2]$ (sentimiento bajista)
<i>Butterfly spread</i>	<i>Butterfly call (put) spread</i> : compra de una <i>call (put) spread</i> y venta simultánea de otra, con precios de ejercicio $X_1 < X_2 < X_3$ que cumplen $X_3 - X_2 = X_2 - X_1$. El resultado es una apuesta sobre el nivel de precios X_2

FUENTE: Elaboración propia.

prima como de los productos, es la misma a la que se somete un productor de energía eléctrica mediante un ciclo combinado o una central de carbón que operen en un mercado liberalizado, al estar expuestos a los riesgos de precio en los mercados de gas natural o de carbón –que afectan a su compra de suministros– y electricidad –que afectan a sus ventas de producto–. Estas tensiones sobre el margen que afectan a los procesadores de energía pueden cubrirse realizando simultáneamente la compra de materia prima a plazo –posición larga– con la venta de producto también a plazo –posición corta– o bien adquiriendo en el mercado OTC un producto diferencial o *spread* –denominado *crack spread* para la refinería, *spark spread* para el ciclo combinado y *dark spread* para la central eléctrica de carbón.

Finalmente, otro tipo de derivado es el «contrato por diferencias» o *swap*, que en su versión más elemental obliga durante un periodo –da el derecho en el caso de un *swaption*– al intercambio de una cantidad de energía –«cantidad notional»– a un precio variable incierto por uno fijo establecido en el contrato, de manera que el comprador paga la "pata" fija –el precio fijo– al vendedor y la "pata" flotante –diferencia entre el fijo y un precio de referencia– lo pagará el vendedor al comprador si es positiva –precios altos– y el comprador al vendedor si es negativa –precios bajos–, equivaliendo por tanto a una serie de contratos a plazo (*strip of forwards*) con el mismo precio de entrega pero diferentes vencimientos. Así, tomando como ejemplo de subyacente el queroseno, la venta de un *swap* cubriría a la refinería del riesgo de bajos precios y su compra por un gran consumidor –una aerolínea– del de altos precios. Si la compra del *swap* se hace a una contraparte financiera, el comprador se suministrará la energía en el mercado físico e intercambiará con el comprador únicamente la "pata" flotante.

Es posible la combinación de instrumentos básicos, por ejemplo, una posición larga financiada con otra corta en opciones sobre un mismo subyacente de igual vencimiento pero distintos precios de ejercicio («*spread* vertical») (4), o con precios de ejercicio iguales pero vencimientos distintos («*spread* temporal u horizontal», *calendar spread*). Con ello se logran coberturas sintéticas o híbridas más sofisticadas, como las que se muestran en el cuadro 3.

LA "CAJA DE HERRAMIENTAS" ESTÁNDAR DE LAS FINANZAS ↓

En la valoración de contratos a plazo, la clave es la «hipótesis de ausencia de oportunidades de arbitraje», de acuerdo con la cual en un momento dado t la relación entre el precio $F(t, T)$ de entrega de un contrato a plazo con vencimiento T y el precio al contado del activo subyacente $S(t)$ ha de ser

$$F(t, T) = S(t) \cdot (1+r)^{(T-t)} \text{ (capitalización discreta)}$$

$$F(t, T) = S(t) \cdot e^{r(T-t)} \text{ (capitalización continua)}$$

En efecto, si fuera posible tomar prestado al tipo r libre de riesgo (5) una cantidad $S(t)$ para comprar en el mercado a contado una unidad de subyacente y simultáneamente venderlo a plazo –estrategia *cash and carry*– por un precio superior a la cantidad $S(t) \cdot (1+r)^{(T-t)}$ correspondiente al préstamo inicial con sus intereses, el exceso sería un beneficio sin riesgo alguno. Esta sobrevaloración llamaría la atención de arbitrajistas que incrementarían la oferta a plazo lo que, junto con la disminución de la demanda cuando esta se percate de que se le está ofertando un producto sobrevalorado, provocaría que su precio disminuyera hasta su valoración correcta.

El modelo sugiere un paralelismo existente entre los precios a contado y a plazo, lo que como se verá más adelante tiene implicaciones prácticas: por un lado, la equivalencia en la cobertura que supone la inclusión en una cartera un subyacente o un contrato a plazo sobre el mismo; por otro, la existencia de una regla de conciliación o restricción en un grado de libertad en el modelado simultáneo de precios al contado y a plazo a partir de observaciones de mercado. Asimismo, el modelo captura el fenómeno de «convergencia al vencimiento» por el cual los dos productos a contado y a plazo son equivalentes al vencimiento ($t=T$), o $F(T,T) = S(T)$, lo que permite dar una interpretación general del contado como plazo de vencimiento inmediato.

En cuanto a la valoración de opciones, predomina el uso de fórmulas cerradas del tipo Black-Scholes –BS en lo sucesivo–, que calcula la prima a pagar C por una opción en función de parámetros objetivos mediante una expresión explícita del tipo $C=C(S, X, T-t, r, \sigma)$ y que, capturando la complejidad de la realidad (6), tiene el atractivo de su sencillo uso (pues está tabulada o se incorpora ya en la casi totalidad de los programas de hojas de cálculo y calculadoras de bolsillo) a partir de características propias del contrato de opción (como es el precio de ejercicio X o el tiempo restante hasta el vencimiento de la opción $T-t$) o variables observables en el mercado (cotización del subyacente S , desviación típica σ de sus rendimientos y tipo de interés libre de riesgo en tiempo continuo r).

Una idea feliz –estrategia de inversión dinámica en una cartera replicante autofinanciada– y destreza matemática –dominio del cálculo diferencial estocástico (ver recuadro 1)– fueron los elementos sobre los cuales Black (7), Scholes y Merton construyeron su modelo allá por 1973, demostrando que una cartera compuesta del subyacente y bonos sin riesgo –letras del tesoro– puede ser autofinanciada –esto es, no requerir más inyección de dinero que la inicial– si su composición se ajusta dinámicamente de acuerdo con cierta ley que en el momento de vencimiento replique la liquidación de la opción que se pretende valorar. El vendedor de la opción sin intenciones especulativas dispondrá así de una estrategia de cobertura perfecta para el eventual caso de que el comprador decida ejercer su derecho a fecha de vencimiento y, por un argumento de ausencia de oportunidades de arbitraje, de una valoración de la opción en cualquier momento de su vida que resulta justa por retribuirlle adecuadamente el riesgo que asume.

En la práctica la estrategia de inversión o cobertura dinámica no resulta factible por ser inviable un reajuste continuo, de manera que a lo sumo se hará cada cierto tiempo, en una aproximación discreta que impide que la cobertura sea perfecta por incumplimiento de la condición de autofinanciación: si se ha de comprar subyacente, se disminuirá la posición larga en bonos sin riesgo –lo que equivale a aumentar

una posición corta, esto es, pedir un préstamo al interés libre de riesgo– y, si se ha de vender subyacente, se reinvertirá en bonos sin riesgo el importe de la venta.

Formalmente (ver recuadro 2, en páginas siguientes), el marco de valoración BS supone el planteamiento de una ecuación en derivadas parciales –ecuación de BS– que con la condición de frontera correspondiente a una opción de compra europea sobre una acción que no reparta dividendos tiene solución analítica: la fórmula de BS. En la formulación del problema es necesario aplicar las reglas del cálculo diferencial estocástico –cálculo de Itô– por modelarse el riesgo del subyacente mediante un proceso de tal característica (8), en este caso de tipo «movimiento geométrico browniano», que desglosa el retorno en precios dS/S que un subyacente arroja en un periodo δt en una parte determinista o newtoniana (componente en μ , deriva o *drift*) y otra aleatoria o browniana (componente en σ , volatilidad), de manera que sigue una distribución terminal $N(\mu \cdot \delta t, \sigma \cdot \sqrt{\delta t})$. Es decir, se asume que los retornos en precio en un periodo δt son normales con un valor esperado $\mu \cdot \delta t$ siempre positivo y una desviación típica $\sigma \cdot \sqrt{\delta t}$, parámetros ambos por tanto crecientes con el horizonte temporal, aunque el primero de forma lineal y el segundo según su raíz cuadrada, lo que asume una aditividad de las varianzas de periodos consecutivos y asegura la positividad de sus cotizaciones, que seguirían un «proceso log-normal»(9).

Una debilidad del modelo BS es que asuma constante la volatilidad σ , pues en los mercados de derivados se observa que la «volatilidad implícita», que es la que resulta de resolver en σ la ecuación $C = C(S, X, T-t, r, \sigma)$, para el caso de opciones de compra sobre un mismo subyacente y con el mismo vencimiento pero diferentes precios de ejercicio X , presenta un valor mínimo para la opción que está at the money ($X=S$), aumentando para las otras opciones que por su precio de ejercicio se acercan o alejan de ese umbral que en cada momento marca la cotización del subyacente, y en lo que por su representación gráfica se conoce como «sonrisa de volatilidad» (10). Como contrapartida, el que sea σ el parámetro de más controvertida medición lo convierte en puerta natural para el «parcheo» del modelo de cara a la consideración de desviaciones de sus hipótesis de partida.

Una alternativa de valoración de tipo discreto es el «método binomial» propuesto por Cox, Ross y Rubinstein en su artículo de 1979, en una contribución seminal que sentó las bases de la valoración de opciones por métodos numéricos –a los que hay que recurrir forzosamente en el caso de opciones más complejas como las de tipo americano, que contemplan la posibilidad de un ejercicio temprano– atendiendo a intuiciones exclusivamente económico-financieras y sin requerir el sofisticado aparato matemático del problema en continuo (ver recuadro 3).

RECUADRO 1. PROCESOS ESTOCÁSTICOS Y CÁLCULO DE ITÔ

Un proceso estocástico describe la evolución temporal de una variable aleatoria, pudiendo ser continuo si la variable cambia continuamente o discreto si lo hace sólo en determinados instantes. Su versión continua más simple es el «movimiento browniano» que experimenta incrementos independientes y normalmente distribuidos –gaussianos–, lo que formalmente se expresa mediante un «proceso de Wiener» $dW = \epsilon \cdot \sqrt{dt}$ en donde ϵ es una ocurrencia aleatoria de la normal estándar $N(0, 1)$.

El proceso de Wiener es una «martingala», que en general es un proceso estocástico Z para el cual el valor esperado del valor final es siempre el valor actual, esto es $E[Z(T) | Z(t) = z] = z$ para cualesquiera t y T con $t \leq T$. Para entender el concepto de martingala, resulta ilustrativa la «falacia del jugador» según la cual si se está jugando en un casino, es erróneo pensar que tras una racha de pares se ha de apostar a impares, cuando sigue siendo la misma la probabilidad para ambas apuestas si es que la ruleta no está trucada.

Toda martingala es un «proceso de Markov»: proceso estocástico en el que sólo el valor presente es relevante para predecir el futuro, siendo la historia irrelevante. Esta «ausencia de memoria» *markoviana* está en la hipótesis de mercados eficientes de Eugene Fama -de la Universidad de Chicago, premio Nobel de Economía de 2013- según la cual la evolución pasada de un valor bursátil es irrelevante para predecir su evolución futura, al ser la cotización presente la que aglutina toda la información relevante. El que los valores sigan un «camino aleatorio» o *random walk* –que es una versión discreta del movimiento browniano– desacredita el análisis técnico o «chartismo» como estrategia para la consecución sostenida de beneficios.

Modelos como el movimiento aritmético browniano, movimiento geométrico browniano y sus variantes con reversión a la media, son generalizaciones del proceso de Wiener que, al añadir a la dinámica browniana elemental una componente determinista –derivada–, pierden la condición de martingala aun siendo todavía procesos markovianos.

Procesos de Wiener con deriva o generalizados

	Ordinarios	Con reversión a la media
Versiones aritméticas o de niveles	$dx = a \cdot dt + b \cdot dW$	$dx = a \cdot (\bar{x} - x) \cdot dt + b \cdot dW$
Versiones geométricas o de variaciones unitarias	$dx = a \cdot x \cdot dt + b \cdot x \cdot dW$	$dx = a \cdot (\ln \bar{x} - \ln x) \cdot x \cdot dt + b \cdot x \cdot dW$

El cálculo de Itô se utiliza para la derivación e integración de procesos estocásticos, para los cuales las reglas prácticas del cálculo convencional –primer teorema fundamental, segundo teorema fundamental o regla de Barrow y regla de la cadena, que evitan los engorrosos cálculos de derivadas como límites e integrales como sumas parciales– no son válidas a no ser que incorporen una corrección que tenga en cuenta los efectos de segundo orden propios de estos procesos, lo que da lugar al lema de Itô: si x sigue un proceso de Itô $dx = a(x,t) \cdot dt + b(x,t) \cdot dW$ en el que dW es un proceso de Wiener y $G = G(x,t)$ entonces

$$dG = \left(a \cdot \frac{\partial G}{\partial x} + \frac{1}{2} \cdot b^2 \cdot \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial G}{\partial t} \right) \cdot dt + \frac{\partial G}{\partial x} \cdot b \cdot dW$$

En la derivación heurístico-intuitiva de Wilmott, se hace un desarrollo en serie de Taylor de G teniendo en cuenta que de los términos de orden superior a uno se ha de retener el de segundo orden $dW^2 \sim dt$.

Así por ejemplo, la diferencial del cuadrado W^2 de un proceso de Wiener no es $2 \cdot W \cdot dW$ sino $dW^2 = 2 \cdot W \cdot dW + dt$. Y la integral entre 0 y T de $2 \cdot W$ no es T^2 sino $\int_0^T 2 \cdot W \cdot dW = W_T^2 - W_0^2 - T$. La intuición es que una realización de un proceso estocástico es una función que, siendo continua, no es derivable en ningún punto de su dominio puesto que, vista al microscopio, es una sucesión de picos. En estas circunstancias, deja de tener sentido una integral definida al estilo de Riemann como valor límite al que convergen las sumas inferiores y superiores de subáreas elementales –resultantes de una partición del dominio de integración en intervalos y la evaluación de la función integrando en sus límites inferior y superior, respectivamente– cuya interpretación geométrica es el área cobijada bajo la función. Por el contrario, el resultado de una integral similar dependerá del punto del intervalo del integrador –que es un proceso de Wiener– en el que se evaluara la función integrando. En el ámbito financiero resulta oportuno utilizar a tal efecto el límite inferior de cada intervalo $W_{t_{i-1}}$ por ser el único “que no mira al futuro”, lo que da lugar a la integral de Itô:

$$\int_0^t f(W) \cdot dW = \lim_{(n \rightarrow \infty)} \sum_{i=1}^n f(W_{t_{i-1}}) \cdot (W_{t_i} - W_{t_{i-1}})$$

y es $E \left[\int_0^t f(W) \cdot dW \middle| \mathcal{F}_t \right] = \int_0^t f(W) \cdot dW$ para cualesquiera t y T con $t \leq T$

Se preserva así la condición de martingala, siendo la integral “indefinida” de una martingala también una martingala –y la integral de una realización concreta del integrando, una realización del proceso integrado–. Si la integración es “definida” entre ciertos límites de integración, para un proceso estocástico dará por resultado un número aleatorio –véase el ejemplo de unas líneas más arriba– y, para una realización concreta, un número concreto.

FUENTE: Elaboración propia

Se trata de un modelo sencillo de un periodo en el que la realidad se simplifica al considerar que sólo son posibles dos estados de la naturaleza: uno en el que el subyacente evoluciona al alza y otro en el que lo hace a la baja. Sin que intervengan las probabilidades reales de ocurrencia de ambos estados, y con la estrategia ya expuesta de replicar una opción mediante una cartera compuesta, se llega a una expresión en la que un derivado se valora descontando a

la tasa libre de riesgo lo que formalmente se asemeja a un valor esperado de su flujo de caja al vencimiento, pero calculado según una medida de probabilidad nominada «riesgo-neutral» en la que los factores de ponderación o «pseudo-probabilidades» que se utilizan embeben el riesgo. Según este enfoque, en la valoración de un derivado lo relevante no es la realidad estadística del subyacente –«medida de probabilidad real P »–, sino la realidad de la valo-

**RECUADRO 2. FINANZAS CONVENCIONALES EN CONTINUO
MARCO BLACK-SCHOLES**

Contratos a plazo

Valoración por ausencia de oportunidades de arbitraje: $F(t, T) = S(t) \cdot e^{r(T-t)}$ y por tanto $\frac{\partial F}{\partial S} = e^{r(T-t)}$ y $\frac{dF}{F} = \frac{dS}{S} - r \cdot dt$ si r es constante

La «función de pagos» $f(t) = e^{-r(T-t)} \cdot (F(t, T) - K) = S(t) - e^{-r(T-t)} \cdot K$ da el valor de liquidación en cualquier momento t de la vida de un contrato a plazo suscrito en $t=0$ con vencimiento T y precio de entrega K , reflejándose que:

- en el momento de la negociación $t=0$ se acuerda y se escribe en el contrato el precio de entrega a plazo $K = F(0, T) = S(0) \cdot e^{-rT}$ sin que haya pago inicial alguno, de manera que $F(0) = e^{-rT} \cdot (F(0, T) - K) = e^{-rT} \cdot (F(0, T) - F(0, T)) = 0$
- en el momento del vencimiento $t=T$, y en virtud de la condición de convergencia $F(T, T) = S(T)$ se tiene que $f(T) = e^{-r(T-T)} \cdot (F(T, T) - K) = S(T) - K$ como en efecto ocurre.

Una función de pagos para futuros habría de incorporar componentes por los márgenes que exige la cámara de compensación, si bien puede demostrarse que con tipos de interés deterministas y sin riesgo de contraparte, los contratos a plazo y los futuros son equivalentes.

Movimiento Geométrico Browniano

$$\frac{dS}{S} = d(\ln S) = \mu \cdot dt + \sigma \cdot dW \text{ con } \mu > 0 \text{ (deriva) y } \sigma > 0 \text{ (desviación típica)}$$

Por aplicación del lema de Itô se tiene la propiedad log-normal: $dS = \left(\mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) \cdot dt + \sigma \cdot dW$

e integrando, $S(t + \delta t) = S(t) \cdot e^{\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) \delta t + \sigma \cdot dW}$ y por tanto $S(t) = S(0) \cdot e^{\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) t + \sigma \cdot (W_t - W_0)} > 0$ (positividad de precios)

Calibrado del modelo: observar cotizaciones diarias S_t y calcular la media \hat{m} y la desviación típica $\hat{\sigma}$ de la distribución de rendimientos unitarios diarios $\ln \frac{S_t}{S_{t-1}} \approx \frac{S_t - S_{t-1}}{S_{t-1}}$ de manera que anualmente $\hat{\sigma} = \hat{\sigma} \cdot \sqrt{n}$ y $\hat{\mu} = \left(\hat{m} + \frac{1}{2} \cdot \hat{\sigma}^2 \right) \cdot n$ con $n=260$ días=52 semanas x 5 días/semana (negociación sólo en días laborables).

Aplicando el lema de Itô a la expresión de valoración de un contrato a plazo en ausencia de oportunidades de arbitraje, se tiene

$$\frac{dF}{F} = (\mu - r) \cdot dt + \sigma \cdot dW$$

Ecuación de BS

$$\frac{\partial C}{\partial t} + r \cdot S \cdot \frac{\partial C}{\partial S} + \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \cdot S^2 \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial S^2} = r \cdot C$$

De aplicar el lema de Itô a la cartera $\Pi = m \cdot B + n \cdot S$ con la condición de autofinanciación $d\Pi = m \cdot dB + n \cdot dS$ ha de ser $n = \frac{\partial \Pi}{\partial S}$ y $m = \left(\Pi - \frac{\partial \Pi}{\partial S} \cdot S \right) \cdot B^{-1}$ en lo que supone un ajuste continuo de la cartera compuesta por subyacente S y bonos sin riesgo B .

Alternativamente se puede componer $\Pi = C + n \cdot S$ que si se escoge $n = -\frac{\partial C}{\partial S}$ resulta ser instantáneamente independiente del factor de riesgo dW y proporciona por tanto un retorno r libre de riesgo (riesgo-neutralidad):

Resolviendo la ecuación BS con la condición de contorno $C(T) = \max(S(T) - X, 0)$, se tiene la fórmula de BS.

Fórmula de BS

$$C(t) = N(d_1) \cdot S - e^{-r(T-t)} \cdot N(d_2) \cdot X \text{ y por tanto } \frac{\partial C}{\partial S} = N(d_1) = \Delta \in (0, 1)$$

Valor extrínseco $C(t)$ = Valor intrínseco $(S(t) - X)$ + Valor temporal $< S(t)$

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{X}\right) + r \cdot (T-t)}{\sigma \cdot \sqrt{T-t}} + \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot \sqrt{T-t} = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{T-t}} \cdot \left[\ln S - \ln X + \left(r + \frac{\sigma^2}{2} \right) \cdot (T-t) \right]$$

$$d_2 = d_1 - \sigma \cdot \sqrt{T-t}$$

Volatilidad implícita: la que resulta de resolver en σ la ecuación $C = C(S, X, T-t, r, \sigma)$

Paridad Put-Call: $P + S = C + e^{-r(T-t)} \cdot X$ siendo P la prima a pagar por una opción de venta europea sobre el mismo subyacente S y con el mismo vencimiento T .

El modelo de BS proporciona la estrategia que ha de seguir el vendedor de la opción no especulativo para cubrirse de la eventualidad de que el comprador la ejerza a fecha de vencimiento: a la firma del contrato adquirirá $N(d_1(t=0)) = \frac{\partial C}{\partial S} \Big|_{t=0} < 1$ unidades del subyacente financiadas con el importe de la prima C que recibe y el de un préstamo de $N(d_2(t=0)) < 1$ veces el valor actual del precio de ejercicio X y, conforme trascurre el tiempo y vaya cambiando la cotización del subyacente, en lo que constituye una estrategia de inversión o cobertura dinámica, reajustará comprando o vendiendo subyacente según corresponda para que en cada momento t su cantidad sea exactamente $N(d_1) = \frac{\partial C}{\partial S} = \Delta \left(\frac{S}{X}, \sigma \cdot \sqrt{T-t} \right)$.

(Continúa en página siguiente)

**RECUADRO 2 (cont.) FINANZAS CONVENCIONALES EN CONTINUO
MARCO BLACK-SCHOLES**

Griegas

Dada una cartera $\Pi = \Pi(t, S, \sigma, r)$ su variación se puede expresar como

$$d\Pi = \frac{\partial \Pi}{\partial t} \cdot dt + \frac{\partial \Pi}{\partial S} \cdot dS + \frac{\partial \Pi}{\partial \sigma} \cdot d\sigma + \frac{\partial \Pi}{\partial r} \cdot dr + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 \Pi}{\partial S^2} \cdot dS^2 + \dots = \theta \cdot dt + \Delta \cdot dS + \nu \cdot d\sigma + \rho \cdot dr + \frac{1}{2} \cdot \Gamma \cdot dS^2 + \dots$$

En estos términos, la ecuación BS resulta $\theta + r \cdot S \cdot \Delta + \frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \cdot S^2 \cdot \Gamma = r \cdot \Pi$ y de la paridad put-call $\Delta_p + 1 = \Delta_c$ y $\Gamma_p = \Gamma_c$

Si $\Pi = C$ y $n = -\frac{\partial C}{\partial S} = -\Delta$ entonces $\frac{\partial(\Pi + n \cdot S)}{\partial S} = \frac{\partial \Pi}{\partial S} + n = \Delta - \Delta = 0$ («cobertura delta») y $\frac{\partial(\text{var}(\Pi + n \cdot S))}{\partial n} = 0$ (cobertura de mínima varianza). O equivalentemente, y dada la relación existente entre precios a contado y a plazo, la misma cobertura delta la proporciona una posición en contratos a plazos en la cantidad $-e^{-r(T-t)} \cdot \Delta$ también variable.

Si $\Delta = 0$ (cobertura delta) y además $\Gamma = 0$ (cobertura gamma) al ser entonces $\theta = r \cdot \Pi$ no es posible una cobertura total.

FUENTE: Elaboración propia

**CUADRO 4
OPCIONES EXÓTICAS**

Tipo	Características
Asiáticas	Su liquidación es en función de un valor promedio –en sentido general– del subyacente \bar{S} , para evitar manipulaciones sobre el mismo o el impacto de transacciones de gran volumen. Así, las dos modalidades básicas de opción de compra asiática tendrían por liquidación al vencimiento $\text{máx}(\bar{S} - X, 0)$ y $\text{máx}(S(T) - \bar{S}, 0)$ respectivamente.
Con barrera	Dejan de existir (<i>knock-out: up and out, down and out</i>) o comienzan a aplicarse (<i>knock-in: up and in, down and in</i>) sólo si el subyacente cruza determinado nivel o barrera (hacia arriba – <i>up barriers</i> – o hacia abajo – <i>down barriers</i> –). Al ofrecer menos opcionalidad, resultan más baratas que las convencionales.
Lookback	Su liquidación es en función del precio del subyacente más alto –opción de compra– o más bajo –opción de venta– durante la vida de la opción, siendo $\text{máx}(S_{\text{máx}} - X, 0)$ y $\text{máx}(X - S_{\text{mín}}, 0)$ respectivamente. Resultan por tanto más caras que las convencionales.
Cliquet	Contempla una serie de fechas en cada una de las cuales la opción se liquida por su valor intrínseco reajustándose al valor del subyacente el precio de ejercicio a aplicar en la siguiente fecha.
Ladder	Contempla una serie de niveles de precio al llegar a cada uno de los cuales la opción se liquida por su valor intrínseco reajustándose al valor del subyacente el precio de ejercicio a aplicar en la siguiente liquidación.
Quanto	Nominada en una divisa doméstica diferente a la de cotización del subyacente, de manera que para una opción de compra con estas características su liquidación al vencimiento T sería $\text{máx}(f_c(T) \cdot S(T) - X_c, 0)$ en donde X_c es el precio de ejercicio expresado en moneda doméstica y $f_c(T)$ el tipo de cambio a fecha de vencimiento T entre la divisa a la que cotiza el subyacente y la divisa doméstica, de manera que $f_c(T) \cdot S(T)$ es el contravalor a moneda doméstica de la cotización del subyacente a vencimiento T expresada en divisa origen $S(T)$. Permite la cobertura ante evoluciones desfavorables en los tipos de cambio cuando la liquidación de la cobertura y la posición descubierta están nominadas en diferente divisa.

FUENTE: Elaboración propia

ración del riesgo que los mercados dan de derivados negociados sobre un mismo subyacente –«medida de valoración riesgo-neutral Q»–: si p es la probabilidad de cierta contingencia futura en el día D , la cantidad q que hoy se pagaría en el mercado por recibir una unidad monetaria el día D en caso de materializarse la contingencia no tiene por qué coincidir con p , pues dependerá de la aversión al riesgo de un agente representativo.

Por tanto, con la medida Q que descuenta flujos al tipo libre de riesgo r , cualquier activo –y en particular el subyacente– proporcionará tal rentabilidad, en una situación de indiferencia al riesgo en la que no hay predisposición de los agentes a pagar prima alguna por su evitación: el «mundo riesgo-neutral». Esto ayuda a entender el a priori sorprendente hecho de que en la ecuación y en la fórmula de BS, la rentabilidad μ esperada en los retornos del subyacente, que es uno de los dos parámetros de su modelo de precios, luzca por su ausencia, siendo el otro de los parámetros σ que describe la amplitud en la dispersión de los retornos del subyacente el verdaderamen-

te relevante en la valoración, como pone de manifiesto el método binomial.

La idea es muy poderosa puesto que da un significado económico a las discretizaciones para la resolución por métodos numéricos de la ecuación de BS en ausencia de solución analítica, permitiendo su planteamiento directo en lugar de como aproximación en diferencias finitas a un problema de contorno formulado en continuo. Así, la generalización del modelo binomial a varios períodos –lo que da lugar a un árbol de precios del subyacente de varias ramas– y su parametrización para que refleje la realidad de un proceso log-normal de precios riesgo-neutral es un método discreto que proporciona en el límite el mismo resultado que la fórmula continua de BS para una opción de compra europea sobre una acción que no reparta dividendos.

Un resultado relacionado es la «fórmula de Feynman-Kac» que interpreta en términos probabilísticos riesgo-neutrales la solución de la ecuación de BS y que fundamenta la valoración de derivados por simula-

ción numérica de Monte Carlo descontando a la tasa libre de riesgo la liquidación al vencimiento promedio del derivado resultante de simulaciones independientes del subyacente en las que en su ecuación diferencial estocástica se ha ajustado su componente determinista de deriva minorándola en la prima de riesgo, en un método especialmente indicado para los casos de varias fuentes de incertidumbre («opciones arcoíris» o *rainbow*, como es el caso de los *spreads* ya introducidos) o para sofisticaciones en la modalidad de ejercicio («opciones exóticas») como ocurre en las opciones «asiáticas», «con barrera», «lookback», «cliquet», «ladder» y «quanto» que se describen someramente en el cuadro 4, en página anterior.

Para valorar opciones de tipo americano resulta más apropiado el uso de árboles, que, a diferencia de lo que ocurre con la simulación Monte Carlo, pueden ser recorridos hacia atrás en el tiempo para definir así la estrategia de ejercicio óptimo en un proceso de inducción recursiva propio de la programación dinámica que ha de tener en cuenta que el ejercicio temprano supone la captura del «valor intrínseco» o de liquidación pero la renuncia al «valor extrínseco» o temporal. Un resultado interesante es que una opción de compra americana sobre una acción que no reparta dividendos tiene el mismo valor que una europea porque no conviene su ejercicio temprano, pues así se retrasa el pago del precio de ejercicio y además, de caer el subyacente por debajo de este, se sigue disponiendo del seguro que proporciona la opción. Por el contrario, una opción de venta americana convendría ejercitarla tan pronto esté *in the money* (11) puesto que así se colocaría a rendir el importe ingresado por la liquidación.

Una vez descritos los fundamentos de la valoración individual de acciones, procede considerar su papel en el contexto de una cartera genérica de activos, para la cual son indicadores de riesgo agregado los cambios de su valor en términos *ceteris paribus* para cada uno de los parámetros de los que depende. Así, la variación de una cartera con respecto al valor del subyacente, manteniendo constante el resto de los parámetros, es la «delta» de la cartera. Análogamente, y utilizando otras letras griegas, se puede definir la sensibilidad a cambios en la volatilidad –«vega»–, el tipo de interés –«rho»–, el transcurrir del tiempo –«theta»–, o incluso cambios de segundo orden, como el que mide la “velocidad” en los cambios de la delta –«gamma»–. En general, cubrir una cartera significa hacerla insensible a los cambios de los parámetros de los cuales depende su valor, lo que formalmente supone anular las “griegas” y lo que en la práctica se consigue añadiendo a la cartera activos cuyas griegas neutralicen las de los activos ya incluidos en la misma.

Así, la «cobertura delta» de una posición corta en una opción de compra europea sin dividendos se logra incluyendo el subyacente en una cantidad variable en el tiempo como se ha venido discutiendo.

Ello motiva otra composición de la cartera replicante de BS basada en una posición larga en el subyacente y una posición corta en el derivado en la que en cada momento el número de unidades de subyacente de escoja de manera que la cartera sea instantáneamente independiente de las variaciones en aquel y, por tanto, con un rendimiento libre de riesgo. Un resultado interesante es que esta estrategia minimiza la varianza de la posición cubierta, lo que generalizado a casos más complejos constituye el fundamento de la gestión de carteras por la «técnica de minimización de la varianza».

Por su parte, la «cobertura gamma» exige incluir derivados sobre el mismo subyacente pero con diferente vencimiento y precio de ejercicio. Es de notar que una vez realizadas las coberturas *delta* y *gamma*, no resultaría posible realizar además una «cobertura theta» puesto que de la ecuación de BS expresada en términos de las griegas resultaría un valor no nulo para *theta*. Por tanto, no es posible una cobertura total que haga una cartera insensible a cualquiera de los parámetros de los cuales su valor depende.

PECULIARIDADES DE LOS RIESGOS ENERGÉTICOS

Coste de acarreo, rendimiento de posesión y riesgo de base

La principal característica de los productos energéticos que afecta al modelado, valoración, exposición y cobertura de riesgos es su almacenabilidad, limitada en el caso de carbón e hidrocarburos –crudo, productos petrolíferos o gas natural– e inviable en el caso de la electricidad –soluciones de bombeo hidráulico aparte–. El hecho que la mera posesión de un producto energético almacenable suponga incurrir en unos costes –financiación del inventario y costes de almacenamiento en sentido amplio: almacén, seguros, riesgo de deterioro y obsolescencia, etc.– y, eventualmente, obtener cierta utilidad –disponer de reservas de gasóleo C o gas natural cuando sobreviene una ola de frío imprevista; o evitar el coste que supone tener que paralizar un proceso productivo– exige reconsiderar la valoración en ausencia de oportunidades de arbitraje. Reflejando la indiferencia de los agentes entre una estrategia de *cash and carry* y la suscripción de un contrato a plazo, con capitalización discreta resultaría:

$$F(t, T) = S(t) \cdot (1 + r)^{T-t} + \text{Costes almacenamiento} - \text{Rendimiento posesión}$$

Con capitalización continua, se tendría que

$$F(t, T) = S(t) \cdot e^{(r+c)(T-t)} = S(t) \cdot e^{(r-y)(T-t)} = \frac{S(t) \cdot e^{r(T-t)}}{e^{y(T-t)}}$$

donde *c* es el coste de almacenamiento expresado en tasa continua, *r+c* es el «coste de acarreo» (*cost of carry*), *q* la tasa de «rendimiento de posesión o tenencia» (*convenience yield*) y por tanto *y=q-c* la

RECUADRO 3. ENFOQUE RIESGO-NEUTRAL, ÁRBOLES Y SIMULACIÓN

Modelo binomial de un periodo (descuento discreto)

$$C = \frac{1}{1+r} \cdot [q \cdot C_u + (1-q) \cdot C_d]$$

$$q = \frac{1+r-d}{u-d} \text{ con } d < 1+r < u \text{ y por tanto } 0 < q < 1$$

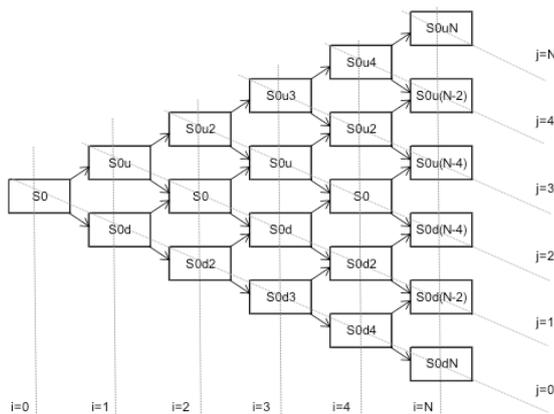
donde para una opción de compra europea sobre una acción que no reparta dividendos es $C_u = \max[S_u - X, 0]$ con $S_u = u \cdot S_0$ y $u \geq 1$ (escenario alcista) y $C_d = \max[S_d - X, 0]$ con $S_d = S_0$ y $0 < d \leq 1$ (escenario bajista).

Interpretación de q: "pseudo-probabilidad" o probabilidad de cambio al alza en un mundo riesgo-neutral de forma que

$$q \cdot \left(\frac{S_u - S_0}{S_0}\right) + (1-q) \cdot \left(\frac{S_d - S_0}{S_0}\right) = r \Rightarrow q \cdot (u-1) + (1-q) \cdot (d-1) = r$$

Modelo binomial de N periodos (con $T=N \cdot \Delta t$ y descuento continuo):

(opción de compra europea sobre acción que reparte dividendos a una tasa continua y)



$$C = e^{-rt} \cdot \left\{ \sum_{j=0}^N \binom{N}{j} \cdot q^j \cdot (1-q)^{N-j} \cdot \max[S_0 \cdot u^j \cdot d^{N-j} - X, 0] \right\}$$

$q \cdot u + (1-q) \cdot d = e^{(r-y) \Delta t}$ (riesgo-neutralidad) y $q \cdot u^2 + (1-q) \cdot d^2 - (e^{(r-y) \Delta t})^2 = \sigma^2 \cdot \Delta t$ (Teorema de Girsanov)

$$u = e^{\sigma \sqrt{\Delta t}} \approx 1 + \sigma \cdot \sqrt{\Delta t} \text{ y } d = e^{-\sigma \sqrt{\Delta t}} \approx 1 - \sigma \cdot \sqrt{\Delta t} = \frac{1}{u} \text{ (árbol recombinante) y } q = \frac{e^{(r-y) \Delta t} - d}{u - d}$$

Opciones americanas

Valorar su liquidación en los nodos finales del árbol riesgo-neutral mediante $V_{N,j} = f(S_0 \cdot u^j \cdot d^{N-j})$ y aplicar recurrencia hacia atrás para su valoración en los nodos intermedios $V_{i,j} = \max[\text{valor intrínseco}(S_0 \cdot u^j \cdot d^{i-j}), e^{-r \cdot \Delta t} \cdot (q \cdot V_{i+1,j+1} + (1-q) \cdot V_{i+1,j})]$

Fórmula de Feynman-Kac: $V(t) = e^{-r(T-t)} \cdot E^{RN}[f(T)]$

$V(t)$ es el valor en t de un derivado cuya liquidación a vencimiento $f(T)$ se calcula utilizando la esperanza E^{RN} en el mundo riesgo-neutral, en el que el subyacente sigue un proceso como el real pero con deriva r en lugar de μ . En general, si de acuerdo al CAPM es $\mu = r + \pi$, si $\lambda = \pi / \sigma$ es el precio de riesgo del mercado por unidad de volatilidad, se tendrá que la prima de riesgo es $\pi = \lambda \cdot \sigma$ de manera que: $dS/S = \mu \cdot dt + \sigma \cdot dW = (r + \pi) \cdot dt + \sigma \cdot dW = (r + \lambda \cdot \sigma) \cdot dt + \sigma \cdot dW = r \cdot dt + \sigma \cdot (\lambda \cdot dt + dW) = r \cdot dt + \sigma \cdot dW^{RN}$. Es decir, para construir el proceso riesgo-neutral se ha de minorar la deriva original en la cantidad $\pi = \lambda \cdot \sigma$. Así:

- Proceso riesgo-neutral para el subyacente en el caso de Movimiento Geométrico Browniano: $\mu - \pi = (r + \pi) - \pi = r$

$$\frac{dS}{S} = d(dnS) = r \cdot dt + \sigma \cdot dW^{RN} \cdot \text{integrando, } S(t + \delta t) = S(t) \cdot e^{\left(\frac{r-\sigma^2}{2}\right)\delta t + \sigma \cdot \delta W^{RN}} \text{ y por tanto } S(t) = S(0) \cdot e^{\left(\frac{r-\sigma^2}{2}\right)t + (\sigma \cdot \sqrt{t})\epsilon}$$

- Proceso riesgo-neutral para el contrato a plazo: $dF/F = dS/S - r \cdot dt = \sigma \cdot dW^{RN}$ que es una martingala por no haber inversión inicial alguna, y por tanto $F(t, T) = E^{RN}[F(T, T)] = E^{RN}[S(T)] = S(t) \cdot e^{r(T-t)}$ al igual que con razonamientos de ausencia de oportunidades de arbitraje.

Simulación de Monte Carlo

Como consecuencia del Teorema Central del Límite, si N es suficientemente grande se puede aproximar $E(g(S)) \approx \frac{g(S_1) + g(S_2) + \dots + g(S_N)}{N}$ donde las S_j son ocurrencias independientes generadas con un motor de números aleatorios.

De acuerdo a la fórmula de Feynman-Kac $V(t) = E^{RN}[e^{-r(T-t)} \cdot f(T)]$ y sería $g(S) = e^{-r(T-t)} \cdot f(T)$ con $f(T)$ la liquidación al vencimiento T del derivado considerando que su subyacente sigue un proceso riesgo-neutral.

FUENTE: Elaboración propia

tasa de rendimiento de posesión neta de costes de almacenamiento, de cuyo signo –positivo o negativo– y magnitud dependerá en gran medida la dinámica que liga los precios a plazo y al contado de productos energéticos almacenables, a diferencia de los financieros en los que el único factor relevante en dicha dinámica es el tipo de interés libre de riesgo r . Apuntar que el rendimiento de posesión es un concepto de carácter subjetivo y no observable, de manera que en las anteriores expresiones se incorpora un promedio (12) que formalmente es asimilable al dividendo de un valor financiero.

Si se define como «base» a la diferencia $b(t, T) = F(t, T) - S(t)$, en virtud de la condición de convergencia al vencimiento $F(T, T) = S(T)$ habrá de ser $b(t, T) = 0$, lo que ocurre cuando el contrato a plazo tiene exactamente el mismo subyacente al que se tiene acceso en el mercado al contado. De no ser así, hay exposición al «riesgo de base», que formalmente se define como la varianza de la base y que es una situación de cobertura imperfecta que se manifiesta en el cierre de un contrato a plazo suscrito sobre un subyacente no idéntico al que motiva la cobertura en términos de su utilidad de localización espacial, temporal y calidad, cualidades todas que afectan al consumo de productos energéticos pero no al de financieros.

Esta teoría desarrollada por Kaldor en 1939 explica dos patrones extremos observados en los mercados de *commodities* almacenables según la base sea negativa (*backwardation*) o positiva (*contango*), cuyas características se sintetizan en el cuadro 5, en página siguiente, en el que se grafica el precio del futuro en un momento dado t para diferentes vencimientos T («estructura temporal de los precios a plazo») y se ilustra la función de «descubrimiento de precios» (*price discovery*) con que los mercados líquidos a plazo orientan la toma de decisiones operativas de los agentes sobre disposición o constitución de inventarios, en una lógica de reasignación temporal de recursos desde momentos de abundancia hacia momentos de escasez, con la peculiaridad de que el tiempo es unidireccional en su fluir.

Una interpretación alternativa de los precios a plazo

La no almacenabilidad de la electricidad y por tanto la inviabilidad de la estrategia de *cash and carry* requiere de una interpretación alternativa de los precios a plazo, como la de la «teoría de las presiones de cobertura» (*hedging pressures*) desarrollada por Keynes en 1930, que captura también el hecho de que la convergencia de precios falla en muchas ocasiones por los habituales picos que como afectan al precio al contado de la electricidad.

Según este enfoque, un contrato a plazo se puede interpretar como una póliza de crédito que elimina un riesgo de precio, de manera que, *ex-ante*, su va-

lor incorpora la mejor estimación, dada la información \mathbb{F}_t , disponible en el momento t , sobre el precio de subyacente al vencimiento, a la que se añade una prima que representa el precio que está dispuesto a pagar el tomador por el seguro y, por tanto, la prima que requerirá el asegurador como compensación por la asunción del riesgo y cuyo signo dependerá de si en el mercado predominan las posiciones largas –productores– o cortas –consumidores– y del número y tipo de agentes –con posiciones físicas vs especuladores–:

$$F(t, T) = E(S(T) | \mathbb{F}_t) + \text{Prima de riesgo}$$

O en otros términos, dado que una cartera compuesta por una imposición a plazo con el interés libre de riesgo de $e^{-r(T-t)}$, $F(t, T)$ y una posición larga en un contrato a plazo permite poseer al vencimiento el subyacente $S(T)$, si los inversores exigen un retorno $r + \pi$ que incluye una prima de riesgo $\pi = \lambda \cdot \sigma$, siendo λ el precio de riesgo de mercado por unidad de volatilidad, sin oportunidades de arbitraje habrá de ser $e^{-r(T-t)} \cdot F(t, T) = e^{-(r+\pi)(T-t)} \cdot E(S(T))$ y por tanto $F(t, T) = e^{-\pi(T-t)} \cdot E(S(T)) = e^{-\lambda \cdot \sigma(T-t)} \cdot E(S(T))$. Así, habría una equivalencia o indiferencia entre dos situaciones, una con exposición al riesgo en el mercado a contado, y otra libre de riesgo en el mercado a plazo, por la que el que compra a plazo lo hace con un sobrecoste sobre el precio a contado, siendo la diferencia la prima que paga por evitar la volatilidad a contado.

Revisitando conceptos ya tratados, si con probabilidades reales el contrato a futuro es una estimación sesgada del precio a contado a vencimiento, en el mundo riesgo-neutral, y al no remunerarse el riesgo, la estimación habría de ser insesgada. En efecto, por su funcionamiento, una posición larga sobre un contrato a plazo equivale a una apuesta sobre el subyacente con premio seguro $S(T)$ de manera que en un contexto de utilidad esperada de Von Neuman-Morgenstern ha de ser $F(t, T) = EC_t(S(T))$ donde por definición de equivalente cierto es $EC_t(S(T)) = e^{-\pi(T-t)} \cdot E(S(T))$ y por definición de medida riesgo-neutral es $e^{-\pi(T-t)} \cdot E(S(T)) = E^{RN}(S(T))$ por lo que finalmente $F(t, T) = E^{RN}(S(T))$. En un modelo binomial, en el que al vencimiento el subyacente alcanzaría los valores $S_u(T)$ y $S_o(T)$ en los escenarios de precios al alza y a la baja respectivamente, sería $F(t, T) = E^{RN}(S(T)) = q \cdot S_u(T) + (1 - q) \cdot S_o(T)$ lo que permite en la práctica calibrar la probabilidad de alza de precios riesgo-neutral q a partir de valores observados en el mercado a plazo.

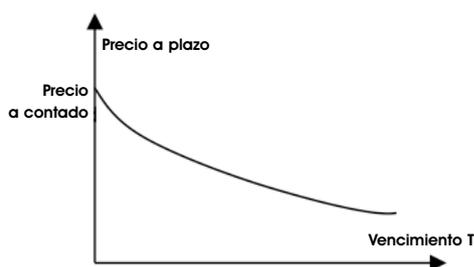
Reversión a la media, picos y dinámica de precios a plazo

De cara a la valoración de riesgos de mercado, y frente a los valores bursátiles, dos son las peculiaridades de los precios de los productos energéticos relevantes en su modelización:

✓ **Reversión a la media.** Por un lado, y en lugar de presentar una tendencia creciente –término de deriva μ

CUADRO 5
CONTRATOS A PLAZO ENERGÉTICOS. BACKWARDATION VS CONTANGO

BACKWARDATION



El precio al contado es mayor que el precio a plazo $S > F$, la base es negativa $b = F - S < 0$, $r < (q - c)$, $r < \gamma$

En la base predomina la componente de rendimiento de posesión (vs coste de almacenamiento). El valor del contrato a plazo refleja la utilidad que se deriva de su consumo presente: se pueden obtener beneficios comprando a plazo y vendiendo a contado, capturándose así el rendimiento de posesión.

Descubrimiento de precios: el rendimiento de posesión refleja las expectativas del mercado, que en una situación de bajos inventarios y uso al límite de las capacidades productivas, se teme una posible ruptura de suministro y por ello, el precio al contado incluye una prima por disponibilidad inmediata del producto.

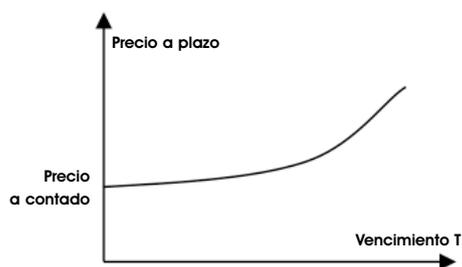
Situación histórica de normalidad en un mercado de petróleo estable

Volatilidad: los precios a contado son más volátiles que los precios a plazo puesto que hay más flexibilidad de ajuste de cantidades en un mayor horizonte temporal, lo que a su vez reduce la respuesta de los precios a los aumentos de demanda.

Correlación: menor correlación entre precios a contado y a plazo debido al tampón que supone la disposición de inventarios.

Decisión operativa: esta situación incentiva la disposición de inventarios (el mercado al contado está "caro") para poner en valor el rendimiento de posesión, lo que vendría a ser similar a cosechar el dividendo en una acción

CONTANGO



El precio al contado es menor que el precio a futuro $S < F$, la base es positiva $b = F - S > 0$, $r > (q - c)$, $r > \gamma$

En la base predomina la componente de coste de almacenamiento (vs rendimiento de posesión). El valor del contrato a plazo refleja la utilidad inter-temporal que se deriva de su almacenamiento para su consumo futuro: el ahorro que supone comprar al contado frente a comprar a plazo, compensa los costes de almacenamiento, por lo que se pueden obtener beneficios comprando al contado, almacenando y vendiendo a plazo.

Descubrimiento de precios: en situaciones de exceso de oferta (o baja demanda), ante la perspectiva de un aumento futuro de la demanda, los precios a plazo recogen esa prima por disponibilidad futura cuando la demanda sea alta.

Situación típica en los mercados a plazo de commodities orientados a la inversión más que al consumo (por ejemplo, el oro), en los que $q = 0$ (full carry) y por tanto $F(t, T) = S(t) \cdot e^{(r+c) \cdot (T-t)}$

Volatilidad: en el caso extremo de full carry el almacenamiento es lo que hace de vínculo entre los precios a contado y a plazo que tendrán la misma volatilidad y una correlación perfecta

Decisión operativa: esta situación incentiva la constitución de inventarios (el mercado al contado está "barato")

Teoría de Kaldor sobre el "coste de acarreo" (cost of carry): para productos energéticos almacenables, y en ausencia de oportunidades de arbitraje:

- en discreto: $F(t, T) = S(t) \cdot (1 + r)^{T-t} + \text{Costes de almacenamiento} - \text{Rendimiento de posesión}$

$$\frac{F(t, T)}{(1+r)^{T-t}} = S(t) + VA \text{ (Costes de almacenamiento - Rendimiento de posesión)}$$

- en continuo: $F(t, T) = S(t) \cdot e^{(\text{Coste de acarreo} - \text{Tasa de rendimiento de posesión}) \cdot (T-t)}$

$$F(t, T) = S(t) \cdot e^{((r+c)-q) \cdot (T-t)} = S(t) \cdot e^{(r-(q-c)) \cdot (T-t)} = S(t) \cdot e^{(r-\gamma) \cdot (T-t)} = \frac{S(t) \cdot e^{r \cdot (T-t)}}{e^{\gamma \cdot (T-t)}}$$

con $\gamma = q - c$ y por tanto $\frac{\partial F}{\partial S} = \frac{\partial S}{\partial S} - (r - \gamma)$ si r e γ son constantes, siendo $q > 0$ el rendimiento de posesión y $c > 0$ los costes de almacenamiento e $\gamma = q - c$ el rendimiento de posesión neto de estos.

Se define «base» como $b(t, T) = F(t, T) - S(t)$ y hay «riesgo de base» cuando el subyacente del contrato no es exactamente el mismo que el que motiva la cobertura y por tanto se tiene que $F(t, T) - S(t) = b < > 0$ violándose la condición de convergencia al vencimiento. La cobertura de una posición larga de Q unidades físicas con la incorporación de h posiciones cortas en futuros de cantidad nominal Q_F es de mínima varianza, esto es $\frac{\partial(\text{var}(Q \cdot S - h \cdot Q_F \cdot F))}{\partial h} = 0$, cuando, siendo ρ la correlación entre los precios a contado y a plazo, $h^* = \frac{\rho \cdot \sigma_S}{\sigma_F \cdot F}$ (ratio de cobertura óptimo) y se suscribe el número óptimo de contratos $h^* \cdot \frac{Q \cdot S}{Q_F \cdot F}$. En el caso de los mercados financieros en teoría la ratio cobertura óptima es 1 por seguir el contado y el plazo una senda perfectamente paralela.

Teoría de Keynes sobre las "presiones de cobertura" (hedging pressures): en una interpretación ex-ante, necesaria para el caso de la electricidad, $F(t, T) = E(S(T) | \mathbb{F}_t) + \text{Prima de riesgo}$ (estimación sesgada de $E(S(T))$) de acuerdo con la información \mathbb{F}_t disponible en t).

Típicamente la prima de riesgo es positiva (normal backwardation), pero puede ser negativa.

$F(t, T) = E^{RN}(S(T) | \mathbb{F}_t)$ (estimación insesgada de $E^{RN}(S(T))$) de acuerdo con la información \mathbb{F}_t disponible en t).

FUENTE: Elaboración propia.

en un movimiento browniano–, suelen oscilar alrededor de un precio de equilibrio que en un mercado competitivo vendrá dado por el coste marginal de producción, en un fenómeno conocido como «reversión a la media» (*mean reversion*) por el cual las desviaciones aleatorias de los precios con respecto al nivel de equilibrio no tienen carácter permanente sino transitorio al amortiguarse en un tiempo más o menos largo. Una explicación intuitiva de la reversión a la media es la del buen estudiante al que le ha salido mal un examen: si lo repite, probablemente rendirá de acuerdo con su verdadero talento, que es en lo que en última instancia se fundamenta su rendimiento académico y no en el tropiezo de un mal día.

✓ **Picos.** Por otro lado, y con mayor frecuencia que la predicha por la hipótesis de normalidad, ocurren eventos inesperados que provocan saltos de precios de gran magnitud, lo que se conoce como «fenómenos de larga cola» (*long tail*), como puede ser una crisis política en un país productor de hidrocarburos con un régimen autoritario o un fenómeno meteorológico extremo. Si bien puede modificarse una formulación browniana –en la que los *shocks* aleatorios son permanentes– para incluir estos fenómenos, el hecho de que la realidad muestre picos simultáneamente modelar la reversión a la media.

En el caso de la electricidad –y también el gas–, estos picos de precios son más frecuentes y pueden deberse a restricciones técnicas no programadas en generación –que sitúen el uso al límite de la capacidad instalada– o en transporte –que pongan en peligro la seguridad del sistema–. También es característica de la electricidad su estacionalidad en ciclos diarios (13), semanales y anuales causada por la meteorología y efectos calendario –fines de semana, festivos y vacaciones– que alteran sustancialmente la demanda que, prescindiendo de estos efectos y, al igual que la oferta (14), es fundamentalmente rígida.

El modelado de precios a plazo es especialmente relevante porque en muchas ocasiones los productos energéticos se negocian únicamente en estos mercados, que serán entonces los que proporcionen datos suficientes para la calibración consistente de un modelo. También a menudo, los subyacentes de derivados energéticos son productos a plazo y no a contado (15).

Un aspecto a tener en cuenta es la necesaria coherencia que han de guardar los modelos de precios a plazo y a contado de un mismo subyacente, dadas las relaciones entre los mismos discutidas en los epígrafes previos. Así por ejemplo, aunque un movimiento geométrico browniano o un modelo con reversión a la media de un solo factor o variable de estado pudieran caracterizar adecuadamente un proceso a contado, en presencia del «efecto Samuelson», por el que en situaciones de *backwardation* los contratos con vencimientos más alejados tienden a ser menos volátiles, ambos modelos perderían validez,

por ser incapaces –totalmente el primero, parcialmente el segundo– de capturar dicho comportamiento de los precios a plazo. Ello motiva el uso de modelos de dos factores –el precio al contado, por un lado, y el precio de equilibrio en el largo plazo, por otro– como el de Pipilovic que trata lo que llama “doble personalidad” de los productos energéticos, al mostrar una dinámica muy diferente según el vencimiento de los contratos sea a corto o largo plazo –en el que los dos factores coinciden–, con el rendimiento de posesión actuando de puente natural entre ambos horizontes.

La intuición que hay detrás de esta idea es que en el medio y largo plazo se pueden modificar sustancialmente las condiciones de equilibrio del mercado existentes en el corto plazo, sobre las cuales la limitación en la capacidad de almacenamiento disponible –y en su duración, como en el caso de los productos petrolíferos que con el tiempo se deterioran en calidad desviándose de las especificaciones técnicas requeridas por la normativa– juega un papel fundamental. Así, en el medio plazo podría desarrollarse capacidad de almacenamiento adicional, y en el largo plazo, ponerse en producción reservas de combustibles fósiles no explotadas –almacenamiento *in the ground*– gracias a nuevas tecnologías –piénsese por ejemplo en el *boom del fracking*– o la mejora de las existentes.

Desde el punto de vista del descubrimiento de precios, los contratos a plazo con vencimientos alejados son por tanto poco informativos al incorporar muchas incertidumbres, lo que justifica su escasez. No obstante, se pueden conseguir coberturas razonables en horizontes temporales largos mediante series (*strips*) de contratos a plazo o futuros o, alternativamente, con una estrategia *stack and roll* consistente en ir cerrando posiciones mensualmente para a continuación reabrir las por lo pendiente de servir (*rollover*), lo que hace explícita la base y que, en una situación sobrevenida e inesperada de contango, puede suponer demandas inasumibles de flujos de caja, como ocurrió en el célebre caso Metallgesellschaft (Edwards, 1995).

Todas las singularidades citadas hacen que el movimiento geométrico browniano, y con él los modelos de valoración de derivados basados en fórmulas cerradas como la de BS y sus variantes –Merton para subyacentes que reparten dividendo o Black para opciones sobre futuros– que en él se fundamentan, presente debilidades en este contexto. La solución pasa por utilizar modelos de precios basados en el geométrico/exponencial de Ornstein-Uhlenbeck (modelo de Vasicek/Schwartz) y la utilización intensiva de métodos numéricos como el del árbol binomial o el de Monte Carlo basado en el descuento con el tipo libre de riesgo de flujos de caja obtenidos a partir de la simulación de procesos riesgo-neutrales (ver recuadro 4). En la práctica, y según Hull, una buena aproximación la da un descuento con el tipo libre de riesgo de los flujos de caja de liquida-

RECUADRO 4. MODELADO DE PRECIOS ENERGÉTICOS

Modelos de un factor/variable de estado

- Movimiento Geométrico Browniano con rendimiento de posesión/dividendos (tasa continua $y > 0$)

$$\frac{dS}{S} = \alpha(\ln S) = (\mu - y) \cdot dt + \sigma \cdot dW \text{ y } dS = \left(\mu - y - \frac{\sigma^2}{2} \right) \cdot dt + \sigma \cdot dW \text{ e integrando } S(t + \delta t) = S(t) \cdot e^{\left(\mu - y - \frac{\sigma^2}{2} \right) \delta t + \sigma \cdot \delta W}$$

$$C(T) = N(d_1) \cdot e^{-y(T-t)} \cdot S - e^{-r(T-t)} \cdot N(d_2) \cdot X \text{ y } d_1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{X}\right) + (r - y) \cdot (T - t)}{\sigma \cdot \sqrt{T - t}} + \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot \sqrt{T - t} \text{ (Fórmula de Merton)}$$

$$\text{Paridad Put-Call } P + e^{-y(T-t)} \cdot S = C + e^{-r(T-t)} \cdot X$$

$$\frac{dF}{F} = (\mu - r) \cdot dt + \sigma \cdot dW \text{ (mismo proceso que en el caso sin rendimiento de posesión / dividendos)}$$

En el mundo riesgo-neutral la deriva se obtiene minorando la deriva real $\mu - y$ por la prima de riesgo π , esto es, la deriva riesgo-neutral es $(\mu - y) - \pi = (r + \pi - y) - \pi = r - y$ o lo que es lo mismo, se obtiene sustituyendo μ por r

$$\frac{dS}{S} = \alpha(\ln S) = (r - y) \cdot dt + \sigma \cdot dW^{RN} \text{ e integrando, } S(t + \delta t) = S(t) \cdot e^{\left(r - y - \frac{\sigma^2}{2} \right) \delta t + \sigma \cdot \delta W^{RN}}$$

$\frac{dF}{F} = \frac{dS}{S} - (r - y) \cdot dt = \sigma \cdot dW^{RN}$ es una martingala como en el caso sin rendimiento de posesión, porque de este se beneficia el tenedor del producto y no el del contrato, y por tanto $F(t, T) = E^{RN}[F(T, T)] = E^{RN}[S(T)] = S(t) \cdot e^{(r - y) \cdot (T - t)}$ al igual que con razonamientos de ausencia de oportunidades de arbitraje.

Un inconveniente de este modelo es que al ser $\sigma_F = \sigma_S = \sigma$ no captura bien las situaciones de *backwardation*.

- Modelo con reversión a la media (Ornstein-Uhlenbeck) aritmético o de precios:

$$dS = \eta \cdot (\bar{S} - S) \cdot dt + \sigma \cdot dW = -\eta \cdot (S - \bar{S}) \cdot dt + \sigma \cdot dW$$

$$S(t + \delta t) = e^{-\eta \delta t} \cdot S(t) + (1 - e^{-\eta \delta t}) \cdot \bar{S} + \sqrt{\frac{1 - e^{-2\eta \delta t}}{2 \cdot \eta}} \cdot \sigma \cdot \delta W$$

En una analogía mecánica $-\eta \cdot (\bar{S} - S) = \eta \cdot (S - \bar{S})$ sería la fuerza recuperadora que según la Ley de Hooke devuelve a un muelle de constante elástica η a su posición de equilibrio \bar{S} cuando se le desvía de la misma con un desplazamiento de valor S . En otra analogía procedente de la Física, la tasa de reversión π puede interpretarse como una tasa de decaimiento de vida media: $\frac{\ln 2}{\pi}$ sería el tiempo que tardaría la variable S en recorrer la mitad del camino de vuelta hacia su valor de equilibrio \bar{S} .

Un inconveniente de este modelo es que admite precios negativos.

- Modelo con reversión a la media (Ornstein-Uhlenbeck) geométrico/exponencial o de retornos (Vasicek/Schwartz):

$$\frac{dS}{S} = \alpha(\ln S) = \eta \cdot (\ln \bar{S} - \ln S) \cdot dt + \sigma \cdot dW = -\eta \cdot (\ln S - \ln \bar{S}) \cdot dt + \sigma \cdot dW$$

$$\ln S(t + \delta t) = e^{-\eta \delta t} \cdot \ln S(t) + (1 - e^{-\eta \delta t}) \cdot \left(\ln \bar{S} - \frac{\sigma^2}{2 \cdot \eta} \right) + \sqrt{\frac{1 - e^{-2\eta \delta t}}{2 \cdot \eta}} \cdot \sigma \cdot \delta W$$

Calibrado del modelo: reformulado como $\frac{d(\ln S)}{dt} = -\eta \cdot (\ln S - \ln \bar{S}) + u$ en un ajuste mínimo cuadrático del tipo $y = a \cdot x + b + u$ con $y = \frac{d(\ln S)}{dt}$ y $x = \ln S$ sería $\hat{\eta} = -\hat{a}$ y $\widehat{\ln \bar{S}} = \frac{\hat{b}}{\hat{a}}$ y la desviación típica anual $\hat{\sigma}$ el error estándar de los residuos u debidamente escalado en el tiempo con un factor (de $\sqrt{365}$ en el caso del mercado eléctrico con negociación en todos los días, incluidos los fines de semana; de $\sqrt{252}$ en el caso del gas natural).

Suponiendo que el proceso estuviera ya expresado en términos riesgo-neutrales ($dW = dW^{RN}$) se tendría que:

$$F(t, T) = E^{RN}[S(T)] = \exp \left\{ e^{-\eta(T-t)} \cdot \ln S(t) + (1 - e^{-\eta(T-t)}) \cdot \ln \bar{S} + \frac{\sigma^2}{4 \cdot \eta} \cdot (1 - e^{-2\eta(T-t)}) \right\}$$

y su dinámica riesgo-neutral $dF/F = e^{-\eta(T-t)} \cdot \sigma \cdot dW^{RN}$ es una martingala de volatilidad $\sigma_F = e^{-\eta(T-t)} \cdot \sigma_S < \sigma_S$ que captura el «efecto Samuelson» siempre y cuando el vencimiento no esté alejado en exceso, para lo que son más adecuados modelos con más factores. Así, una dinámica a plazo multifactorial con N factores, a calibrar con datos históricos mediante análisis factorial de componentes principales, sería del tipo: $dF/F = \sum_{i=1}^N \sigma_i \cdot dW_i^{RN}$

- Modelo HWW Hull-White (Modelo de Vasicek extendido):

$$\frac{dS}{S} = \alpha(\ln S) = \eta(t) \cdot (\ln \bar{S}(t) - \ln S) \cdot dt + \sigma(t) \cdot dW = -\eta(t) \cdot (\ln S - \ln \bar{S}(t)) \cdot dt + \sigma(t) \cdot dW$$

Modelo de dos factores/variables de estado de Pipilovic

$dS = \eta \cdot (L - S) \cdot dt + S \cdot \sigma_1 \cdot dW_1$ (precio a contado) y $\frac{dL}{L} = \mu \cdot dt + \sigma_2 \cdot dW_2$ (precio de equilibrio a largo plazo)

$y(t) = \delta(t) + \gamma(t) \cdot \frac{(S_t - L_t)}{S_t}$ (rendimiento de posesión, que en el largo plazo es $y(t) = \delta(t)$ por ser $S_t = L_t$)

Modelos con saltos

- Movimiento Geométrico Browniano con saltos: $dS/S = d(\ln S) = \mu \cdot dt + \sigma \cdot dW + U_i \cdot dN_i$ siendo U_i una variable aleatoria que representa la magnitud de salto y dN_i un proceso de Poisson
- Modelo de Eidelan y Geman con picos: $dS = \mu(S) \cdot dt + S \cdot \sigma \cdot dW + S \cdot U_i \cdot dN_i$ capturándose a través de $\mu(S)$ el fenómeno de reversión a la media.
- Modelos de cambio de régimen (*regime switching*): dinámicas de precios diferentes en un estado "normal" que en uno de picos.

FUENTE: Elaboración propia

ción esperados reales (vs riesgo-neutrales), en lo que supondría admitir nulo el riesgo sistemático o prima π que sobre el tipo libre de riesgo demanden los inversores a este tipo de subyacentes.

Con respecto a los principios generales de cobertura, siendo en principio válido el enfoque BS de la cartera dinámica replicante, se ha de tener en cuenta que las posiciones cortas en el subyacente son cuanto menos complicadas con hidrocarburos –se incurriría en el coste de acarreo– y en todo caso inviables con electricidad dada su no almacenabilidad, salvo en el caso de que se tenga control sobre el activo físico de generación, ya sea bajo propiedad plena o virtual, lo que como mucho permite coberturas estáticas y por tanto imperfectas.

En el caso de los *spreads*, su valoración reviste cierta complejidad al verse afectada por dos fuentes de incertidumbre: la del output S y la del input G , que además pueden estar correladas de manera sofisticada dependiendo del tiempo hasta el vencimiento, el decalaje entre contratos y la tasa H de conversión energética en ejercicio, de la que depende la liquidación a vencimiento $\max(S(T) - H \cdot G(T))$. En el caso de un ciclo combinado, S es electricidad –output–, G es gas –input– y H la tasa de eficiencia en la conversión (*strike hate rate*), de manera que la cobertura de un *spark spread* será perfecta cuando el valor contractual de esta última coincida con el real de la instalación.

Riesgos volumétricos

Además del riesgo de precios, en los mercados energéticos existen «riesgos volumétricos o de cantidad», cuyo caso más extremo es el de la electricidad, para la cual la cantidad demandada es caprichosa. Un ejemplo ilustrativo es el caso del comercializador de electricidad que se comprometa al suministro a sus clientes a un precio unitario fijo e independiente de la cantidad que consuman, por lo que su cobertura resultará insuficiente (excesiva) en momentos de consumo elevado (reducido), cuando precisamente los precios son más altos (bajos) –dada la correlación positiva (16) entre demanda de electricidad y precios– lo que exacerbará las consecuencias negativas de una cobertura imperfecta. La abundancia de circunstancias similares explica la proliferación de instrumentos más o menos complejos cuya finalidad última es la cobertura de este riesgo proporcionando flexibilidad en cantidades, algunos ejemplos de los cuales serían:

Swing: opción volumétrica para gestión de la demanda que da el derecho a adquirir una cantidad variable por encima de una carga base nominada, en lo que sería una flexibilidad de ajuste de cantidad al alza. Así, una planta de generación virtual (*Virtual Power Plant-VPP*) a través de un *tolling agreement* permite el acceso a cantidades adicionales de suministro sin estar en posesión del activo de genera-

ción a cambio de una prima que otorga el derecho a controlar su programa de producción. Por su parte, una cláusula *take-or-pay*, típica en los contratos de suministro a largo plazo de gas natural, proporciona una flexibilidad de ajuste de cantidad a la baja al permitir al comprador no retirar físicamente la cantidad acordada a cambio del pago de una penalización.

«**Nominación flexible**»: en un sistema gasista, reserva de capacidad en una instalación de recepción, almacenamiento o transporte por una parte fija o firme o nominal o nocional o base (*base load*) que incluye la flexibilidad de ajuste al alza o a la baja –liberación de capacidad– por una parte variable en determinados momentos y/o un número de veces en un periodo para el que se establecen unos límites inferior y superior acumulados.

Callable forward: flexibilidad de un productor de energía para, a cambio del pago de una prima, cancelar su compromiso de suministro (*recall*) cuando el precio a contado supera cierto precio de ejercicio que previamente haya fijado el consumidor, en una estrategia que equivale a una posición corta en un contrato a plazo y una posición larga en una opción de compra y a la contraria –posición larga a plazo y corta en una opción de compra– para el consumidor que como contraprestación a la flexibilidad que ofrece recibe un descuento.

Putable forward: flexibilidad de un consumidor de energía para, a cambio del pago de una prima, cancelar su compromiso de adquisición a plazo cuando el precio a contado caiga por debajo cierto precio de ejercicio que previamente haya fijado el suministrador, en una estrategia que equivale a una posición larga en un contrato a plazo y una posición larga en una opción de venta y a la contraria –posición corta a plazo y corta en una opción de venta– para el suministrador que como contraprestación a la flexibilidad que ofrece ingresa una prima.

La interpretación como cartera de derivados de estos instrumentos complejos –o transacciones estructuradas– puede hacerse extensiva a activos reales, como se verá en el apartado siguiente.

GESTIÓN ESTRATÉGICA DEL RIESGO Y CREACIÓN DE VALOR

El mundo financiero se desenvuelve en un juego de suma cero en el que los derivados son un instrumento más para la obtención de beneficios por especulación o explotación de imperfecciones de mercado en forma de oportunidades de arbitraje sin que haya creación de valor alguno.

Por el contrario, en el mundo corporativo en general, y en el energético en particular, la gestión del riesgo es una función que contribuye a crear valor desde un doble punto de vista:

Uno **indirecto**, ligado a su dimensión más operativa o transaccional, que trata de evitar –o por lo menos disminuir sus probabilidades- tensiones de tesorería y financiación que dificulten focalizarse en el desarrollo de las capacidades que realmente generan valor. Así por ejemplo, el valor indirecto de una cobertura corta con contratos a plazo radica en que permite el aislamiento de las fluctuaciones de precios asegurando unos flujos de caja estables, pudiendo así el productor centrarse en la esencia de su negocio al tener garantizada sin sobrecostes la financiación que su elevado activo inmovilizado requiere.

Otro **directo**, de dimensión más estratégica, en tanto en cuanto un adecuado conocimiento de los riesgos a los que se está expuesto ayuda a una mejor toma de decisiones sobre los diferentes activos en los que se sustentan o materializan las capacidades competitivas.

Ello da una utilidad adicional a las herramientas descritas en este artículo, las cuales sustentan metodologías alternativas a las tradicionalmente utilizadas en la valoración individual de activos reales y la medición de la exposición al riesgo de carteras de activos.

Opciones reales

Como ya se ha dejado entrever, es posible emular financieramente muchos aspectos del negocio energético como opciones más o menos complejas. Así, una refinería no es más que una opción para transformar crudo en productos refinados (*crack spread*); una central de ciclo combinado o de carbón, o un *tolling agreement* sobre la misma, una opción para transformar un combustible (gas natural/ carbón) en electricidad (*spark/dark spread*); una línea de transporte de alta tensión, un oleoducto o un gasoducto, una opción para transformar la utilidad espacial de la energía (*geographical spread*); un almacenamiento de hidrocarburos, una opción para transformar su utilidad temporal (*calendar spread*). La rentabilidad en todos estos casos dependerá de que el diferencial de precios o *spread* supere al coste de conversión, resultando la opcionalidad del hecho de que cuando la transformación no sea rentable, no se llevará a cabo.

Esta perspectiva desde la cual las inversiones se interpretan como decisiones que se ejercitan al modo de opciones financieras si los fundamentos económicos del proyecto así lo aconsejan, es la base de la teoría de «opciones reales». Su origen se encuentra en un trabajo seminal de Brennan y Schwartz de 1985, en el que con la misma filosofía del modelo BS, se valora una explotación de recursos naturales mediante una cartera replicante riesgo-neutral compuesta por una posición larga en el proyecto y una corta en futuros sobre el producto, en una metodología de claro valor añadido con respecto al «Valor Actualizado Neto» (VAN) al proporcionar estrategias óptimas de desarrollo, operación (abrir o cerrar en función del precio de venta del producto) y abandono.

Si el uso del VAN como estándar de decisión sobre proyectos de inversión en activos reales debe su éxito a lo intuitivo de sus fundamentos y a lo sencillo de su uso, con esta visión alternativa se supera su gran inconveniente, que no es otro que su carácter estático –sus decisiones son binarias y se toman en un momento inicial sin que se contemple acción directiva alguna posterior– que lo inhabilita para capturar fuentes de valor como las resultantes del aprendizaje de una fase piloto que pudiera conducir a su abandono o expansión en fases posteriores o las flexibilidades en la gestión de tiempos del proyecto –retrasar/esperar (*wait and see*) o adelantar–, su dimensión –extensión de la vida útil–, u otras ligadas a la operación como la posibilidad de un cierre temporal o de sustitución de *inputs* u *outputs* –cartera de productos–, por citar algunas.

La industria del petróleo es ilustrativa de la ubicuidad de la opcionalidad y por lo tanto de lo oportuno de este enfoque. Una fase preliminar de la actividad *upstream* bajo un permiso de investigación y exploración en el que se realizan campañas sísmicas y eventualmente sondeos es una opción de abandono en el caso de no encontrarse indicios, o de expansión en el caso de que se adquiera la concesión de explotación, lo que requerirá inversiones adicionales que podrán hacerse escalonadamente y con la flexibilidad operativa de modular la producción en función del precio de venta del producto final. Como ya se ha visto, la fase de refino puede interpretarse como una opción de transformación cuyo ejercicio vendrá dado por el *spread* de precios crudo-productos refinados, en la que hay cierta flexibilidad por el lado de las materias primas –*feedstocks*– y por el lado del *mix* de productos en función de sus precios, y similar interpretación puede darse a las fases logísticas de almacenamiento y transporte.

Dado que hay una asimetría provocada por el hecho de que las opciones son derechos que no obligaciones que permiten aprovechar las situaciones favorables y evitar las desfavorables mediante su ejercicio o no, respectivamente, el valor de las flexibilidades enumeradas es siempre positivo y podría llegar a contrarrestar el VAN negativo de un proyecto que se rechazaría a no ser que el criterio de aceptación se reconsidera como $VAN + Valor\ operaciones\ incluidas > 0$, en lo que constituye la esencia de la «valoración por componentes». Se ha de tener en cuenta que las dos componentes dependen de dos factores últimos –la incertidumbre y el tiempo– que las afectan de manera contraria –negativamente en el VAN y positivamente en el valor de las opciones– por lo que se ha de ver su efecto conjunto tal y como postula este método.

Exposición al riesgo y estrategia

La medición tradicional de la exposición al riesgo tiene una finalidad eminentemente operativa orienta-

da tanto al control interno como al externo o regulatorio. Para ello, y con carteras puramente financieras, un complemento a las griegas compacto y fácil de entender, al aglutinar en un único indicador la exposición al riesgo, es el «valor en riesgo» (*Value At Risk-VaR*) que dado un nivel de confianza α estima la pérdida máxima en su valor de mercado (*marking to market*) para un horizonte temporal T : esto es, sólo en el $1-\alpha\%$ de los casos la cartera arrojaría en T una pérdida superior al VaR . En la práctica, los valores típicos que se toman son $\alpha=0,99$ y $T=1$ día, y el cálculo en su forma más sencilla se hace mediante un modelo de varianzas y covarianzas o, alternativamente, simulación histórica –en la que con la técnica del *bootstrapping* se construye un ranking de pérdidas diarias a partir de cotizaciones observadas, lo que supone asumir que el patrón histórico se va a mantener (17)– o simulación de Monte Carlo –a partir de modelados geométrico *brownianos* de los factores de riesgo–. Una comprobación *ex-post* (*back-testing*) que compare la frecuencia de pérdidas diarias superiores a las predichas por el VaR permite evaluar la bondad de cada uno de estos métodos.

El VaR asume que la cartera en promedio no cambia de valor en el horizonte de análisis –lo que es razonable si este es pequeño– y que es líquida por estar compuesta por productos estandarizados negociados en mercados financieros organizados, por lo que eventualmente las posiciones más desfavorables podrían deshacerse con facilidad al ser mínimo el riesgo de liquidez. Asume también normalidad en el comportamiento del mercado, no teniendo en cuenta los escenarios más desfavorables –eventos extraordinarios, plausibles pero poco probables– para los cuales son necesarias otras técnicas complementarias como las «pruebas de esfuerzo» (*stress test*).

Si por sus hipótesis y diseño el VaR resulta adecuado para instituciones financieras, en el mundo energético resulta insuficiente porque las carteras de activos en el sector son más diversas y complejas al incluir, no sólo un *trading book* de instrumentos de cobertura estandarizados de gestión transaccional u operativa en el ámbito de la tesorería, sino también activos físicos, financieros complejos vinculados a estos –los ya vistos *rolling agreements*, contratos con cláusulas *take-or-pay*, acuerdos de nominación flexibles, ...,–, y regulatorios –derechos de emisión de CO_2 , por ejemplo–, todos ellos de liquidez escasa, con una mayor voluntad de permanencia, y sometidos a más riesgos que al de mercado o precios, tales como los volumétricos o los climatológicos, que son típicamente no normales.

Ello exige una alternativa analítica que incorpore todos los activos citados, diversas fuentes de incertidumbre no necesariamente normales y que, extendiendo el horizonte de análisis a uno más adecuado al ciclo de negocio energético, dé información sobre lo que preocupa a los directivos que, más allá que exclusivamente el valor de mercado de sus posiciones financieras, no es otra cosa que indicadores de *performance* corporativo expresados en tér-

minos de márgenes, ganancias o, sobre todo, flujos de caja.

A partir de los flujos de caja de cada activo, sería posible construir una distribución acumulada para la cartera total de activos y sintetizar su perfil rentabilidad-riesgo en una única métrica: el «flujo de caja en riesgo» (*Cash Flow at Risk-CFaR*), que es el flujo de caja que durante un horizonte temporal T generaría la cartera de activos en el $\alpha\%$ de los casos, de manera que sólo en el $1-\alpha\%$ de los casos la cartera arrojaría en T un flujo de caja inferior al $CFaR$. Siendo el $CFaR$ similar al VaR , resulta más apropiado que este al diferenciarse en los aspectos que se puntualizan en el cuadro 6, en página siguiente.

Para cada activo físico el valor esperado de estos flujos de caja puede calcularse mediante una simulación de Monte Carlo modelando las diferentes fuentes de incertidumbre calibradas con datos históricos e incorporando las reglas de optimización que rigen su operación real, que es compleja por obedecer a flexibilidades/opcionalidades y restricciones técnicas –operar un ciclo combinado en función del precio de mercado respetando los mínimos de operación; o inyectar o extraer gas de un almacenamiento con los límites de caudal que su configuración física (18) establecen–, en un proceso en el que se monitoricen las diferentes variables durante todo el horizonte de análisis –puesto que las decisiones de operación se toman de forma razonablemente continua– y no únicamente en un momento final, como ocurre en el VaR al descansar únicamente en la distribución terminal del valor de mercado de la cartera.

La principal ventaja de esta metodología es pues que, al centrarse en flujos de caja, puede aplicarse a diferentes carteras de activos que difieran en sus estrategias de cobertura –tipología y número de instrumentos– entendidas en sentido amplio, mostrando la eficacia de cada una de ellas y ayudando por tanto a la toma de decisión basada en el conocimiento de los balances (*trade-offs*) riesgo-rentabilidad (es decir, coste-beneficio), en la que ha de considerarse el apetito corporativo por el riesgo que aglutine el de los diferentes *stakeholders*, en lo que constituye una aproximación del tipo de Markowitz en el que el riesgo no se mitiga porque sí, sino que se optimiza conforme a unas preferencias.

Así por ejemplo, y con ayuda de este planteamiento, un comercializador de energía minorista podría diseñar su estrategia de aprovisionamiento óptima, entendida como la combinación de compras en el mercado a contado y a diferentes plazos que dada su tolerancia por el riesgo minimice el coste. O un mayorista gasista (*midstreamer*) en una renegociación de contratos con sus proveedores en un contexto de baja demanda podría escoger entre reclamar un menor precio, una mayor flexibilidad de las cláusulas *take-or-pay* o una combinación de ambos.

Estos análisis de alto nivel pueden enriquecerse incorporando, además de las «variables de estrategia»

CUADRO 6
VALOR EN RIESGO VS FLUJO DE CAJA EN RIESGO

	VaR	CFaR
Usuarios	Gestores operativos (<i>middle management</i>)	Alta dirección (<i>top management</i>)
Finalidad	Operativa: <i>reporting</i> interno y externo	Estratégica: toma de decisiones informada a partir de un conocimiento de los balances (<i>trade-offs</i>) riesgo-rentabilidad
Orientación	Cuantitativa: sintetizar en una única métrica la exposición al riesgo, sobre la cual se puede actuar con transacciones de mercado	Cualitativa: reflexionar sobre los riesgos que afectan al negocio y cuáles se está dispuesto a asumir. Análisis de escenarios (<i>what-if</i>)
Activos incluidos en el análisis	Financieros estándar	Físicos, financieros complejos respaldados por activos físicos, financieros estándar y regulatorios
Variable relevante	Valor de mercado de la cartera (<i>marking to market</i>)	Flujos de caja (u otras de interés para la dirección: resultado contable, EBITDA,...) incorporando aspectos de operación óptima sujeta a las restricciones técnicas que afectan a los activos físicos y la flexibilidad por las opcionalidades que incorporan estos o los contratos financieros vinculados
Horizonte temporal	Corto plazo: 1 a 10 días	Medio plazo: meses, años
Intervalo de confianza	99%. Estricto, imposición regulatoria	95%. Menos estricto, para capturar fenómenos de "larga cola"
Metodología de cálculo	<ul style="list-style-type: none"> Modelo analítico de varianzas-covarianzas parametrizadas <i>Bootstrapping</i> de datos históricos 	Simulación de Monte Carlo
Herramientas	Paquetes de <i>software</i> estándar	Aplicaciones sencillas en Excel® con Matlab®

FUENTE: Elaboración propia

—aquellas sobre las que se tiene poder de decisión-, «variables de escenario» que se refieran a factores de riesgo exógenos de carácter "macro" o regulatorios, en lo que constituye un «análisis de escenarios» (*what-if*). Así, en el caso del mayorista gasista, dos posibles escenarios en un contexto de liberalización inacabada como el que se describe al comienzo de este artículo sería un mantenimiento del *status quo* de precios indexados al petróleo o, alternativamente, un progreso en la "spotización" del mercado por su organización en torno a *hubs* de intercambio físico o virtual en los que interactúen oferta y demanda.

Si bien esta metodología tiene una base cuantitativa, el valor de la misma reside en las interpretaciones cualitativas que de ella resulten. En este sentido, y en relación con la identificación de «variables de riesgo» —aquellos parámetros aleatorios que producen cambio en variables de estrategia o de escenario—, se ha de tener en cuenta que en la práctica se dan patrones *paretianos* en los que pocos factores de riesgo importan mucho, por lo que resulta clave identificar esos "mega-riesgos" (*mega-risks*) que en un análisis factorial de los mismos resultarían ser las componentes principales (19). Como se viene insistiendo, en las empresas que interactúan en el sector energético uno de los principales mega-riesgos es el de mercado.

Implicaciones organizativas. Filosofía EWRM

La dimensión estratégica de la gestión del riesgo de la que se viene hablando tiene implicaciones en aspectos que afectan a la estructura, las personas, los procesos y los sistemas de información.

Organizativamente, en el ámbito financiero es común un paradigma centralizado para la gestión de riesgos bajo el liderazgo de un Director de Riesgos (*CRO-Chief Risk Officer*) que, reportando a un Comité de Riesgos que incluye a otros miembros del Consejo de Dirección, dirige una estructura de tres escalones con separación de responsabilidades en evitación de problemas de incentivos inadecuados: *front office*, departamento de *trading* que hace de interfaz con los mercados y ejecuta las operaciones; *middle office*, que controla la exposición al riesgo mediante la valoración de las posiciones individuales y sus agregación para toda la cartera utilizando las griegas o el *VaR*; *back office*, que hace funciones de tesorería, contabilidad, *reporting* externo a valores de mercado (*marking to market*) y auditoría interna de procesos y de conformidad con los requisitos regulatorios de carácter cuantitativos y estrictos.

Aunque esta estructura de triple línea defensiva sigue siendo en principio válida, en el contexto corporativo la situación es diferente, puesto que el riesgo, al ser estratégico, afecta a la totalidad de la organización y no puede estar confinado en un departamento concreto, a no ser que se constituya en línea de negocio *per se*. No es suficiente que la voz cantante la lleve en exclusiva, como suele ser habitual, el director financiero (*CFO-Chief Financial Officer*), sino que los responsables en todas las áreas funcionales han de estar debidamente capacitados (20)

El proceso de gestión de riesgo ha de ir más allá de la simple elaboración de los tradicionales cuadros de mando semafóricos para la alta dirección, de carác-

ter cualitativo y referidos, casi exclusivamente a riesgos operativos sobre los que se hace un análisis elemental del tipo “Exposición = Probabilidad x Impacto”.

Por el contrario, habrá de identificar todos los riesgos relevantes e incluir un análisis coste-beneficio ex-ante de las diferentes alternativas de gestión –asunción o mitigación mediante su diversificación o transferencia- y una evaluación ex-post de la eficacia de las mismas, en lo que servirá para valorar la bondad y mejorar los modelos de valoración elegidos, que en sí mismos incorporan un «riesgo del modelo de riesgos»: incidencia negativa en las decisiones relativas a gestión de riesgos por un modelado equivocado o deficientemente utilizado o interpretado por desviarse sus hipótesis de partida de la realidad que trata de simplificar.

En la parte más cuantitativa y operativa del proceso son de utilidad paquetes de software estándar denominados *ETRM-Energy Trading and Risk Management* o *CTRM-Commodity Trading and Risk Management*, si bien en la parte más estratégica es más propicio el uso de soluciones a medida basadas en desarrollos con hojas de cálculo tipo Excel® con los cálculos matemáticos realizados en Matlab®, por la flexibilidad y posibilidad de personalización que ofrecen estos productos.

El reto en suma es el desarrollo de una cultura del riesgo en la que, de una gestión convencional de tipo operativo por un departamento horizontal de soporte, se pase a una gestión del riesgo orientada a la creación de valor, en una filosofía que se conoce como *Enterprise-Wide Risk Management (EWRM)* que tiene por base un lenguaje común y una comprensión de los riesgos del negocio en todas las áreas funcionales.

REFLEXIONES FINALES ▼

Una perspectiva de políticas públicas ▼

Dada la naturaleza de la publicación que edita este artículo, es pertinente incluir una visión desde la perspectiva de las políticas públicas, que hará hincapié en los ejes de competitividad y seguridad de suministro de la política energética con mención particular al caso español (21).

El respaldo público de mercados a plazo organizados tiene su fundamento último en su contribución a la eficiencia económica general, al proporcionar señales para la toma de decisiones operativas óptimas por los agentes –transparencia y descubrimiento de precios-, permitirles la consecución de su nivel de riesgo de precios deseado –mediante el ajuste de la composición de su cartera de activos- y eliminar el riesgo de crédito. En este contexto se han de entender las medidas regulatorias de impulso del OMIP, polo portugués del operador del Mercado Ibérico de la Electricidad (MIBEL) para la negociación de instrumentos derivados, o los pasos que se viene dando para la creación de un Mercado Ibérico del Gas (MIBGAS).

En el caso de la electricidad se ha recurrido a la imposición de obligaciones de participación en el mercado a plazo para incrementar así su liquidez (22), lo que en principio redundaría en la competencia al dar entrada a nuevos agentes –generadores en el segmento mayorista y comercializadores en el minorista- y cambiar los incentivos de los incumbentes para el ejercicio de poder de mercado –mediante por ejemplo una manipulación de precios- por distraerse el volumen negociado en el mercado a contado. Ejemplos de participación obligatoria habrían sido las subastas CESUR para la adquisición de energía destinada a suministro a tarifa por los comercializadores de último recurso –en las que se ha venido fijando ex-ante la componente de energía de la tarifa regulada en aras a la predictibilidad de la misma- y las subastas de capacidad virtual VPP o «emisiones primarias de energía», que eran opciones de compra de emisión obligatoria para los incumbentes con el objeto de mitigar su poder de mercado mediante un cambio virtual de la estructura del mismo a favor de agentes con baja cuota.

Varias son las aplicaciones regulatorias en materia de seguridad de suministro eléctrico de instrumentos ya descritos en este artículo:

Interrumpibilidad: herramienta de seguridad de suministro basada en la gestión de la demanda y que en momentos de elevada demanda/baja oferta –que se manifestarían en un alza de los precios al contado- permite el operador del sistema –suministrador- ordenar la desconexión de la red a industrias –consumidores- que tengan la flexibilidad de reprogramar su proceso productivo a cambio de pagarles una bonificación establecida en un contrato de servicio interrumpible, en lo que se corresponde con un *callable forward*.

Pagos por capacidad: complemento retributivo a los ingresos de los generadores por venta de energía con el objeto de asegurarles el retorno de la inversión cuando el mercado a contado tiene una organización marginalista con techo de precio administrativamente fijado (23). Se trata pues de un incentivo a la inversión con un efecto añadido de reducción de la volatilidad del mercado a contado, que se configura como opción de compra obligatoria para generadores –que la venden e ingresan la prima- y operador del sistema –que la compra y paga la prima- y con precio de ejercicio el techo de precios. Alternativamente, puede interpretarse como la compensación que reciben las centrales –suministradores- a cambio de la flexibilidad que ofrecen al operador del sistema –consumidor- por estar disponibles operativamente en caso de que sean necesarias para cubrir la demanda, en lo que se corresponde con un *puttable forward*.

Derechos financieros de transmisión: instrumento para la cobertura del diferencial de precios por congestión en sistemas conectados. En el contexto del MIBEL, la capacidad de interconexión entre España

y Portugal, cuando es insuficiente (24), se asigna implícitamente mediante un esquema de «separación de mercados» –*market splitting*– que resuelve la situación de congestión con un re-despacho que separa el precio único en dos precios diferentes (25)–uno en cada nodo, el español y el portugués–resultando en un riesgo de diferencial de precios para aquellos comercializadores del “nodo exportador barato” que tengan compromisos de suministro en el “nodo importador caro”. Para cubrirse de este riesgo de separación de mercados, existe un producto denominado «derecho financiero de transmisión» (*Financial Transmission Right-FTR*) (26) que los operadores del sistema (27) ponen a disposición de los agentes en una subasta primaria –o de emisión– y que a posteriori puede ser negociado de manera secundaria. Se trata de una opción con subyacente el diferencial de precios (28), de manera que el comprador (vendedor) paga (recibe) la prima resultante de la subasta y a cambio tiene el derecho a recibir (la obligación de pagar), en cada una de las horas del periodo y para un notional de 1 MW, la diferencia del precio entre los dos nodos siempre que sea positiva en el sentido de flujo que establezca el contrato –habiendo dos, uno para cada sentido–.

En el caso del gas, se ha avanzado sustancialmente en una liberalización del mercado cimentada en el desarrollo de infraestructuras –gasoductos, estaciones de compresión, regulación y medida, plantas de regasificación y almacenamientos subterráneos- y la separación de actividades –reguladas de red vs liberalizadas de suministro–, lo que ha dado lugar a una base de agentes, volumen, diversificación de orígenes e infraestructuras propicia para la creación de un «*hub ibérico*». Sin embargo, se está todavía en una fase preliminar en la que los mercados secundarios de producto y capacidad se limitan a intercambios voluntarios OTC registrados en la plataforma de balance del operador del sistema y que buscan minimizar costes logísticos y penalizaciones por desvíos sobre cantidades nominadas. El refuerzo de la interconexión con Francia y los cambios normativos pertinentes (29) impulsarían el desarrollo de un mercado, primero a contado y, sustentándose en este, después a plazo, en una secuencia que progresa en la estandarización y liquidez propia de mercados maduros.

Un tratamiento regulatorio particular es el que demanda la «sistemicidad externa» de los mercados energéticos apuntada en la introducción. Por tal se entiende a la influencia de tendencias “macro” generales, al constituir los productos energéticos un activo más que aporta diversificación a las carteras de inversión –u oportunidades de arbitraje o especulación– mediante diferentes mecanismos: desde la posibilidad teórica de la compra del producto físico –inviabile por ser compleja la logística asociada–, hasta la adquisición de acciones de empresas del sector o la toma de posiciones en instrumentos derivados sobre los mismos.

En el actual contexto de crisis financiera, en la que son mayores los riesgos de contraparte y su probabi-

lidad de propagación en un efecto dominó como consecuencia de la sistemicidad externa, se ha reforzado la supervisión regulatoria mediante nuevos requerimientos contables y de reporting en aras a la transparencia y visibilidad de los riesgos agregados. Así el paquete que incluye el reglamento de mercados (*European Market Infrastructure Regulation-EMIR*, que limita las posiciones de operadores no físicos y es el equivalente de la Dodd-Frank de Estados Unidos), la segunda directiva de mercados de derivados (*Market in Financials Instrument Directive-MiFID2*), la revisión de la directiva de abuso de mercado (*Market Abuse Directive-MAD*) y su reglamento sectorial (*Regulation on Energy Market. Integrity and Transparency-REMIT*), y la directiva de requerimientos de capital (*Capital Requirement Directive-CRD*), constituye un impulso hacia la estandarización al imponer el uso obligatorio de mercados organizados y cámaras de compensación centralizadas en una industria en la que siguen predominando las transacciones bilaterales OTC al margen de mercados organizados.

Finanzas convencionales y “Finanzas Energéticas” [¶]

El artículo ha pretendido hacer una exposición de la problemática de la gestión de riesgos en empresas que participan en los mercados energéticos, de cuya liberalización resulta una incertidumbre de precios que se constituye en factor de riesgo principal de entre los “*mega-riesgos*” que afectan de manera directa a su *performance*.

De manera concisa, se ha hecho una revisión no exhaustiva pero rigurosa de los principios y herramientas para el modelado –procesos estocásticos de precios–, valoración–modelo Black-Scholes y alternativas en discreto basadas en árboles o simulación de Monte Carlo–, cuantificación de la exposición –griegas y *Var*– y cobertura –*delta* y minimización de la varianza– de riesgos de mercado mediante los contratos derivados que constituyen hoy por hoy el instrumental estándar dentro de las Finanzas y que, por ser también válidos, han sido incorporados al mundo de la gestión de riesgo corporativo.

Partiendo de esa referencia, se han descrito las peculiaridades de lo energético que demandan un especial tratamiento –almacenabilidad limitada o inviable, fundamentos de precios, riesgos volumétricos y opcionalidad incluida en arreglos contractuales habituales–, para terminar escalando la disciplina desde su dimensión más operativa a la más estratégica ligada a la generación de valor, lo que requiere una visión algo más cualitativa pero siempre con sustento cuantitativo, y lo que tiene una implicaciones –en estructuras, personas, procesos y tecnologías de información– la primera de las cuales es la necesidad de una nueva cultura corporativa del riesgo que involucre a la totalidad de la organización.

Comentar finalmente que, si lo incompleto de los procesos de liberalización apunta hacia más innova-

CUADRO 7
FINANZAS CONVENCIONALES VS FINANZAS ENERGÉTICAS

	Finanzas	Energía
Fuentes de riesgo	Taxonomía estandarizada: riesgos de mercado, de crédito o contraparte, operativos y de liquidez.	Taxonomía no estandarizada, posible clasificación de alto nivel en: estratégicos (o "macro"), operativos y de mercado (o financieros o de tesorería). Necesidad de identificar el número limitado de fuentes o factores de riesgo que son las que en última instancia afectan al negocio de manera sustancial (<i>mega riesgos</i>). Relevancia de riesgos de precios y de cantidades (volumétricos).
Modelado del riesgo de precio	Movimiento Geométrico Browniano.	Importancia de conocimiento de la realidad física de la industria (" <i>from well to the wheel</i> "). Doble personalidad (corto vs largo plazo). Reversión a la media, larga cola y estacionalidad. Descubrimiento de precios y decisiones operativas
Valoración del riesgo (contratos a plazo y futuros)	<i>Cash and carry</i> y ausencia de oportunidades de arbitraje.	Almacenabilidad: coste de acarreo (<i>cost of carry</i>) y rendimiento de posesión (<i>convenience yield</i>) Backwardation y Contango. Utilidades espacial, temporal y de calidad y riesgo de base.
Valoración del riesgo (opciones)	Fórmulas cerradas tipo Black-Scholes	Simulación o árboles. Aproximación (<i>Hull</i>): descuento de flujos de caja reales con el tipo libre de riesgo.
Exposición al riesgo	<i>Value at Risk (VaR)</i> Límites cuantitativos	<i>Cash Flow at Risk (CFaR)</i> . Interpretación cualitativa.
Cobertura del riesgo: estrategia	Dinámica	Estática con posesión plena o virtual del activo de generación
Cobertura del riesgo: instrumentos	Estandarización: predominio de lo estándar (<i>plain vanilla</i>) sobre lo exótico, negociación en mercados organizados.	Personalización: predominio de lo exótico sobre lo estándar, negociación OTC. Riesgo de contraparte. Transacciones estructuradas para la cobertura de riesgos volumétricos.
Valoración de activos	<i>VAN</i> y <i>CAPM</i> . Normalidad y linealidad.	Opciones Reales. Ubicuidad de la opcionalidad. Riesgos no lineales
Creación de valor por gestión del riesgo	No. Búsqueda de oportunidades de arbitraje, juego de suma cero.	Sí. De manera indirecta, evitando tensiones de tesorería y financiación, y de manera directa, informando la toma de decisiones. <i>Chief Financial Officer (CFO)</i> encargado del <i>reporting</i> de riesgos.
Aspectos organizativos	Centralización: departamento de <i>trading</i> como centro de beneficios. <i>Chief Risk Officer (CRO)</i> y comité de riesgos.	Descentralización: el riesgo afecta a todas las áreas funcionales.
Políticas de gestión de riesgos	Cuantitativas El riesgo se mitiga, para ajustarse a los límites establecidos por la regulación. La cultura del riesgo es inherente al negocio.	Cualitativas El riesgo se optimiza, de acuerdo al apetito al riesgo corporativo que tiene dimensión estratégica: ¿qué riesgos y hasta qué punto se están dispuestos a asumir? Incorporación al análisis de decisiones operativas y estratégicas y necesidad de desarrollo de cultura del riesgo. Filosofía <i>Enterprise-Wide Risk Management (EWRM)</i>
Puntos de encuentro	<ul style="list-style-type: none"> - Funciones: cobertura, especulación, arbitraje y descubrimiento de la volatilidad (volatilidad implícita). - Herramientas: procesos de Wiener y cálculo de Itô. - Cartera replicante, valoración riesgo-neutral y fórmula de Feynman-Cak. Simulación Monte Carlo. - Griegas como fundamento de las estrategias de cobertura. - Marco rentabilidad-riesgo de Markowitz. - La energía como un activo más de carteras financieras diversificadas. Los riesgos de sistemicidad y la regulación. - Los riesgos del modelo. - Organizativas: separación de actividades de gestión del riesgo de acuerdo el paradigma <i>front/middle/back office</i>. 	
Una singularidad dentro de lo energético: la electricidad	<ul style="list-style-type: none"> - No almacenabilidad - Factores de volatilidad: <ul style="list-style-type: none"> • Demanda: estacionalidad, laboralidad y banda horaria; climatología • Oferta: hidráulicidad - Precios negativos (situaciones en las que el operador del sistema obliga a desconectarse a una central de base). - Picos. No convergencia al vencimiento de precios a futuro y contado. - <i>Hedging pressures</i> (vs <i>Cost of carry</i>), - Opciones sobre futuros (vs contado). - No validez de la estrategia de la cartera replicante y el <i>cash and carry</i>. 	

FUENTE: Elaboración propia.

ción en productos, procesos y aplicaciones regulatorias de menor o mayor complejidad, los fundamentos de la misma seguirán siendo los que se han desarrollado en este artículo, que concluye con el cuadro 7 de síntesis de las diferencias y semejanzas entre las Finanzas convencionales y las "Finanzas Energéticas".

NOTAS

- [1] "Un barco está seguro amarrado en el puerto, pero para eso no se construyen los barcos". William G.T. Shedd.
- [2] Una oportunidad de arbitraje permite la consecución de un beneficio sin riesgo alguno, típicamente comprando barato y revendiendo caro.
- [3] En su versión tipo bermuda únicamente cabe el ejercicio temprano en momentos concretos.
- [4] Al estar acotada la pérdida tanto para el comprador como el vendedor, son instrumentos que generan liquidez en mercados como el de catástrofes o el climático.
- [5] Precisar que la tasa libre de riesgo que aparece en ambas expresiones no es la misma, pues se ha de distinguir entre la de capitalización continua r_c –que es una tasa instantánea– y la discreta r_d . Así, el valor final de una unidad monetaria tras un periodo será $e^{\int_0^T r_c dt} = e^{r_c T}$ y $1 + r_d T$, respectivamente, que para que coincidieran habría de ser $r_d > r_c$. O equivalentemente, para obtener un mismo valor final, con capitalización continua sería necesario esperar menos tiempo que con discreta, puesto que los intereses se van reinvertiendo continuamente conforme se van devengando: si $e^{r_c T} = 1 + r_d T$ y $r_c = r_d = r$ entonces $T = \ln(1+r)/r < 1$. Si bien las expresiones con capitalización/descuento discreto son más intuitivas, las del caso continuo son más sencillas de manipular matemáticamente por las propiedades que presenta la función exponencial.
- [6] Que se sintetiza en la siguiente tabla, que incluye también opciones de venta y el reparto de un dividendo y a una tasa continua:

	S	X	T-t	σ	r	y
Opción compra	+	-	+	+	+	-
Opción venta	-	+	? (europea)/+(americana)	+	-	+

- [7] Black y Scholes vinculados a la Universidad de Chicago. Aunque fue reconocida la contribución necesaria de Black, este no pudo recibir el premio Nobel de Economía de 1997 junto a Merton y Scholes por haber fallecido en 1995.
- [8] La descripción que del proceso se hace es «técnica» o de serie temporal, frente a la alternativa «fundamental», que consiste en modelar los factores de oferta y demanda de los que depende el precio, lo que es computacionalmente mucho más exigente.
- [9] Un movimiento browniano en su versión aritmética o de precios –niveles– se representa con la ecuación diferencial estocástica $dS = \mu \cdot dt + \sigma \cdot dW$ que permite precios negativos, a diferencia del modelo geométrico o de retornos –variaciones unitarias– en el que los precios son siempre positivos.
- [10] Esta representación en un espacio tridimensional que incluya también como dimensión el tiempo hasta el vencimiento T-t es lo que se denomina «superficie de volatilidad implícita».
- [11] Ese momento se conoce como «tiempo de parada» (*stopping time*).
- [12] A partir de las observaciones de dos precios a plazo con diferente vencimiento, se dispone de un sistema de dos ecuaciones $F_1 = S \cdot e^{(r-y)T_1}$ y $F_2 = S \cdot e^{(r-y)T_2}$ y dos incógnitas (S e y) que resuelto nos da el valor del rendimiento de posesión y.

- [13] Por ello los productos suelen liquidarse sobre promedios de precios en horas base (*off-peak*), pico (*on-peak*) o días completos (*round the clock*).
- [14] El producible hidráulico en un país como España condiciona mucho la oferta de electricidad. La excepción a la rigidez de la misma precisamente la constituye la hidroelectricidad.
- [15] Lo que es lógico en caso de la electricidad. Y lo que implica que sean raros los casos de opciones de tipo americano. En Estados Unidos, el caso ENRON supuso la desaparición de las opciones ordinarias sobre la electricidad a contado.
- [16] Una posibilidad de cobertura sería con derivados de subyacente el tiempo meteorológico, que explotan la correlación entre demanda de electricidad y climatología.
- [17] En el origen del *crack* financiero reciente está la debilidad de los modelos de cuantificación de la exposición riesgos, que estaban calibrados con la información histórica correspondiente al largo periodo de bonanza previa a la crisis.
- [18] Ya sea yacimiento de hidrocarburos depletado, acuífero, caverna salina o cavidad en roca, cada uno de ellos con diferentes necesidades de gas colchón y cualidades dinámicas.
- [19] Una interpretación geométrica la da un triángulo rectángulo en el que, si los catetos –factores de riesgo– son muy diferentes, por el teorema de Pitágoras será el más largo –mega-riesgo– el que más influya en la hipotenusa –riesgo total–.
- [20] Existen en el mercado acreditaciones profesionales como la *ERP®-Energy Risk Professional* de la *GARP®-Global Association of Risk Professionals*.
- [21] Moreno-Torres (2013) da una visión económica introductoria de la política energética con aplicación al caso español.
- [22] Se llama *market maker* a aquel agente que tiene el compromiso de introducir en el mercado órdenes de compra –*bid*– y de venta –*ask*– para dotarle de liquidez, que se manifestará en una reducción del diferencial –*spread*– entre ambos precios a los que está dispuesto a cerrar una transacción.
- [23] Lo que no ocurre en los mercados sin restricciones de precios (*energy-only*) en los que la compensación por capacidad está implícita en el precio.
- [24] La asignación de capacidades de interconexión escasas se realiza por mecanismos de mercado, tanto en el corto plazo de manera implícita a través de los esquemas de «separación de mercados» –*market splitting*, como entre España y Portugal– o de «acoplamiento de mercados» –*market coupling*, como entre España y Francia–, como en el medio y largo plazo de manera explícita a través de subastas.
- [25] Generándose una renta de congestión que ingresan los operadores del sistema con el compromiso político de reinvertirlo en capacidades adicionales de interconexión. Si la apuesta decidida por la construcción de infraestructuras de conexión es un factor clave de éxito del MIBEL, en el caso de España-Francia aún existe el reto de su refuerzo, por ser claramente insuficiente la capacidad actual.
- [26] Un instrumento similar para las coberturas de riesgos de congestión en elementos nodales del sistema sería un *Flowgate Right-FGR*.
- [27] Red Eléctrica de España-REE y Redes Energéticas Nacionales de Portugal - REN.
- [28] Una alternativa sería un contrato único de carácter físico (*Physical Transmission Right-PTR*) que para evitar su desperdicio se complementa con cláusulas del tipo *use it or lose it-UIOLI* o *use it or sell it-UIOSI* que dan lugar a mercados secundarios de capacidad.
- [29] Que habrán de ser conformes a lo establecido en el tercer "paquete" de mercado interior de la energía de la Unión Europea, en el contexto del cual en la actualidad

se están desarrollando los códigos de red que procedimentan aspectos relativos a asignación de capacidad, gestión de congestiones, reglas de balance, interoperabilidad, acceso, etc...

BIBLIOGRAFÍA ▼

BLACK, F. y SCHOLES, M. (1973): "The Pricing of Options and Corporate Liabilities". *Journal of Political Economy*.

BRENNAN, M. y SCHWARTZ, E. (1985): "Evaluating natural resource investments". *The Journal of Business*

COX, J.C.; ROSS, S. A. y RUBINSTEIN, M. (1979): "Option Pricing: a simplified approach". *Journal of Financial Economics*.

EDWARDS, F. R. (1995): "Derivatives can be hazardous to your health: The case of Metallgesellschaft". *Derivatives Quarterly*.

LAUTIER, Y. y SIMON, Y. (2009): "Energy Finance: The Case for Derivative Markets". University Paris Dauphine,

MERTON, R. C. (1973): "Theory of Rational Option Pricing". *The Bell Journal of Economics and Management Science*.

MORENO-TORRES GÁLVEZ, A. (2013) "Energy Economics: The Case of Spain". LAM Alumni-Case Studies Series. The Harris School of Public Policy. The University of Chicago.

Libros recomendados

COPELAND, T. y ANTIKAROV, V. (2003) "Real Options: a practitioner's guide", revised edition. Cengage Learning.

EDWARDS, D. "Energy Trading and Investing". Mc Graw Hill, 2009
FIORENZANI, S.; RAVELLI, S. y EDOLI, E. (2011): "The handbook of Energy trading". Wiley Finance.

GEMAN, H.(2005): "Commodities and commodity derivatives: modelling and pricing for agriculturals, metals and energy". John Wiley & Sons.

HULL, J. C. (2012): "Options, Futures and Other Derivatives", 8/E. Prentice Hall.

MUN, J. (2002): "Real Options Analysis: Tools and Techniques for Valuing Strategic Investments and Decisions", 2nd edition. Wiley Finance.

PIPILOVIC, D. (2007): "Energy Risk: valuing and managing energy derivatives". Mc Graw Hill.

SCHOFIELD, N. C. (2007): "Commodity derivatives. Markets and Applications". Wiley Finance.

WILMOTT, P. (2009): "Frequently Asked Questions in Quantitative Finance". Wiley.

WILMOTT, P. (2007): "Paul Wilmott introduces Quantitative Finance". Wiley,

Otro material interesante:

MCKINSEY AND COMPANY. McKinsey Working Papers on Risk (http://www.mckinsey.com/client_service/risk/latest_thinking/working_papers_on_risk)

PARSONS, JOHN E. "Practice of Finance: Advanced Corporate Risk Management". Sloan School of Management. MIT Open Courseware, 2009.