

## CAPÍTULO II

# Negociación de alta frecuencia y calidad del mercado: revisión de una década de investigación

Roberto Pascual\*

Revisamos una década de investigación académica sobre el HFT para evaluar su impacto sobre la calidad de los mercados financieros. Además de caracterizar el HFT y sus estrategias canónicas, examinamos cómo cada una de ellas afecta a la liquidez y a la eficiencia en precios. Concluimos que el efecto neto del HFT ha sido positivo. No obstante, el HFT oportunista podría tener externalidades negativas, tanto sobre los proveedores de liquidez como sobre la negociación informada. Además, el HFT podría aumentar el riesgo sistemático y reducir la eficiencia en precios a largo plazo al desincentivar la adquisición de nueva información.

*Palabras clave:* HFT, negociación algorítmica, mercado bursátil, liquidez, formación de precios, eficiencia en precios, microestructura.

---

\* El autor agradece el apoyo financiero del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, de la Agencia Estatal de Investigación y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional a través del proyecto PRPPID2021-125317NB-I00. El autor agradece también a David Abad, Carole Comerton-Forde, Álvaro Escribano, Magdalena Massot, Rebeca Méndez-Durón, y José Yagüe sus comentarios sobre versiones preliminares del trabajo. Toda la responsabilidad sobre el contenido de este trabajo es del autor.

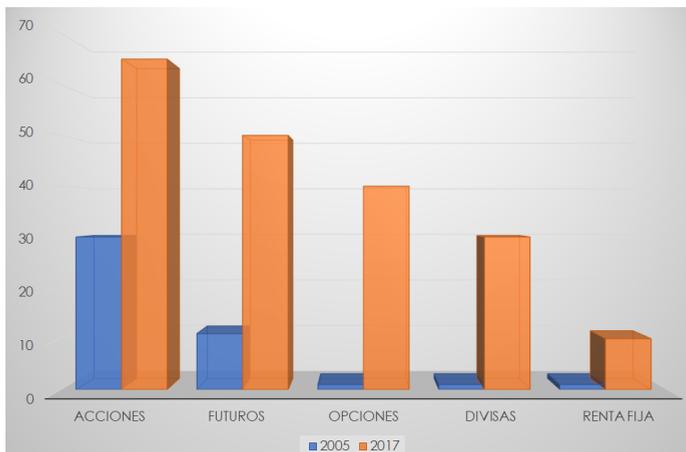
## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los mercados financieros han experimentado una profunda transformación tecnológica. Los mercados de contacto físico (o parqués) han quedado relegados a un papel secundario (Hendershott y Moulton, 2011), mientras que el grueso de la negociación se realiza a través de plataformas electrónicas. En éstas, los participantes envían sus instrucciones de negociación (órdenes) al servidor del mercado (*host*) de forma remota y éste se encarga de ejecutarlas siguiendo unas reglas preestablecidas. Estos mercados virtuales traen consigo una creciente automatización, esto es, la sustitución del hombre por la máquina en diferentes fases del proceso, como por ejemplo en la gestión del flujo de órdenes, el emparejamiento de órdenes de compra y venta, la fijación del precio de transacción, la liquidación de posiciones o la transmisión de la información tanto pre-transacción (liquidez) como post-transacción (negociación).

Los operadores más sofisticados explotan el potencial de los mercados virtuales buscando formas de negociar más eficientes. De este modo surge la negociación algorítmica, o *algorithmic trading* (AT), el uso de programas de ordenador (algoritmos) para, de forma automática tomar decisiones, implementar estrategias y gestionar órdenes. El crecimiento del AT durante las últimas décadas ha sido exponencial, como se muestra en la [figura 1](#). En el año 2017, el 65 % del volumen global negociado en acciones era atribuible al AT, doblando su peso respecto al año 2005. Pero el AT no se limita sólo a negociar acciones. La [figura 1](#) ilustra el rápido crecimiento del AT en mercados de derivados y divisas, siendo prácticamente inexistente en 2005. Centrándonos en el caso de los mercados bursátiles, la [figura 2](#) muestra que la

Figura 1.

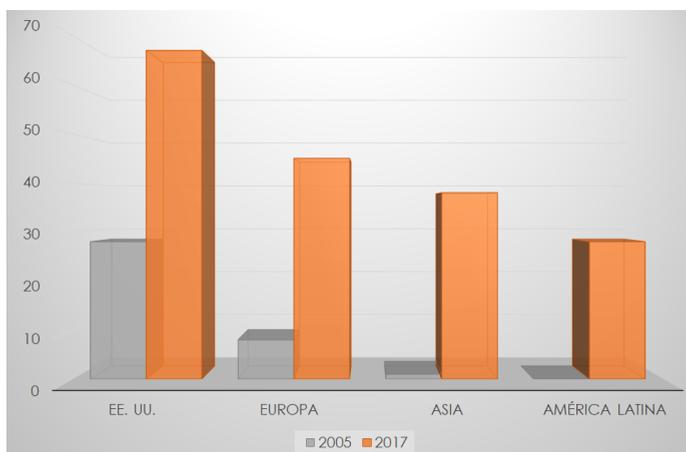
### Cuota global del AT (% turnover)



Fuentes: Hong Kong Institute for Monetary and Financial Research (2021).

Figura 2.

### Cuota del AT en acciones por región (% turnover)



Fuentes: Hong Kong Institute for Monetary and Financial Research (2021).

presencia del AT es mucho mayor en aquellas regiones donde se desarrolló inicialmente, es decir, EE. UU. (65 %) y Europa (45 %), aunque se está expandiendo rápidamente en Asia y Latinoamérica.

Al mismo tiempo, los continuos avances de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) han permitido reducir el tiempo (y aumentar la capacidad) de procesamiento de información, así como acelerar la comunicación entre máquinas, lo que se conoce como *latencia*. Una menor latencia posibilita explotar oportunidades de beneficio de duración cada vez más corta, incluso inferiores al segundo, que, si bien siempre han estado disponibles, no eran aprovechables a la velocidad de respuesta del ser humano. La única forma de explotarlas es mediante la automatización de las decisiones de negociación. La parte del AT que tiene por objeto explotar oportunidades de beneficio ultracortas generadas por el propio proceso de negociación a una velocidad extrema se conoce como negociación de alta frecuencia o *high frequency trading* (HFT). Las empresas especializadas en HFT (por ejemplo, Virtu, Hudson River, Jump Trading, Optiver, Tower Hill, etc.) desarrollan algoritmos para negociar exclusivamente por cuenta propia, es decir, con sus propios recursos. En general, podemos definir el HFT como negociación algorítmica en propiedad y de baja latencia.

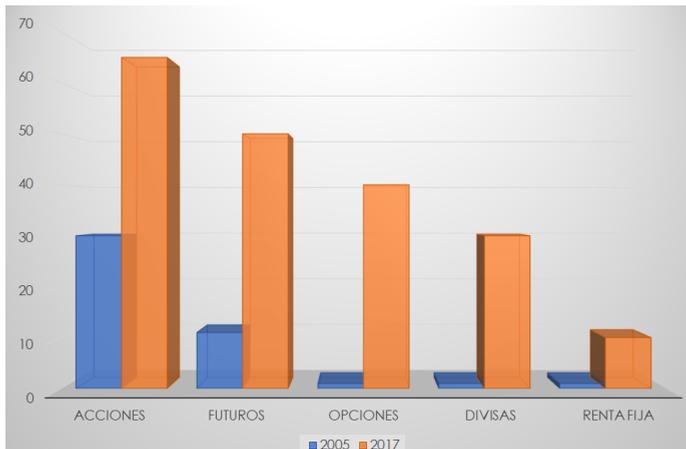
¿Cuán importante es el HFT? La [figura 3](#) muestra la evolución de la cuota de mercado del HFT en EE. UU. desde 2005 hasta 2022, medida en términos de porcentaje del volumen total negociado en dólares norteamericanos. En el año 2005 el HFT atesoraba ya el 20 % del mercado bursátil en EE. UU., mientras que era prácticamente inexistente en Europa. Impulsado por una volatilidad anormalmente elevada, cuatro años después, durante la crisis finan-

ciera de 2008-2009, el HFT alcanzaba su momento de mayor protagonismo, con cuotas del 61 % en EE. UU. y del 40 % en Europa. Más recientemente, la cuota del HFT se ha estabilizado alrededor del 50 % en EE. UU. y del 30-35 % en Europa.

Este rápido crecimiento ha dado lugar a un encendido debate entre reguladores (por ejemplo, SEC, 2014; ESMA, 2015) y medios especializados (por ejemplo, Duhigg, 2009; Bowley, 2010, 2011; Popper, 2012; Barlett y McCrary, 2015) sobre los pros y contras del HFT, espoleado por *bestsellers* mundiales (Lewis, 2014) que ofrecen una visión bastante sesgada y negativa sobre el HFT<sup>1</sup>. El mundo académico no tardó en aceptar el desafío de proporcionar un marco teórico sólido y un trabajo empírico riguroso con el que poder abordar e intentar responder a las múltiples preguntas, dudas y preocupaciones que el HFT despertaba. Este trabajo resume los resultados y principales conclusiones de dicha investigación, desde los primeros estudios publicados, allá por el 2010, y hasta el momento en que se escriben estas líneas, a finales de 2022.

Figura 3.

### Cuota del HFT en EE. UU. y Europa (% \$Vol)



Fuentes: TABB Group, Congressional Research Service (2016), IBISWorld (2022).

John Cochrane (2013), antiguo presidente de la American Finance Association, escribe que “desde un punto de vista social, la cuestión más relevante sobre el HFT es si arruina los mercados o los hace más eficientes y líquidos” (pág. 45). Este trabajo responde a la cuestión planteada por Cochrane: ¿Cuál ha sido el impacto del HFT en la *calidad* de los mercados financieros, entendida ésta como una función creciente de la liquidez y la eficiencia en precios? Los lectores familiarizados con la literatura sobre HFT echarán probablemente de

<sup>1</sup> Véase Kovac (2014) para una discusión crítica del libro de Lewis.

menos la mención de algún que otro trabajo. Es esperable, puesto que no pretende ser ésta una revisión exhaustiva. Los trabajos que se citan han sido seleccionados porque se consideran representativos y/o porque ilustran mejor las diferentes teorías y conclusiones que se desean exponer, sin poder (ni querer) evitar que las preferencias del autor se vean reflejadas en alguna que otra elección. Para el lector insatisfecho, hay otros muchos trabajos y libros excelentes con los que complementar este estudio<sup>2</sup>.

## 2. NEGOCIACIÓN ALGORÍTMICA DE BAJA LATENCIA: UN MARCO GENERAL

### 2.1 ¿Qué caracteriza al HFT?

Hay que distinguir dos tipos de AT: en agencia y en propiedad. Los algoritmos en agencia son aquellos que intermediarios y desarrolladores de *software* ofrecen a sus clientes (fondos de inversión, fondos de cobertura) para minimizar los costes de ejecución, el tiempo de ejecución o el impacto en precios de su negociación. En este caso, la decisión de qué y cuánto comprar o vender no la toma el algoritmo, sino un gestor de carteras; el algoritmo ayuda a implementar dichas decisiones de la manera más eficiente posible. Puesto que el objetivo es ejecutar un cambio de posición, el AT en agencia mayormente demanda liquidez. Dado que los usuarios tienen horizontes de inversión a largo plazo, el éxito de sus estrategias no depende de la velocidad con la que el algoritmo implemente sus decisiones. Finalmente, el *input* de estos algoritmos es estimaciones históricas (impactos medios en precios, probabilidades de ejecución, etc.). No requieren de información en tiempo real más que para hacer seguimiento de sus propias órdenes<sup>3</sup>.

Por otro lado, los algoritmos en propiedad son desarrollados y utilizados por empresas tecnológicamente sofisticadas para negociar por cuenta propia. Las empresas especializadas en AT en propiedad se conocen como empresas de HFT. Algunos bancos e intermediarios financieros (por ejemplo, Goldman Sachs, JP Morgan, Citigroup), así como fondos de cobertura (por ejemplo, Citadel) tienen también mesas de negociación especializadas en HFT. El HFT explota oportunidades de beneficio cuyas duraciones se miden en unidades de tiempo inferiores al segundo, como milisegundos (ms), microsegundos ( $\mu$ s) o nanosegundos (ns). Por tanto, un HFT debe ser capaz de responder a estímulos y señales del mercado a velocidades extremas y para ello tiene que poder acceder a la información que genera el mercado,

<sup>2</sup> Para revisiones de la literatura véase Biais y Woodley (2011); Foucault (2013); SEC (2014); Biais y Foucault (2014); Goldstein, Kumar y Graves (2014); O'Hara (2015) y Menkveld (2016). Para libros sobre AT/HFT véase Aldridge (2009); Johnson (2010); Patterson (2012); Narang (2013); Easley, López de Prado y O'Hara (2013) y Cartea, Penalva y Jaimungal (2015).

<sup>3</sup> Para ejemplos específicos de algoritmos en agencia, véase Johnson (2010).

procesarla y mandar respuestas al mercado rápidamente<sup>4</sup>. Minimizar la latencia se convierte así en un elemento clave en el éxito de las estrategias de HFT. Para aumentar su velocidad, las empresas de HFT invierten en tecnología de vanguardia que utilizan para correr sus algoritmos. La intensa competencia con otras empresas de HFT les obliga a un reequipamiento continuo. Además, los negociadores de alta frecuencia (HFT) contratan servicios ofrecidos por el mercado que permiten incrementar la velocidad con la que sus servidores se comunican con el *host*. Veremos estos servicios de baja latencia en secciones posteriores.

Las empresas de HFT tienen un horizonte de *negociación*, no de *inversión*. Los HFT se preocupan poco por los fundamentos del valor de los activos que compran y venden, por las expectativas a largo plazo y por el riesgo de las empresas cuyos activos negocian. Esto se refleja en sus plazos entre constitución y liquidación de posiciones, que son extremadamente cortos. Los HFT evitan mantener grandes posiciones abiertas en cualquier activo. Para conseguirlo, negocian en cantidades pequeñas y gestionan intensivamente sus inventarios, manteniéndolos cercanos a cero durante y, especialmente, hacia el final de cada sesión.

Las estrategias de HFT generan un flujo de mensajes de negociación muy intenso. Esto es debido a que sus algoritmos monitorean el mercado en tiempo real, reaccionando a cualquier estímulo o señal valiosa, no sólo en busca de oportunidades de beneficio, sino también para gestionar el riesgo de las órdenes límite almacenadas en el libro. Los algoritmos responden a estas señales en forma de nuevas órdenes, revisiones y cancelaciones. Así, la actividad del HFT se caracteriza por unas ratios de mensajes sobre transacciones o cancelaciones sobre transacciones muy altas.

El HFT concentra su actividad, no en exclusiva, pero mayormente, en los activos más líquidos de cada mercado. Los activos líquidos garantizan inmediatez y, por tanto, velocidad en la ejecución de sus estrategias. La gestión de inventario se simplifica ya que los activos líquidos negocian con frecuencia y es más fácil revertir posiciones. Además, liquidez implica menores costes de negociación. Debido a la naturaleza de las oportunidades de beneficio que explotan los HFT, sus beneficios por operación son bajos, por lo que deben mantener bajos también sus costes de negociar. Por último, la negociación de los activos más líquidos se encuentra más fragmentada, repartida entre múltiples plataformas. La negociación fragmentada genera más oportunidades de beneficio que los HFT pueden explotar. En general, liquidez y facilidad de negociación son de enorme importancia para los HFT. Precisamente por ello, los HFT no participan en mercados OTC como, por ejemplo, el de bonos corporativos.

Por último, bajo la etiqueta HFT se incluyen un rango amplio de estrategias de negociación, que la literatura agrupa en dos grandes bloques: creación de mercado, esto es, provisión de liquidez, y negociación oportunista, que incluye, por ejemplo, arbitraje de baja

---

<sup>4</sup> La naturaleza de estas señales es muy amplia, e incluye el flujo de órdenes y el estado del libro de órdenes (Kwan, Philip, y Shkilko, 2022), activos financieros correlacionados (Budish, Crampton y Shim, 2015) y anuncios públicos, tanto macroeconómicos como corporativos (Hu, Pan y Wang, 2017; Chordia, Green y Kottimukkalur, 2018). Pero podrían también extraerse de fuentes menos tradicionales, como mensajes de Twitter, opiniones en redes sociales, y mediante *news analytics* (Dugast y Foucault, 2018).

latencia y negociación direccional, que fundamentalmente implican toma de liquidez. Los HFT que se especializan en provisión de liquidez se conocen como *high-frequency market makers* (HFMM), mientras que los HFT que implementan estrategias oportunistas se conocen como *high-frequency bandits* (HFB) o *quote snypers*. Hablaremos de estas estrategias más adelante.

## 2.2. Un entorno favorable

La negociación algorítmica no es un fenómeno reciente. Ya en los años 80 del siglo XX los inversores institucionales hacían uso de algoritmos para rebalancear sus carteras o para negociar al precio medio ponderado (por volumen) de la sesión. El HFT, por contra, es un fenómeno del siglo XXI, facilitado en gran medida por la creciente automatización de los mercados, un entorno regulatorio favorable y la cada vez mayor fragmentación de los mercados financieros.

Piense en un mercado financiero. Seguramente, la imagen que tiene en mente es la de un parque (*trading floor*). ¿El del New York Stock Exchange (NYSE), tal vez? Un parque es un mercado físico, centralizado, en el que los operadores se encuentran para negociar, cara a cara. Sin embargo, en la actualidad las plataformas de negociación virtual han relegado estos parques a un papel secundario. En el NYSE, la negociación electrónica empezó en 1976, aunque limitada a órdenes pequeñas que demandaban ejecución inmediata y que eran gestionadas por el especialista en el parque<sup>5</sup>. En 1990 el parque todavía acaparaba el 70 % del volumen total negociado (Harris y Hasbrouck, 1996). Con los años, sin embargo, las capacidades del mercado electrónico fueron aumentando, de modo que a finales del siglo XX la cuota del mercado virtual era ya del 50 % (Sofianos y Werner, 2000). Tras la introducción de la ejecución automática para órdenes pequeñas contra el libro en 2000 y del *OpenBook* en 2002, que ofrecía por primera vez información sobre el libro de órdenes a operadores fuera del parque (Boehmer, Saar y Yu, 2005), la cuota del parque cayó en picado, situándose en un 20 % en 2006. Finalmente, con la implantación del sistema Hybrid a finales de 2006, que generalizó la ejecución automática de órdenes, la cuota del parque se situó en el 11 % (Hendershott y Moulton, 2011). En la actualidad, los operadores del parque trabajan mayormente órdenes de gran tamaño (bloques) y transacciones especialmente complejas. Como si de un piloto de avión se tratase, el parque interviene en el despegue (apertura), el aterrizaje (cierre) y en periodos de turbulencias (alta volatilidad); el resto del tiempo, el mercado funciona en piloto automático.

En un mercado electrónico, las órdenes se envían remotamente, mediante terminales de ordenador. El *host* se encarga después de emparejar las órdenes de signo opuesto según la regulación propia de cada mercado. En ningún momento hay contacto físico entre los participantes, ni se puede elegir a la contraparte. El mercado se organiza como un gran centro de

<sup>5</sup> El CATS (*Computer Assisted Trading System*) de 1976 del Toronto Stock Exchange, fue el primer mercado 100 % virtual. El mercado español adoptó el CATS en 1989, y no fué hasta 1995 cuando se sustituyó por el Sistema de Interconexión Bursátil Español (SIBE). En el año 2002, el 67 % de los mercados bursátiles de todo el mundo eran ya totalmente electrónicos (Jain, 2005).

datos, un espacio físico para el almacenamiento del *host* y de los servidores de los operadores. Estos últimos se conectan al *host* mediante una compleja red de fibra óptica y/o inalámbrica. Siguiendo con nuestro ejemplo, el centro de datos del NYSE se encuentra en la ciudad de Mahwah, en el estado de New Jersey, a unos 14 kilómetros de Wall Street (Manhattan, Nueva York), donde el NYSE mantiene el parque.

La negociación se desarrolla alrededor de un libro de órdenes, electrónico y abierto, que constituye la única fuente de liquidez del mercado. Siguiendo un escrupuloso orden de llegada, el *host* valora la posibilidad de ejecutar inmediatamente cada orden con otra u otras de signo opuesto almacenadas en el libro. Si dos órdenes llegan simultáneamente, el *host* determina aleatoriamente el orden de prioridad. Si no existe contrapartida, la orden pasa a almacenarse en el libro, salvo instrucción explícita en contra, a la espera de ser ejecutada. La negociación es continua, desde la apertura al cierre. No obstante, muchos mercados siguen usando subastas (también electrónicas) para determinar el precio de apertura y/o cierre de la sesión y para reiniciar la sesión continua tras una interrupción, ya sea programada o forzada (*trading halt*) (por ejemplo, Abad y Pascual, 2010).

Los mercados virtuales tienen muchas ventajas sobre los mercados físicos. Ofrecen mayor capacidad para el procesamiento de órdenes, lo que redundará en un mayor volumen negociado. La velocidad con la que se procesan las órdenes es mayor, lo que permite ofrecer una respuesta más inmediata a las necesidades de los operadores. La cantidad de información que se puede procesar y transmitir en tiempo real es mayor, lo que se traduce en una mayor transparencia y eficiencia en precios. Los costes de operar en estas plataformas son menores, lo que conlleva menores comisiones y mayores ganancias por negociar. Además, las plataformas virtuales son más fáciles de supervisar, ya que toda la información se registra y almacena electrónicamente. Diversos estudios muestran efectos positivos de la automatización en la calidad de los mercados. Goldstein, Hu y Meng (2009) asocian negociación electrónica con menores costes de ejecución. Jain (2005) encuentra que cambiar de negociación física a virtual conlleva un menor coste de capital para las empresas cotizadas y una reacción positiva en el precio a corto plazo, consistente con un efecto positivo sobre la liquidez. Hendershott y Moulton (2011) encuentran que tras la entrada del *Hybrid* en el NYSE la eficiencia en precios mejoró.

Las ventajas de la negociación virtual sobre la física no pueden más que aumentar con el tiempo a raíz del continuo progreso en las TIC. Dado que las estrategias del HFT requieren de automatización y baja latencia, se benefician directamente de dicho progreso. La innovación en las TIC: (a) reduce la latencia, lo que permite aumentar la velocidad a la que los HFT pueden recibir, procesar y responder a señales del mercado, así como reducir el tiempo de ejecución de sus órdenes más agresivas; (b) aumenta el volumen de información que puede procesarse en un tiempo dado, reduciendo los costes de seguimiento de órdenes (*monitoring*) y posibilitando explotar oportunidades de arbitraje de ultracorta duración; (c) hace posible los servicios de baja latencia, como la colocación; y (d) atenúa las barreras de entrada<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Por ejemplo, gracias al progreso tecnológico, operadores externos pueden competir con miembros del mercado en la provisión de liquidez. De hecho, estos *proveedores de liquidez endógenos (ELP)* han desplazado a los creadores de mercado tradicionales (Annand y Venkataraman, 2016). Muchos de ellos son empresas de HFT.

La automatización y la innovación tecnológica posibilitan las estrategias del HFT, pero no explican su eclosión. ¿Por qué se acelera el crecimiento del HFT en la primera década del siglo XXI? Las razones hay que encontrarlas, en primer lugar, en un cambio de marco regulatorio, tanto en EE. UU., con la Regulation New Market System (Reg NMS), como en Europa, con la Markets in Financial Instruments Directive (MiFID), ambas en vigor desde noviembre de 2007. Estas iniciativas regulatorias tenían como objetivo común reducir los costes explícitos (comisiones) e implícitos (iliquidez) de negociar, fomentando la innovación en la tecnología de negociación y la competencia. Para lograrlo, facilitaron la creación de plataformas de negociación alternativas (ATP/MTF) de propiedad y gestión privadas para casar órdenes fuera de los mercados tradicionales.

El principal resultado de la aparición de las ATP ha sido la creciente fragmentación de la negociación. El caso más llamativo es el de EE. UU. Solamente dos mercados determinan qué empresas se admiten a cotización (*listing exchanges*): el NYSE y el Nasdaq. Sin embargo, las acciones listadas en estos mercados se negocian, simultáneamente, en otras 22 ATP transparentes (*lit markets*), que tienen la categoría de National Securities Exchanges, además de en otros 69 mercados opacos (*dark pools*)<sup>7</sup>. Según el CFA Institute, en 2017 NYSE y Nasdaq tenían una cuota del 20 % sobre el volumen negociado de las acciones listadas en sus respectivos mercados. En general, los mercados transparentes (incluyendo NYSE y Nasdaq) representan el 60 % del volumen total negociado en EE. UU., otro 17 % es para las *dark pools*, y el resto corresponde a otros mecanismos de negociación (sistemas de internalización, OTC). En Europa, el grado de fragmentación es menor, no obstante, igualmente significativo. Según Fidessa<sup>8</sup>, en 2017 Bolsas y Mercados Españoles (BME) atesoraba una cuota del 47 % sobre el volumen total negociado en los activos del IBEX-35, similar a la del London Stock Exchange sobre los constituyentes del FTSE-100 o Euronext-Paris sobre las acciones del CAC-40.

La fragmentación y el HFT son fenómenos simbióticos. Por un lado, las nuevas plataformas de negociación necesitan ofrecer niveles de precios y de liquidez competitivos para poder atraer negociación y crecer (Menkveld, 2013). Por otro lado, los HFT necesitan de nuevas plataformas que satisfagan sus necesidades de automatización, velocidad y bajas comisiones. Además, los entornos fragmentados generan mayores oportunidades de beneficio para los HFT.

Un segundo factor importante para entender el *boom* del HFT es la crisis financiera mundial de 2008-2009, un entorno altamente volátil que aumentó los beneficios en juego para la industria del HFT y provocó la entrada de nuevos competidores. Este es el periodo en que el HFT alcanzó una mayor cuota de mercado en EE. UU. y Europa (ver *figura 3*). Tras la crisis financiera, la industria de HFT ha vivido un proceso de maduración y concentración. Por un

<sup>7</sup> La literatura sobre fragmentación y *dark pools* es casi tan extensa como la literatura sobre HFT, y está fuera del alcance de este trabajo. Para el lector interesado, véase O'Hara y Ye (2011); Degryse, de Jong y van Kervel (2015); Comerton-Forde y Putnins (2015); Foley y Putnins (2016); Buti, Rindi y Werner (2017); Menkveld, Yueshen y Zhu (2017).

<sup>8</sup> <https://fragmentation.fidessa.com/>

lado, los entornos estables no son favorables al HFT y, tras la crisis, los mercados tuvieron un crecimiento monótono. A los menores ingresos potenciales hay que añadir un aumento de los costes operativos (tecnología y servicios de baja latencia). En estas condiciones, los contendientes más pequeños fueron expulsados del mercado o absorbidos por las empresas más grandes, incrementando el nivel de concentración de la industria (Popper, 2012). Según IBISWorld<sup>9</sup>, en 2012 había 646 empresas de HFT operando en EE. UU. En 2017 quedaban 202 empresas y en 2022 únicamente 130. El crecimiento del volumen de negocio en el sector del HFT en EE. UU. entre 2017 y 2022, sin embargo, se estima en un 5,8 %, y el número de empleados se ha mantenido estable, alrededor de los 4.000.

### 2.3. Competencia en latencia

La velocidad es central en el éxito de las estrategias de HFT. Para ganar velocidad, los HFT hacen todo lo posible por minimizar su latencia. La latencia de un HFT  $i$  en un mercado  $j$  depende del tiempo que tarda el servidor del HFT  $i$  en recibir una señal del mercado  $j$  (por ejemplo, un cambio de precio); del tiempo que necesita el servidor del HFT  $i$  para procesar la señal y reaccionar a la misma (por ejemplo enviando un mensaje de cancelación de una orden en el libro); del tiempo que tarda esa respuesta en llegar al *host* del mercado  $j$ ; del tiempo que tarda éste último en procesar y ejecutar la cancelación; y, por último, del tiempo que tarda el HFT  $i$  en recibir algún tipo de respuesta del mercado  $j$  (p. ej., una confirmación de la cancelación). Es decir, la latencia del HFT  $i$  depende de su propia tecnología y poder computacional, pero también de la tecnología del mercado  $j$  y la velocidad de la red de comunicación entre el HFT  $i$  y el mercado  $j$ . Por tanto, el HFT  $i$  puede reducir su latencia invirtiendo en sistemas informáticos (*hardware* y *software*) ultrarrápidos que le permitan reducir el tiempo de procesamiento y reacción ante una señal informativa. Pero el mercado  $j$  también puede contribuir actualizando su propia tecnología para reducir el tiempo necesario para procesar instrucciones entrantes y salientes, así como emparejar órdenes y reportar transacciones.

Estas reducciones de latencia no dejan de ser un servicio que los mercados ofrecen a los operadores de forma gratuita, pero no por motivos altruistas. En un entorno fragmentado, como el descrito anteriormente, los mercados compiten entre sí para atraer flujo de órdenes, negociación. Al fin y al cabo, los mercados son organizaciones con ánimo de lucro, el volumen negociado es un determinante importante de su beneficio, y los HFT contribuyen significativamente al mismo, como ya hemos visto. No debería extrañar, por tanto, que los mercados mejoren su tecnología para acomodar sus plataformas a las necesidades del HFT.

El mercado  $j$  también contribuye a reducir la latencia del HFT  $i$  ofreciendo a éste servicios de baja latencia, esta vez sí, a cambio de una compensación. Uno de estos servicios es la *colocación*, evolución natural del concepto de proximidad. Los medios de comunicación

<sup>9</sup> <https://www.ibisworld.com/united-states/market-research-reports/high-frequency-trading-industry/>

tienen corresponsales alrededor del mundo porque esperan que estar cerca de donde nace la noticia ayude a entender mejor lo que está sucediendo, así como procesar y reportar más rápido la información. Traslademos este símil a los mercados financieros: los operadores que estén más cerca del mercado deberían observar antes los movimientos de éste y sus respuestas procesarse antes. En otras palabras, a mayor proximidad, menor latencia.

Antes de la automatización, la ventaja de la proximidad correspondía a los operadores que estaban físicamente en el parqué, que podían observar lo que ocurría en el mercado antes de que se reflejase en las pantallas de los operadores conectados de forma remota. En la era del mercado virtual, pero antes de la eclosión del HFT, la proximidad se medía por la distancia geográfica entre la localización física del servidor del operador y la del *host*. Garvey y Wu (2010) muestran que aquellos operadores cuyo servidor está (geográficamente) más próximo al servidor del mercado no sólo ejecutan sus órdenes más rápidamente, sino que sus costes de ejecución son menores. La proximidad geográfica, por tanto, aumenta las ganancias de negociar. En la era del HFT, los operadores ubican sus servidores físicamente al lado del servidor del mercado, en centros de datos gestionados por éste, y conectados al *host* mediante redes de alta velocidad. Mientras que el HFT *i* que se abona al servicio de colocación del mercado *j* reduce su latencia unos pocos milisegundos, para el mercado *j* la colocación es una fuente de ingresos extra, ya que alquila el espacio físico (*rack space*) para el servidor del HFT *i* (por ejemplo, Bowley, 2011)<sup>10</sup>.

Brogaard *et al.* (2015) ilustran porqué la colocación es importante para el HFT. Analizan una mejora en el servicio de colocación del mercado bursátil sueco (NASDAQ-OMX Stockholm) en 2012. Las empresas que ya estaban suscritas al servicio de colocación tenían la posibilidad de reducir su latencia un 20 % cambiando a un servicio de colocación más rápido, llamado FastColo, a cambio de pagar una cuota más alta. Las empresas que aceptaron la actualización fueron los HFT especializados en crear mercado. El estudio concluye que éstas vieron potenciadas sus habilidades como proveedores de liquidez (*vis-à-vis* otras empresas que no actualizaron). En particular, redujeron sus costes de proveer liquidez y, como resultado, aumentaron su competitividad. Además, trasladaron sus menores costes a sus clientes en forma de menores primas y descuentos por negociar. También aportan evidencia de efectos positivos de la colocación sobre la calidad del mercado, un resultado apoyado por otros estudios y otros mercados (Boehmer, Fong y Wu, 2020; Frino, Mollica y Webb, 2014), incluyendo el español (Chakrabarty *et al.*, 2017).

Un segundo servicio de baja latencia es el acceso directo a fuentes de datos. La venta de datos es una importante fuente de ingresos para las bolsas. En EE. UU., por ejemplo, las diferentes plataformas de negociación deben comunicar en tiempo real sus mejores cotizaciones y sus transacciones a los *listing exchanges*, NYSE y Nasdaq. Sus *Security Information Processors* (SIP) utilizan esta información para generar las cotizaciones consolidadas, conocidas como *Net Best Bid and Offer* (NBBO). Esta información se almacena en la llamada *Consolidated*

<sup>10</sup> En España el servicio de colocación existe desde noviembre de 2012 (Chakrabarty, Moulton y Pascual, 2017).

*Tape*<sup>11</sup>. La Consolidated Tape Association, que pertenece a los propios mercados, vende la información a los *vendors* (Thomson Reuters, Bloomberg, etc.), quienes a su vez la venden a los operadores. La participación de cada bolsa en los ingresos de la venta de datos depende de su contribución al volumen de datos. Las bolsas han encontrado una forma de complementar estos ingresos mediante la venta directa de datos a sus clientes. Por ejemplo, el NYSE ofrece diferentes productos de venta directa, como NYSE Best Quote y NYSE Open Book, al tiempo que el Nasdaq hace lo propio bajo el nombre de Nasdaq ITCH. Si el HFT *i* contrata el acceso directo a los datos del mercado *j*, verá esencialmente la misma información que aquellos que siguen el canal estándar, pero unos pocos milisegundos antes, y pagará más por ello<sup>12</sup>.

Diferencias en la velocidad de acceso a la información pueden resultar en un mayor riesgo para los proveedores de liquidez. En EE. UU., los HFT con acceso directo a las fuentes de datos observan cambios en el NBBO unos pocos milisegundos antes que los proveedores de liquidez con acceso al NBBO del SIP. Por tanto, los primeros podrían arbitrar con esta ventaja para beneficiarse a costa de los segundos. Ding, Hanna y Hendershott (2014) encuentran frecuentes distorsiones entre el NBBO calculado a partir de las fuentes directas de datos y el NBBO del SIP, pero éstas duran 1,5 ms en media y abarcan apenas un 1 % de la duración total de una sesión. Bartlett y McCrary (2019) estiman que los beneficios brutos potenciales por año para el HFT en estrategias de arbitraje basadas en dichas distorsiones serían de unos 156-214 millones de dólares anuales para todo el mercado. Comparados con los beneficios anuales de una sola empresa de HFT (por ejemplo, Virtu Financial generó 700 millones de dólares en 2016) parece una cifra más bien pequeña. Esto sugiere que el HFT paga por este servicio para apoyar otro tipo de estrategias, como la creación de mercado. Hasbrouck (2021) estima que, con una periodicidad de 1 segundo, las cotizaciones del SIP y del flujo directo de datos son igualmente informativas. Sin embargo, con periodicidades de 100  $\mu$ s o menos, las cotizaciones del flujo directo reflejan la nueva información antes de forma sistemática. Por tanto, los HFT que se subscriben a este servicio de baja latencia deberían tener cotizaciones más informativas y estar expuestos a un menor riesgo de selección adversa (Hoffmann, 2014; Hendershott y Riordan, 2013).

Por último, el HFT *i* también puede reducir su latencia contratando los servicios de conectividad de alta velocidad que ofrece el mercado *j*. En las últimas décadas, se han emprendido proyectos a gran escala dirigidos a reducir la latencia en la comunicación entre mercados geográficamente distantes. Estos proyectos consisten en la instalación de redes de microondas de alta velocidad o en el tendido de cables de fibra óptica, incluso submarinos, para transferir datos a gran velocidad entre plataformas. Un ejemplo representativo es el de *Spread Networks of Ridgeland* (Laughlin, Aguirre y Grundfest, 2014; Lewis, 2014)<sup>13</sup>. Se trata

<sup>11</sup> En Europa no existe un registro consolidado similar, pero su creación es parte de los objetivos del 2020 *Capital Markets Union (CMU) Action Plan*, véase <https://finance.ec.europa.eu/capital-markets-union-and-financial-markets/capital-markets-union>

<sup>12</sup> En el Nasdaq, el coste de un servidor colocado que utiliza datos SIP es de unos 7.000 dólares al mes; si utiliza acceso directo a los datos del mercado el coste se triplica.

<sup>13</sup> Otros ejemplos serían EXA-Express y Perseus Telecom.

de un cableado de fibra óptica de más de 1.300 km. que conecta el centro de datos del Chicago Mercantil Exchange (CME) con el del NYSE en New Jersey, que redujo la latencia existente en unos 3 ms (de 16 a 13 ms). Si bien ya existía un cableado similar desde la década de los años 80, éste estaba colocado a lo largo de las vías de tren existentes, con lo que su trazado distaba en unos 322 km. de la distancia en línea recta entre ambos mercados. La empresa tecnológica Spread Networks reparó en la potencial reducción de latencia de una configuración más lineal y en 2010 completó el tendido del nuevo cableado. Las empresas de HFT se pasaron al nuevo cableado, a pesar de ser sensiblemente más caro. Dos años después, sin embargo, el cable original de Spread Networks quedó obsoleto. Las redes de microondas aparecieron como un método más rápido de transmitir la información y sin la necesidad de excavar túneles. Estas nuevas redes redujeron inicialmente la latencia de ida y vuelta entre ambos mercados a 10 ms, y más recientemente a 8 ms.

En la actualidad, los operadores que negocian entre Chicago (derivados) y Nueva York (contado) pueden elegir entre cableado de fibra óptica o red de transmisión por microondas para recibir y enviar información. Si bien las redes de microondas son más rápidas, también son más inestables, ya que se puede interrumpir la comunicación. Episodios de mal tiempo, como intensas lluvias o fuertes nevadas, están entre las causas de dichas alteraciones. Shkillo y Sokolov (2020) estudian caídas en la red de microondas entre Chicago y Nueva York entre 2011 y 2012 debidas al mal tiempo. Durante ese periodo, la red de microondas era accesible solo a un número limitado de empresas de HFT, creando una jerarquía en el mercado en términos de velocidad. Esas empresas de HFT más rápidas se dedicaban, principalmente, al arbitraje de baja latencia. Shkillo y Sokolov encuentran que, durante episodios de mal tiempo, la velocidad de reacción de Nueva York a señales procedentes de Chicago aumenta de media en 2 ms, precisamente la diferencia de velocidad entre la fibra óptica y la red de microondas<sup>14</sup>. Además, los HFT conectados a la red de microondas paran sus algoritmos, ya sea por una disminución en la probabilidad de éxito de sus estrategias de arbitraje o porque se vuelven económicamente inviables.

Quizá el lector se pregunte hasta qué punto diferencias de latencia del orden de unos pocos milisegundos entre las empresas de HFT se pueden traducir en diferencias significativas en términos de competitividad, rentabilidad y cuota de mercado<sup>15</sup>. Esta es la pregunta que un estudio realizado por Baron, Brogaard, Hagströmer y Kirilenko (2019) intenta responder. Utilizando datos del Nasdaq OMX, analizan la competencia en latencia entre las empresas de HFT y sus implicaciones para la estructura de la industria. Sus resultados muestran que los HFT más rápidos generan mayores ingresos por negociar, porque son capaces de capturar un mayor número de oportunidades de beneficio. Como consecuencia, las empresas más rápidas acaparan también gran parte del volumen negociado por la industria del HFT.

<sup>14</sup> Según los autores, la luz cubre la distancia de Chicago a Nueva York en unos 4 ms, la señal de microondas tarda 4,5 ms y la de fibra óptica 6,5 ms.

<sup>15</sup> Por tener una referencia con que comparar, el ser humano requiere en media de 100 ms para parpadear, y unos 180-200 ms para responder a un estímulo visual – véase <https://bionumbers.hms.harvard.edu>

### 3. EL MÉTODO CIENTÍFICO Y LA IDENTIFICACIÓN DEL HFT

¿Cómo se mide empíricamente la actividad del HFT? Cualquier académico interesado en el HFT desearía poder aislar las órdenes y transacciones de estos operadores de las del resto del mercado. Algunos lo consiguen mediante el uso de bases de datos no públicas que identifican la actividad del HFT, ya sea como industria global (por ejemplo, Brogaard, Hendershott y Riordan, 2014, 2019; Kirilenko, Kyle, Samadi y Tuzun, 2017) o por empresa (por ejemplo, Baron, Brogaard, Hagströmer y Kirilenko, 2019; Boehmer, Li y Saar, 2018). Como la gran mayoría de académicos no tiene acceso a estas bases de datos, los anteriores estudios no son replicables, siendo la replicabilidad un aspecto fundamental en la investigación científica. Además, algunas de estas bases de datos (por ejemplo, Nasdaq HFT-data, EUROFIDAI, IIROC) identifican a los HFT mediante medidas indirectas (*proxies*). Estas bases son pues tan fiables como fiables sean las *proxies* utilizadas. Finalmente, cuando los identificadores de HFT son agregados, como suele ser el caso, toda inferencia se hace sobre un HFT genérico mientras que el HFT engloba un conjunto muy heterogéneo de estrategias.

Las bases de datos de alta frecuencia de más fácil acceso (NYSE TAQ, Refinitive's Tick History Data) no proporcionan identificadores de HFT<sup>16</sup>. Algunos estudios recurren a *shocks* exógenos que afectan a la latencia del sistema de negociación como instrumentos para identificar cambios en la actividad del HFT. Intuitivamente, cambios en la actividad agregada del mercado dentro de ventanas de latencia ultracortas como respuesta a un *shock* exógeno deben ser atribuibles mayormente al HFT. Ejemplos de *shocks* exógenos serían una mejora en la tecnología de negociación (Conrad, Wahal y Xiang, 2015), la introducción o mejora en los servicios de colocación (Boehmer, Fong y Wu, 2021), restricciones o suspensiones en la conectividad (Chakrabarty, Jain, Shkilko y Sokolov, 2021), caídas en las redes de comunicación (Shkilko y Sokolov, 2020) o límites intencionados a la latencia (Chakrabarty, Huang y Jain, 2022). La principal limitación de estos estudios es que se basan en eventos (*shocks*) singulares, con lo que la atribución de los resultados al HFT es cuanto menos complicada.

Finalmente, muchos estudios académicos utilizan medidas indirectas para inferir sobre la actividad de los HFT. Estas *proxies* pretenden capturar características en los datos que es más probable que puedan atribuirse a la negociación algorítmica que a la no algorítmica. Hendershott, Jones y Menkveld (2011), por ejemplo, sugieren utilizar el flujo de mensajes de negociación durante un periodo dado (escalado por el volumen negociado) como *proxy* de AT, basándose en la noción de que el HFT es el principal contribuidor a dicho flujo. Un componente importante del flujo de mensajes son las cancelaciones de órdenes. Desde el año 2000, las ratios de cancelaciones sobre transacciones ejecutadas han crecido dramáticamente (Angel, Harris y Spatt, 2015). Este crecimiento es atribuible, en gran medida, a la irrupción del HFT y a la creciente fragmentación del mercado (Khomyn y Putnins, 2021). De hecho, muchos trabajos empíricos reportan tasas de cancelaciones mucho más altas para los HFT

<sup>16</sup> Por datos de alta frecuencia se entiende datos de eventos discretos ordenados en tiempo continuo, sin agregar, como transacciones o cotizaciones.

que para otros operadores (por ejemplo, Friederick y Payne, 2015; Jørgensen, Skjeltorp y Ødegaard, 2018; Malinova, Park y Riordan, 2018).

El **cuadro 1** muestra valores medios de medidas indirectas de HFT calculadas con una periodicidad de 60 segundos para las 50 empresas más negociadas en el National Stock Exchange of India (NSE) en 2015. Las diferentes medidas se calculan con el flujo de órdenes de tres tipos de operadores: los HFT, otra negociación algorítmica (AT en agencia) y negociación no algorítmica (NAT). Puede observarse cómo los HFT introducen un mayor número de mensajes de negociación, así como también cancelaciones y revisiones de órdenes límite, por minuto que los demás agentes. Las diferencias son especialmente notables cuando comparamos con los operadores no algorítmicos.

Algunas voces consideran las elevadas tasas de cancelaciones de órdenes excesivas, el síntoma de una disfuncionalidad (SEC, 2010), incluso el reflejo de posibles prácticas fraudulentas (*quote stuffing, spoofing*, etc.) por parte del HFT (Eggington, Van Ness y Van Ness, 2016). Sin embargo, la literatura existente, como veremos, sugiere que éstas pueden generarse de forma natural por actividad de los HFMM que no es ni ilícita ni dañina como, por ejemplo, respuestas ultrarrápidas a señales informativas generadas por el mercado (Brolley y Malinova, 2021; Kwan, Philip y Shkilko, 2022), gestión del riesgo de selección adversa (Jovanovic y Menkveld, 2016; Bhattacharya y Saar, 2021) y competencia para obtener prioridad de ejecución (Hasbrouck, 2018). Además, los HFMM replican sus posiciones en múl-

### Cuadro 1.

#### Medidas indirectas de actividad del HFT

Proxy	HFT	Otro AT		NAT	
Mensajes	654,08	204,12	***	55,76	***
Cancelaciones y revisiones	293,18	61,62	***	6,87	***
Órdenes fugaces	82,24	26,89	***	6,46	***
<i>Quote flickering</i>	137,91	88,84	***	36,72	***
Respuestas ultrarrápidas	38,27	11,93	***	0,55	***
Carreras estratégicas	10,49	0,51	***	0,02	***

Este cuadro proporciona valores medios de medidas indirectas (*proxies*) de actividad del HFT, calculadas sobre intervalos regulares de 60 segundos. Promediamos los valores, primero, por activo y, después, en sección cruzada. Utilizamos datos de los constituyentes del NYFTY-50, índice representativo del National Stock Exchange of India (NSE), durante el periodo mayo-julio de 2015. Distinguimos tres tipos de operadores: HFT, otros AT, y negociación no algorítmica (NAT). Las *proxies* son: (1) el número de mensajes de negociación introducidos relativamente cerca (<10 ticks) de las mejores cotizaciones; (2) el número de cancelaciones o revisiones de órdenes limitadas, siempre que éstas órdenes se encuentren relativamente cerca de las mejores cotizaciones; (3) el número de órdenes fugaces, esto es, canceladas menos de 100 ms después de haberse introducido; (4) *quote flickering*, medido como el número de cambios en las mejores cotizaciones; (5) el número de primeras respuestas a cambios en las mejores cotizaciones que se producen en menos de 100 ms; (6) el número de carreras estratégicas (Hasbrouck y Saar, 2013) con una longitud mínima de 10 mensajes ligados. \*\*\* indica diferente al valor para el HFT al 1% de significatividad estadística.

tiples plataformas a la vez (Menkveld, 2013; van Kervel, 2015), por lo que cualquier decisión de cancelación/revisión en un mercado puede implicar cambios simultáneos de órdenes en múltiples mercados.

Al examinar el libro de órdenes de Island, una plataforma de negociación electrónica posteriormente incorporada al Nasdaq, Hasbrouck y Saar (2009) encuentran que alrededor del 25 % de las órdenes límite introducidas son canceladas en menos de dos segundos. Llamaron a estas órdenes “fugaces” (*fleeting*). Aunque no asocian las órdenes fugaces al HFT directamente, sí las ligan al progreso tecnológico. Con el tiempo, el uso de órdenes fugaces no ha hecho más que aumentar. Según la SEC (SEC, 2014), en EE. UU. el 90 % de las órdenes límite se cancelan dentro del segundo posterior a su entrada en el sistema. El **cuadro 1** muestra cómo el uso de órdenes fugaces (en este caso, órdenes canceladas o revisadas en menos de 100 ms) no es exclusivo del HFT, pero sí son sus usuarios más activos. Así, la frecuencia en el uso de órdenes fugaces es una medida indirecta de la actividad del HFT (Cartea *et al.*, 2019).

Hasbrouck y Saar (2013) sugieren capturar estrategias dinámicas de baja latencia basadas en órdenes limitadas, atribuibles a los algoritmos del HFT, mediante lo que ellos denominan “carrera estratégica” (*Strategic Run*), en adelante *SRun*. Una *SRun* empieza con la entrada en el sistema de una orden límite que es cancelada sin ser ejecutada. Dicha cancelación se liga con una nueva orden de igual signo (compra o venta) y tamaño, siempre y cuando ésta última haya entrado en el sistema menos de 100 ms después. La *SRun* sigue adelante ligando cancelaciones y nuevas órdenes, y termina cuando la última orden ligada es ejecutada o cancelada y no hay posibilidad de ligarla a una nueva orden. Esta medida ha sido utilizada en diversos estudios empíricos (por ejemplo, Bartlett y McCrary, 2019; Chordia y Miao, 2020). En el **cuadro 1** podemos observar que los HFT del NSE generan la gran mayoría de las *SRuns*.

Otra característica diferenciadora del HFT es su capacidad de responder rápidamente a cualquier señal procedente del mercado, por ejemplo, cambios en el libro (Kwan *et al.*, 2022), o cambios en otros mercados, por ejemplo, derivados (Brogaard, Hendershott y Riordan, 2014). Cabe esperar que mayor competencia entre empresas de HFT se traduzca en mayor velocidad de respuesta a cualquier señal informativa. Así, diferentes estudios utilizan la velocidad de respuesta como medida indirecta de HFT (por ejemplo, Chakrabarty, Jain, Shkilko y Sokolov, 2021). El **cuadro 1** muestra que los HFT del NSE son los más rápidos en responder a cambios en las mejores cotizaciones del mercado.

Para poder construir las *proxies* de HFT anteriores se requiere de información detallada sobre el flujo de órdenes, orden por orden. Las bases de datos públicas no suelen proporcionar dicho nivel de detalle. No obstante, encontramos en la literatura medidas que pueden calcularse a partir de información disponible, por ejemplo, en la NYSE-TAQ. Estas *proxies* miden un fenómeno conocido como *quote flickering*, esto es, cambios rápidos y frecuentes en las mejores cotizaciones del mercado, cuya creciente intensidad se atribuye al HFT. Conrad, Wahal y Xiang (2015) miden la intensidad del HFT a través del *high-frequency quoting* (HFQ), que no es más que el número de cambios en las mejores cotizaciones en un intervalo de

tiempo, ya sea por variaciones del mejor precio de compra (*bid*) o venta (*ask*) o por variaciones en el volumen (profundidad) ofrecido a dichos precios. El **cuadro 1** muestra cómo el HFQ es mayor para los HFT que para el resto de los operadores. Como alternativa, Hasbrouck (2018) mide *quote flickering* como la desviación típica de las cotizaciones (en niveles) en horizontes de unos pocos milisegundos.

Chakrabarty, Comerton-Forde y Pascual (2022) estudian la fiabilidad y precisión de las medidas indirectas de HFT. Encuentran que todas estas medidas están altamente correlacionadas entre sí y que señalizan correctamente variaciones en la actividad real de los HFT. No obstante, algunas medidas destacan por encima de las demás. *SRun* de Hasbrouck y Saar (2013) es la medida que mejor aísla la actividad del HFT de la actividad de otros tipos de operadores. Las medidas basadas en la velocidad de respuesta son más efectivas a la hora de identificar periodos/activos con mayor contribución del HFT a la provisión de liquidez. Asimismo, una mayor presencia de órdenes límite con la condición especial *immediate-or-cancel* (*IOC*) destaca a la hora de identificar periodos/activos con una mayor contribución del HFT a la demanda de liquidez.

#### 4. LA DIVERSIDAD DEL HFT

¿Qué hacen exactamente los HFT? ¿Qué tipo de estrategias implementan? Los algoritmos de las empresas de HFT no son públicos. Por tanto, los académicos tienen que inferir, a partir de los datos disponibles, cuáles son las estrategias más comunes entre las empresas de HFT. Un ejemplo ilustrativo es el trabajo de Boehmer, Li y Saar (2018). Estos autores estudian la diferenciación de producto y la competencia en el sector del HFT, donde *producto* significa estrategia de negociación. Según la teoría de la organización industrial, cuanto más similares son los productos de las empresas de un sector, más competitivo es el entorno. Esta idea es también aplicable al caso del HFT: dos empresas de HFT que apliquen la misma estrategia responderán a los mismos estímulos y buscarán explotar las mismas oportunidades de beneficio. Por tanto, cuanto más similares sean las estrategias de las empresas de HFT, más competitivo será el sector.

Boehmer *et al.* (2018) disponen del tráfico de mensajes de las empresas de HFT en el Toronto Stock Exchange, que refleja el resultado de la actividad de los algoritmos que cada empresa utiliza para implementar sus estrategias. Se espera que cada estrategia cree un perfil único de mensajes, que deje huellas propias en los datos. Si esa estrategia es común a muchas empresas de HFT, esas huellas se repetirán en los mensajes de todas ellas, generando patrones comunes. Utilizando técnicas estadísticas, identifican tres productos diferenciados que explican el 96 % de los mensajes y el 79 % del volumen negociado del HFT que, por orden de relevancia, serían: creación de mercado (*i.e.*, provisión de liquidez), arbitraje y especulación direccional. Las dos últimas se engloban en lo que se conoce como *negociación oportunista*.

El estudio de Boehmer *et al.* (2018) revela, en primer lugar, una clara heterogeneidad de productos en el sector. Además, muestra que se trata de una industria altamente competitiva,

ya que las empresas de HFT tienen productos muy similares. Por último, si bien otras estrategias son posibles, no serían representativas de lo que hace el HFT<sup>17</sup>.

#### 4.1. Creación de mercado

Muchos HFT son creadores de mercado (CM), esto es, operadores especializados en el negocio de proporcionar liquidez. Un CM proporciona liquidez voluntariamente. Para ello, publica precios a los que está dispuesto a comprar (*bid*) y vender (*ask*) un número limitado de títulos del correspondiente activo, de tal forma que el  $ask > bid$ . El CM genera un beneficio al realizar el diferencial *ask-bid* muchas veces a lo largo de la sesión y para múltiples activos. Este diferencial se conoce como horquilla o *spread*, y puede entenderse como la suma de una prima (sobre el valor de consenso) que el CM demanda a cualquier tomador que desee comprar el activo y un descuento que el CM solicita a cualquier tomador que desee vender el activo. Estas primas y descuentos aumentan con el riesgo y los costes que soporta el CM (O'Hara, 1995).

Para establecer su *spread*, el CM introduce órdenes que no demandan ejecución inmediata, especificando el precio límite al que está dispuesto a comprar y vender, así como la cantidad máxima que se ofrece a negociar. Ese tipo de orden se llama *límite*. Una orden límite demanda ejecución al mejor precio disponible, siempre que dicho precio no sea peor que el precio límite especificado. Por ejemplo, la orden “comprar 100 acciones de TEF a €3,35” indica que el operador está dispuesto a comprar 100 acciones de Telefónica siempre y cuando el precio sea igual o inferior a 3,35 euros/acción. Para que esta orden se ejecute automáticamente debería haber en el mercado otro operador que hubiera manifestado antes su interés de vender a 3,35 euros o menos. Si tal contrapartida no existe, la orden se almacena en el libro de órdenes a un precio *bid* de 3,35 euros. En ese instante se convierte en fuente de liquidez.

El uso de órdenes límite implica riesgos o costes que son inherentes a la actividad del CM. Supongamos que nuestro CM tiene su orden de TEF almacenada en el libro cuando llegan al mercado malas noticias que empujan el precio de consenso de TEF por debajo de 3,35 euros. En ese instante, la orden del CM está *en dinero* al ser una opción de venta a un precio por encima del valor de consenso. Si el CM no cancela su orden rápidamente se expone al riesgo de que otro operador la tome y se ejecute en pérdidas. En un escenario alternativo, pero de consecuencias similares, la orden del CM es tomada por un operador con acceso a información privada que, de hacerse pública, movería el valor de consenso por debajo de los 3,35 euros. Si el CM no deshace su recién adquirida posición (*i.e.*, vende las acciones de TEF) antes de que eso ocurra, incurriría en una pérdida. El riesgo de que una orden límite se ejecute en dinero se conoce como *riesgo de selección adversa*, y los costes asociados se conocen como *costes de selección adversa*. Un mayor riesgo de asimetrías de información aumenta el riesgo de selección adversa y, por tanto, las horquillas demandadas por los CM.

<sup>17</sup> Por ejemplo, el HFT ha sido acusado de incurrir en prácticas manipulativas (véase Egginton *et al.*, 2016).

El ejemplo anterior ilustra que una orden límite almacenada en el libro es una opción de compra (CALL) o venta (PUT) que el CM ofrece al resto del mercado. Como tal, toda orden límite tiene valor, creciente con la probabilidad de que pueda entrar en dinero en algún momento. Mayor valor como opción implica mayor riesgo de selección adversa. De la teoría sobre opciones financieras (por ejemplo, Hull, 2021) sabemos que el valor de un contrato de opción aumenta con factores como la volatilidad del subyacente o el precio de ejercicio (*strike*). Igualmente, el valor de una orden límite aumenta con la volatilidad del activo debida a nueva información. El *strike* de una orden límite es el precio límite especificado. Cuanto más agresivo sea el CM a la hora de fijar el *strike* (i.e., más cerca del mejor *ask* o del mejor *bid* del libro), mayor su riesgo. Cuando una opción se puede ejercer en cualquier momento (*americana*), su valor aumenta con el tiempo que esté disponible. De forma similar, mantener una orden límite mucho tiempo en el libro aumenta el riesgo de que se ejecute en dinero. Finalmente, el beneficio potencial del tomador que ejecuta una orden límite en dinero aumenta con su tamaño. Por tanto, órdenes grandes tienen mayor valor y acarrear un riesgo más alto.

Un CM puede gestionar los riesgos ligados a la llegada de nueva información reduciendo el valor de sus órdenes límite. Para ello, puede usar órdenes poco agresivas, de pequeño tamaño, evitar los picos de volatilidad, y dejarlas en el libro por periodos cortos de tiempo. No obstante, esta estrategia pasiva podría dañar significativamente sus beneficios al aumentar la probabilidad de no ejecución y reducir su competitividad.

Los operadores profesionales gestionan el riesgo de sus órdenes límite realizando una intensa actividad de seguimiento y evaluación del flujo continuo de información que emana del (o llega al) mercado, revisando y cancelando sus órdenes en el libro cuando perciben una mayor exposición. Esta actividad se conoce como supervisión (*monitoring*). Altas tasas de cancelaciones y revisiones de órdenes pueden sugerir, por tanto, gestión activa del riesgo por parte de los CM (por ejemplo, Liu, 2009). El seguimiento de órdenes tiene un coste, en forma de tiempo y recursos destinados a la misma. En consecuencia, el CM se enfrenta a un tira y afloja entre costes de seguimiento y riesgo. Si los costes de seguimiento son bajos, el CM supervisará activamente sus órdenes; si son altos, es más probable que opte por una estrategia de gestión del riesgo pasiva, asumiendo un mayor riesgo de no negociar. Los HFT confían en algoritmos para realizar la actividad de supervisión de órdenes, por lo que sus costes de supervisión son relativamente bajos. No es sorprendente, pues, que los HFT sean los operadores que más contribuyen al número total de revisiones y cancelaciones de órdenes en los mercados actuales (por ejemplo, Khomyn y Putnins, 2021; Abad *et al.*, 2022).

La teoría existente (por ejemplo, Hoffmann, 2014; Bogaerts y Van Achter, 2021) predice que la combinación de alta velocidad de reacción e intensiva supervisión de órdenes permite a los HFT gestionar el riesgo de selección adversa mejor que otros CM. La evidencia empírica apoya esta predicción. Por ejemplo, Hendershott y Riordan (2013) encuentran que los HFT que operan en el Deutsche Börse Xetra son más propensos a cancelar órdenes límite (reacción) que están en dirección opuesta a cambios recientes en precios del mercado de futuros (señal informativa). Asimismo, Subrahmanyam y Zheng (2014) encuentran que los HFT del Nasdaq cancelan órdenes en anticipación a movimientos opuestos del precio a corto plazo.

Estos estudios sugieren que es menos probable que las órdenes límite de los HFT se ejecuten en dinero que las de otros CM. En este sentido, Brogaard *et al.* (2015) muestran que las empresas de HFT que contrataron el servicio FastColo del Nasdaq OMX experimentaron una reducción significativa en su riesgo de selección adversa vis-à-vis empresas que no lo hicieron. Podemos concluir, por tanto, que los HFT gozan de una exposición al riesgo de selección adversa menor que otros proveedores de liquidez.

Junto con la supervisión de órdenes, un CM puede reducir el valor de sus órdenes límite utilizando órdenes de volumen oculto (por ejemplo, Bessembinder, Panayides y Venkataraman, 2009; Pardo y Pascual, 2012). Éstas permiten ocultar, total o parcialmente, el tamaño de órdenes límite en mercados que, por lo demás, son transparentes. Intuitivamente, al ocultar la orden el CM reduce su valor como opción. Chakrabarty, Hendershott, Nawn y Pascual (2022) muestran que los HFT usan órdenes de volumen oculto, si bien en menor grado que otros operadores.

Cuando los tomadores de liquidez que compran y los que venden no llegan al mercado con la misma intensidad se producen desequilibrios en el flujo de órdenes, que deben ser absorbidos por los CM. Como resultado, los CM se ven forzados a mantener posiciones abiertas probablemente no deseadas en dichos activos durante cierto tiempo. Si la posición es larga, el CM se expone al riesgo de una caída de precios; si es corta, el CM se expone al riesgo de una subida de precios. Es decir, el CM está expuesto a fluctuaciones adversas de los precios, y este riesgo persiste hasta que revierte su inventario. Si nuestro CM es averso al riesgo, trasladará este riesgo de gestión de inventario a sus clientes en forma de mayores *spreads* (Ho y Stoll, 1983).

La teoría y la evidencia empírica existentes confirman que el HFT explota su mayor velocidad, la supervisión intensiva de órdenes y la fragmentación del mercado para gestionar mejor su riesgo de inventario. Por ejemplo, Ait-Sahalia y Saglam (2017) desarrollan un modelo teórico en el que los HFT interpretan mejor las señales del mercado, lo que mejora su capacidad para predecir la dirección del flujo de órdenes entrante. Poder anticipar mejor los desequilibrios entre órdenes de compra y venta a corto plazo les permite gestionar mejor su riesgo de inventario, lo que se traduce en cotizaciones más agresivas (*spreads* más estrechos) y en poder soportar rangos de inventario más amplios. Hirschey (2021) aporta apoyo empírico a la premisa del modelo al mostrar que, de hecho, los HFT pueden anticipar la dirección del flujo de órdenes de otros operadores. Los HFT pueden utilizar su capacidad de anticipación para actualizar de forma óptima sus cotizaciones y así gestionar mejor su riesgo de inventario. Por otro lado, Brogaard *et al.* (2015) muestran que los HFMM que suscribieron el servicio FastColo del Nasdaq OMX redujeron la frecuencia de reversión de su inventario a cero, lo que sugiere una menor exposición al riesgo de inventario, al tiempo que aumentaron su presencia en las mejores cotizaciones, lo que refleja horquillas más estrechas debido a sus menores costes de inventario.

En un entorno de negociación fragmentado pueden producirse desajustes en el espacio entre compradores y vendedores de un mismo valor. Por ejemplo, un inversor institucional envía una gran orden de compra de TEF a la Bolsa de Madrid, mientras otro introduce una

gran orden de venta de TEF en el mercado alternativo Cboe. Un HFMM que opere en ambas plataformas puede, por ejemplo, ofrecerse a comprar TEF en Cboe a, digamos, 3,3 euros la acción, para inmediatamente después revender los títulos en Bolsa de Madrid a 3,31 euros. Este ejemplo ilustra que la capacidad de negociar rápidamente entre plataformas permite al CM reducir el tiempo durante el cual su inventario está en riesgo. Menkveld (2013) aporta evidencia empírica de esta estrategia multiplataforma.

Además de mejorar sus habilidades de gestión de riesgos, la teoría (Foucault, Kadan y Kandel, 2013) sugiere que los HFT aprovechan su mayor velocidad e intensidad de supervisión para explotar oportunidades de obtener beneficios anormales en la provisión de liquidez. En el ejemplo de las acciones de TEF, suponga que una orden de venta agresiva de gran tamaño toma toda la liquidez disponible a las mejores cotizaciones *bid* del libro de TEF en Cboe. Como resultado, el diferencial entre el mejor *ask* y el mejor *bid* para TEF en Cboe es ahora inusualmente grande (digamos 0,05 euros cuando lo normal es 0,01 euros). Esto genera una oportunidad de obtener un beneficio anormal en la creación de mercado de TEF. Los CM que quieran explotar esa oportunidad deben introducir una orden límite dentro del *spread* actual de Cboe. Aquel que responda más rápidamente, adquirirá prioridad de tiempo a la nueva mejor cotización sobre el resto y, por tanto, tendrá más oportunidades de realizar este *spread* anormal. En esta línea, Hendershott y Riordan (2013) muestran que los HFT en Xetra proporcionan liquidez cuando los diferenciales son inusualmente amplios (cuando proveer liquidez está mejor pagado) y demandan liquidez cuando los diferenciales son estrechos (cuando tomar liquidez es más barato).

Todo lo anterior sugiere que el uso de tecnología de negociación de baja latencia, junto con una gestión activa del riesgo, potencia las habilidades de los HFT como CM. En el **cuadro 2** se estima la *horquilla efectiva* exigida por los CM para los activos constituyentes del NIFTY50 en 2013. Si el tomador es un agente informado cabría esperar que tras la transacción los precios se moviesen para reflejar la nueva información. Si el tomador compra (vende) la señal será positiva (negativa), por lo que cabe esperar que el punto medio se ajuste al alza (baja). En ambos casos el precio se mueve en contra de la posición recién adquirida por el CM. El ajuste en precios tras una transacción se denomina *impacto en precios*. Si éste no es cero, la *horquilla realizada* por el CM será menor que la horquilla efectiva. La horquilla realizada es pues la diferencia entre la horquilla efectiva y el impacto en precios, y mide el beneficio del CM neto de costes de selección adversa.

Por ejemplo, supongamos que la horquilla de TEF es 3,45 euros (*ask*) y 3,43 euros (*bid*). Un agente informado introduce una orden agresiva de compra que se ejecuta a 3,45 euros. Tras la transacción, las cotizaciones se ajustan al alza para reflejar la señal positiva sobre el valor del activo (compra). La nueva horquilla de TEF es 3,47 euros (*ask*) y 3,45 euros (*bid*). El punto medio antes de la transacción es  $(3,45+3,43)/2 = 3,44$  euros, y tras la transacción es  $(3,47+3,45)/2 = 3,46$  euros. Por tanto, se ha producido un impacto en precios de 0,02 euros. La prima inicialmente demandada por el CM es  $3,45-3,44 = 0,01$  euros. Sin embargo, la realizada es de  $3,45-3,46 = -0,01$  euros. Es decir, el CM pierde al negociar con un agente informado (coste de selección adversa).

El cuadro 2 distingue tres tipos de proveedores de liquidez: HFT, AT de agencia y no AT.

## Cuadro 2.

### HFT y los costes de crear mercado

<i>Operador</i>	<i>Efectiva</i>	<i>Realizada</i>		<i>Impacto</i>	
HFT	6,68	4,88		1,08	
Otro AT	5,32	2,29	***	2,40	***
NAT	5,14	3,02	***	2,12	***

Este cuadro muestra estadísticos medios diarios de horquilla efectiva, horquilla realizada e impacto en precios para los 50 activos más líquidos del National Stock Exchange of India (NSE) en 2015. Las transacciones se clasifican en función de qué tipo de operador proporciona liquidez: HFT, otros AT, y no AT (NAT). Para una transacción en el momento  $t$ , la horquilla efectiva se calcula como la diferencia entre el precio de la transacción  $p_t$  y el punto medio del libro en el momento de que esa transacción se produce  $q_t$ , multiplicado por el signo de la transacción  $x_t$  – si es una compra,  $x_t = 1$ , si es una venta  $x_t = -1$ . La horquilla realizada se calcula de forma equivalente, pero utilizando el punto medio al menos 60 segundos después,  $t+60$ . El impacto en precios es la diferencia entre el punto medio en  $t+60$  y el punto medio en  $t$ , multiplicado por el signo de la transacción. \*\*\* indica diferente al valor para el HFT al 1% de significatividad estadística.

Los HFT del NSE muestran horquillas efectivas medias más altas, en línea con las predicciones teóricas (Foucault *et al.*, 2013) y la evidencia empírica (Hendershott y Riordan, 2013) que sugiere que los HFT reaccionan agresivamente ante disminuciones transitorias en liquidez. Además, la horquilla realizada media de los HFT, que mide los beneficios medios del CM por operación, es mucho mayor para los HFMM, lo que indica unas pérdidas menores frente a agentes informados (menor riesgo de selección adversa). En consonancia con esta interpretación, las órdenes agresivas a las que los HFT proporcionan liquidez tienen un impacto medio menor en los precios, lo que significa que los HFMM experimentan movimientos adversos en precios con menor frecuencia.

Si los HFT operan con unos costes de creación de mercado menores y, además, la industria del HFT es altamente competitiva, tal y como sugiere el estudio de Boehmer *et al.* (2018), deberíamos esperar que los HFMM trasladen sus menores costes de operar a sus clientes en forma de márgenes más ajustados. En este sentido, Hendershott y Riordan (2013) muestran que, en *Xetra*, la negociación algorítmica ofrece las mejores cotizaciones del mercado más a menudo que la no algorítmica. Además, Subrahmanyam y Zheng (2014) encuentran que en el Nasdaq los HFT colocan el 78 % de sus órdenes límite en los tres primeros niveles del libro. La velocidad relativa constituye, por tanto, una ventaja competitiva en la creación de mercado.

## 4.2. Arbitraje de baja latencia

Por arbitraje de baja latencia se entiende explotar oportunidades de arbitraje de muy corta duración entre mercados para el mismo activo o entre activos relacionados<sup>18</sup>. Supongamos un algoritmo de negociación que busca aprovechar las oportunidades de arbitraje entre el ETF SPY, un fondo sobre el S&P500 negociado en el NYSE, y el contrato de futuros E-mini (ES), también sobre el S&P500, negociado en el CME. Dado que tienen el mismo subyacente, los precios de estos activos deberían moverse al unísono. Como en cualquier estrategia de arbitraje, el algoritmo hará un seguimiento de los precios de ambos valores a lo largo del tiempo tratando de captar desviaciones significativas. Si, por ejemplo, el precio de SPY es alto en relación con el precio de ES, el algoritmo enviará inmediatamente órdenes de mercado al CME para comprar ES y órdenes de mercado al NYSE para vender SPY. Nuestro algoritmo se enfrenta a otros algoritmos similares que intentan explotar la misma oportunidad de arbitraje. La latencia relativa de cada arbitrajista va a ser, por tanto, fundamental para determinar cuántas oportunidades de arbitraje explotará cada algoritmo (Baron *et al.*, 2018).

Budish, Crampton y Shim (2015) observan que la correlación entre las series de puntos medios del SPY y ES es prácticamente uno para frecuencias bajas, pero dicha correlación se rompe para frecuencias altas. Por ejemplo, para una frecuencia de 10 (1) ms la correlación es de sólo 0,1016 (0,0080). Esta ruptura de las correlaciones a frecuencias suficientemente altas conlleva la existencia de oportunidades de arbitraje simples, mecánicas, de ultracorta duración, que están disponibles para quienes sean lo suficientemente rápidos para explotarlas. Dada la arquitectura actual de los mercados financieros, este resultado es esperable. SPY y ES se negocian de forma continua, simultáneamente, pero cada uno en su propio mercado electrónico, con su propio libro de órdenes, totalmente por separado. Nada garantiza, por tanto, que los precios de SPY y ES se muevan al mismo tiempo en frecuencias tan altas.

Budish *et al.* (2015) también obtienen que la correlación entre el SPY y ES en frecuencias altas ha aumentado entre 2005 y 2011. Así, para una frecuencia de 100 ms, la correlación entre el SPY y ES, cercana a cero en 2005, aumentó hasta casi 0,5 en 2011. Esta tendencia creciente refleja el impacto del HFT y su competencia en latencia. Las correlaciones han aumentado porque el mercado se ha vuelto más rápido y, por ende, las distorsiones en precios se corrigen cada vez más rápido. Aun así, si la frecuencia es lo suficientemente alta, las correlaciones entre el SPY y ES son esencialmente nulas. Como consecuencia de lo anterior, la duración media de las oportunidades de arbitraje entre SPY y ES se ha reducido con el tiempo, de una mediana de 97 ms en 2005 a 7 ms en 2011. Esto significa que la competencia en latencia entre las empresas de HFT ha ido subiendo el listón de cuán rápido hay que ser para poder captar las oportunidades de arbitraje. Los beneficios en juego, sin embargo, se han mantenido estables a lo largo del tiempo y se estiman en 75 millones de dólares por año.

<sup>18</sup> En finanzas, el arbitraje consiste en la compra y venta simultánea de un mismo activo en diferentes mercados con el fin de beneficiarse de pequeñas diferencias en el precio. El arbitraje también puede implicar instrumentos financieros diferentes pero cuyos precios están teóricamente (derivados y subyacentes) o estadísticamente (por ejemplo, acciones de Coca Cola y Pepsi) ligados.

El caso de SPY y ES sólo es un ejemplo de instrumentos financieros entre los que se puede hacer arbitraje de baja latencia. Hay cientos de pares de instrumentos cuyos precios están altamente correlacionados y son suficientemente líquidos como para generar beneficios significativos.

Además, actualmente el mismo activo negocia en múltiples plataformas a la vez. Así podemos arbitrar entre el SPY en el NYSE y el Nasdaq, en acciones de TEF en Bolsa de Madrid y en Cboe, etc. Tenemos también el arbitraje estadístico, que se realiza entre acciones de empresas diferentes, pero altamente ligadas (Apple y Google, Exxon-Mobil y Chevron, Lowe's y Home Depot, etc). El fenómeno de ruptura de correlación a altas frecuencias que Budish *et al.* (2015) observan entre SPY y ES se da también entre todos estos pares de activos.

En otro ejemplo de arbitraje de baja latencia, Aquilina, Budish y O'Neil (2022) estudian conjuntamente aquellas estrategias que implican reaccionar rápidamente a señales del mercado para tomar órdenes límite que estén en dinero. Supongamos una señal informativa tras la cual un HFMM se apresura a cancelar o revisar cotizaciones obsoletas (sus órdenes límite en dinero), mientras que un HFB se lanza rápidamente a explotar oportunidades de arbitraje, generando una *carrera de velocidad* entre ambos. El HFMM perderá la carrera si su mensaje de cancelación o revisión llega después que la orden haya sido tomada por el HFB, mientras que este último será el perdedor si su orden llega después de que el HFMM haya retirado la orden en dinero del libro u otro HFB más rápido haya tomado ya la orden. El perdedor recibirá un mensaje del mercado de "fallido", indicando que su instrucción no ha podido ejecutarse. En cambio, el ganador recibirá un mensaje de aceptación.

Aquilina *et al.* (2022) tienen acceso a una base de datos única del London Stock Exchange (LSE) que contiene información sobre todos los mensajes entrantes y salientes enviados al/por el sistema, incluyendo los fallidos. Con ella identifican todas las carreras de velocidad para los activos constituyentes del FTSE100 entre agosto y octubre del 2015. Los resultados de su análisis muestran que estas carreras de velocidad son frecuentes (537 carreras por activo/día; 1 carrera por activo/minuto, aprox.), ultrarrápidas (la velocidad de respuesta del ganador supera a la del perdedor más rápido en sólo 5-10  $\mu$ s) e importantes (representan el 22 % del volumen medio diario). En su mayoría, estas carreras las ganan las empresas de HFT que son relativamente más rápidas – el top 3 (6) gana el 55 % (82 %) de las carreras. Si bien los beneficios por carrera son relativamente pequeños (2 libras en media), el beneficio total en juego estaría en torno a los 60 millones de libras por año sólo en el mercado británico. Extrapolando al mercado bursátil global estiman un montante de 5.000 millones de dólares anuales. La cuantía aumentaría si se incluyeran otros activos que también negocian en mercados electrónicos, como futuros, divisas, deuda pública, etcétera.

### 4.3. Negociación direccional

La negociación o especulación direccional consiste en hacer apuestas basadas en previsiones de cambios en los precios a corto plazo (*i.e.*, comprar en previsión de una subida,

vender en previsión de una bajada). El HFT utiliza su superior capacidad y velocidad para procesar (y reaccionar a) la información del mercado rápidamente e intentar predecir movimientos en precios a muy corto plazo. Para establecer sus posiciones especulativas, los algoritmos de los HFT negocian de forma agresiva, demandando liquidez.

Considere un algoritmo de HFT que utiliza cambios de precio en un contrato de futuro sobre un índice bursátil como señales para anticipar cambios de precio en los componentes del índice. Si el precio del futuro aumenta, el algoritmo compra agresivamente los constituyentes que están más correlacionados con el índice. La latencia del HFT es fundamental, ya que éste debe actuar antes de que los precios de contado se ajusten a la señal. Así, Hendershott y Riordan (2013) muestran que los HFT del Xetra son más propensos que otros tipos de operadores a comprar (vender) tras rendimientos positivos (negativos) en los últimos 30 segundos en contratos de futuro sobre el índice bursátil de referencia.

Otro ejemplo sería un algoritmo de HFT que utilice información en tiempo real sobre la actividad del mercado para predecir negociación persistente y potencialmente informada, con el fin de anticiparse a la misma y beneficiarse después de su impacto en precios. En este ejemplo, el HFT hace *free-riding* de la adquisición de información valiosa por parte de otros operadores. Hirschey (2020) estudia la negociación anticipativa por el HFT en el Nasdaq. Muestra que los algoritmos que trabajan las órdenes de los agentes informados trocean la orden matriz (grande) en múltiples órdenes pequeñas que luego ejecutan a lo largo del tiempo (*order splitting*), dejando un rastro que los algoritmos de HFT pueden seguir. Este rastro tiene forma de niveles anormalmente altos en la autocorrelación de la serie del volumen neto (*i.e.*, volumen comprado menos vendido). La capacidad de anticipación del HFT es mayor en el caso de empresas pequeñas, lo que sugiere que los algoritmos en agencia tienen más difícil ocultar su rastro a los HFT cuando operan en activos poco líquidos. Hirschey muestra también que el diferencial entre la rentabilidad de aquellos activos que el HFT compra y aquellos que vende agresivamente es estrictamente positivo, sugiriendo que los HFT detectan negociación informada y, con ello, logran prever cambios permanentes en los precios.

Esta actividad de *free-riding* no es inocua para los intereses de los agentes informados, ya que crea competencia en la explotación de la información. De hecho, Hirschey (2020) muestra que la competencia del HFT aumenta los costes de ejecución de los agentes informados, en forma de un mayor impacto en precios. Para evitar ser detectados los agentes informados deberían negociar de forma menos agresiva. De hecho, Hirschey encuentra que cuando son agresivos, su flujo de órdenes futuro se vuelve más predecible y la competencia por parte del HFT se intensifica. No obstante, negociar de forma menos agresiva, espaciando más la ejecución de la orden en el tiempo, aumentaría el tiempo necesario para poder ejecutar un cambio de posición grande.

Van Kervel y Menkveld (2019) estudian el comportamiento de los HFMM cuando interactúan con órdenes grandes de inversores institucionales. El estudio muestra que, inicialmente, los HFT proporcionan liquidez a las órdenes institucionales, cumpliendo con su papel de CM. Sin embargo, cuando concluyen que están negociando contra órdenes con contenido

informativo, cambian de dirección y empiezan a competir con los institucionales. Denominan a esta estrategia *back-running*. El proceso de aprendizaje es lento, varias horas en media, por lo que sólo acaban compitiendo con las órdenes más grandes o que tardan más tiempo en ejecutarse completamente. Aun así, el proceso es más rápido cuando la orden grande es de venta, ya que los institucionales son más agresivos cuando venden, aumentando la probabilidad de ser detectados. Es posible también que los inversores institucionales estén mejor informados sobre acciones que ya poseen que sobre las que no poseen y que, por tanto, sus órdenes de venta sean más informativas que sus órdenes de compra. Así, el algoritmo del HFT podría estar programado para iniciar el *back-running* mucho antes sobre una orden institucional de venta que sobre una de compra. Al igual que el trabajo de Hirschey (2020), van Kern and Menkveld (2019) muestran que estos algoritmos de HFT de detección de patrones generan una externalidad negativa en los agentes informados en forma de mayores costes de ejecución.

Un último ejemplo de negociación direccional sería la reacción a información pública (*news-reaction strategy*). El HFT oportunista explota su velocidad para negociar con el contenido informativo de una señal pública en los instantes posteriores al anuncio y antes de que los precios completen su ajuste. Diversos trabajos empíricos aportan evidencia de esta estrategia, ya sea sobre anuncios macroeconómicos (Brogaard *et al.*, 2014) o corporativos (Chordia y Miao, 2019). Scholtus, van Dijk y Frijns (2014) estiman que un retraso de más de 300 ms en reaccionar a un anuncio público reduce la rentabilidad de esta estrategia significativamente.

El **cuadro 3** proporciona un resumen de las principales ideas desarrolladas en este apartado.

### Cuadro 3.

#### Estrategias más comunes en el HFT

<i>Estrategia</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Ejemplos</i>
Creación de mercado.	Generar beneficio mediante la provisión de liquidez.	<ul style="list-style-type: none"> <li>(a) Menores costes de crear mercado (selección adversa, gestión de inventario, costes operativos).</li> <li>(b) Bajos costes de seguimiento de órdenes.</li> <li>(c) Mayor capacidad de repuesta para aprovechar oportunidades de beneficio anormal en la provisión de liquidez.</li> <li>(d) Alta competitividad, horquillas de precios más estrechas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(a) Provisión de liquidez en múltiples plataformas simultáneamente.</li> <li>(b) Gestión activa del riesgo; seguimiento intensivo de órdenes.</li> <li>(c) Altas tasas de cancelaciones y revisiones de órdenes.</li> </ul>

## Cuadro 3. (continuación)

## Estrategias más comunes en el HFT

<i>Estrategia</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Ejemplos</i>
Arbitraje de baja latencia.	Explotar oportunidades de arbitraje de muy corta duración.	Algoritmos capaces de explotar oportunidades de arbitraje no aprovechables a la velocidad de respuesta del ser humano.	(a) Arbitraje entre futuros sobre índices y contado (ETF). (b) Arbitraje multiplataforma para un mismo activo. (c) Arbitraje estadístico entre activos altamente correlacionados. (d) Carreras de velocidad.
Negociación direccional.	Especular en base a previsiones de cambios de precios a muy corto plazo.	Algoritmos capaces de reaccionar a velocidades extremas ante señales informativas.	(a) Especular en el mercado de contado en base a señales provenientes del mercado de futuros (b) Estrategias de anticipación de negociación informada (c) <i>Back-running</i> (d) <i>News-reaction</i>

Este cuadro resume las estrategias más comunes en el HFT, su objetivo, las ventajas del HFT frente a otros operadores y ejemplos.

## 5. IMPACTO DEL HFT SOBRE LA CALIDAD DEL MERCADO

En lo que resta, abordamos la principal cuestión de este estudio: ¿cuál ha sido el impacto del HFT sobre la calidad del mercado? Esta labor nos permitirá también exponer argumentos tanto a favor como en contra del HFT.

Por calidad del mercado entendemos altos niveles de liquidez y de eficiencia en precios. En finanzas, liquidez es la cualidad de poder comprar o vender cuando y cuanto uno quiera a bajo coste y sin tener que hacer grandes concesiones en el precio. Para medir la liquidez de un activo, hay que responder básicamente a dos preguntas: (1) ¿Cuáles son los costes implícitos de comprar o vender de forma inmediata un determinado volumen de títulos? La respuesta a esta pregunta es lo que se conoce como *costes de inmediatez*, y se miden mediante horquillas de precios o *spreads*. Un mayor *spread* implica mayores costes de inmediatez, esto es, menor liquidez. (2) ¿Cuánto podemos llegar a comprar o vender sin alterar significativamente el precio? La respuesta a esta pregunta se conoce como *profundidad*, y depende del volumen ofrecido a (o

cerca de) las mejores cotizaciones en el libro de órdenes. A mayor volumen ofrecido, mayor profundidad, es decir, más liquidez. Mayor liquidez se asocia a menores costes de negociar y mayor competitividad del mercado, pero también a mayor eficiencia en precios (por ejemplo, Chordia, Roll y Subrahmanyam, 2008) y menor coste de oportunidad del capital para las empresas cotizadas (por ejemplo, Amihud y Mendelson, 1986).

Por otro lado, un precio es eficiente si incorpora toda la información disponible en un instante determinado. Un precio eficiente es un precio justo, en el sentido de que refleja la expectativa que tiene el mercado sobre el verdadero valor del activo dada la información disponible. Bajo la hipótesis de eficiencia los precios cambian porque llega nueva información al mercado, donde *nueva* significa no predecible. Bajo la hipótesis de eficiencia, desviaciones respecto al precio eficiente (*ruido*) son posibles, pero se corrigen rápidamente. A la hora de medir la eficiencia en precios, los académicos responden a preguntas como: ¿cuán predecibles son los cambios de precios? ¿Cuánto ruido hay en los cambios de precios? (por ejemplo, Hendershott y Menkveld, 2014; Comerton-Forde y Putnins, 2015).

Finalmente, el proceso mediante el cual la nueva información se incorpora a los precios se conoce como formación del precio (*price discovery*). Las propiedades más deseables de todo proceso de formación del precio serían rapidez y precisión. En periodos de alta intensidad en la formación del precio la volatilidad aumenta y la liquidez sufre (por ejemplo, Glosten y Milgrom, 1985). Por tanto, cuanto más rápidamente y de forma más precisa se ajusten los precios a la nueva información, menos duraderas serán las distorsiones en liquidez. Liquidez y formación del precio son, por tanto, conceptos interrelacionados. Estudios sobre el proceso de formación del precio, responden a preguntas como: ¿cuánto contribuyen determinado tipo de mensajes/operadores a la volatilidad del precio justo? ¿Cuán rápido se ajustan los precios a la nueva información? (por ejemplo, Hasbrouck, 1995; Brogaard *et al.*, 2014, 2019; Chordia y Miao, 2021).

### 5.1. HFT y liquidez

Hemos visto que hay dos estrategias canónicas de HFT: creación de mercado y negociación oportunista. En términos generales, la teoría existente predice un efecto positivo de la creación de mercado y un efecto negativo de la negociación oportunista sobre la liquidez.

Los HFT explotan sus ventajas en tecnología y velocidad para reducir los costes de crear mercado. En un entorno altamente competitivo, esperaríamos que los HFMM trasladaran sus menores costes relativos a las primas y descuentos que demandan por proporcionar liquidez. De ser así, el *spread* consolidado de los HFMM debería ser menor y la presencia de éstos en las mejores cotizaciones *ask* y *bid* más frecuente que para el resto de los operadores. Cabe esperar, por tanto, que mayor actividad de los HFMM se asocie con una mayor liquidez. Sin embargo, algunas voces críticas, tanto en el ámbito profesional como en el académico, sostienen que una dependencia excesiva en proveedores de liquidez endógenos (como los

HFMM) puede aumentar la fragilidad del mercado y el riesgo sistemático (por ejemplo, Anand y Venkataraman, 2016).

En lo que respecta a la negociación oportunista, la teoría predice que los HFB, independientemente de si los modelizamos como arbitrajistas (Foucault, Kozhan y Wah, 2017), especuladores (Biais, Foucault y Moinas, 2015) o *news traders* (Foucault, Hombert y Roçu, 2016), imponen una externalidad negativa a los proveedores de liquidez más lentos en forma de costes de selección adversa más elevados. Se espera, por tanto, que una mayor actividad por parte de estos HFT resulte en un aumento en los *spreads* y, por tanto, una menor liquidez. Por otro lado, la negociación oportunista puede acelerar la incorporación de la nueva información a los precios, lo que potencialmente puede beneficiar a la liquidez.

¿Qué concluye la investigación empírica? Los primeros estudios empíricos que analizan el impacto de la HFT en la liquidez no diferencian entre estrategias de HFT. El efecto global del HFT en la liquidez dependerá, en última instancia, de la importancia relativa de cada una de sus estrategias canónicas, lo que puede depender a su vez del mercado, periodo y muestra de activos que se examine. Tampoco olvidemos que una empresa de HFT no tiene por qué especializarse en una única estrategia canónica. Así, el flujo de mensajes de un HFT es el reflejo de una mezcla de estrategias (Boehmer *et al.*, 2018). Hendershott, Jones y Menkveld (2011) examinan la relación entre AT y liquidez en mercados norteamericanos entre 2001 y 2006, etapas donde el HFT era todavía incipiente. Recurren al tráfico de mensajes, escalado por volumen negociado, como medida indirecta de la actividad del AT. Sus análisis revelan que aumentos de su *proxy* de AT a lo largo del tiempo se asocian a mejoras en diversos indicadores de liquidez. Dicha mejora en liquidez se debe, principalmente, a un menor riesgo de asimetrías de información. Para establecer causalidad utilizan una mejora tecnológica en el NYSE: la introducción de *Auto-Quote*. Esta innovación supuso un impulso importante para el AT en EE. UU. ya que, por primera vez, se ofrecía información en tiempo real sobre las mejores cotizaciones. Tras la introducción de *Auto-Quote* la actividad del AT aumentó y este incremento mejoró la liquidez.

Siguiendo el mismo enfoque instrumental, Boehmer, Fong y Wu (2020) estudian la introducción del servicio de colocación en 42 mercados de todo el mundo entre 2001 y 2011. La colocación reduce la latencia, haciendo al mercado más atractivo para el HFT, pero no tiene por qué verse impulsada por mejoras en liquidez, ni tener efecto alguno por sí misma en la calidad del mercado. Esto hace de la colocación un buen instrumento para el HFT. Por su parte, Riordan y Storckenmaier (2012) utilizan como instrumento una mejora en la tecnología de negociación del *Xetra*, que redujo la latencia de 50 ms a 10 ms. Ambos estudios llegan a la misma conclusión que Hendershott *et al.* (2011): mayor actividad del HFT se asocia a mayor liquidez y el canal a través del cual se produce dicha mejora es una reducción sustancial en los costes de selección adversa que soportan los proveedores de liquidez.

Estos estudios primigenios tienen la limitación de no poder distinguir la actividad del HFT de la actividad de otro tipo de AT. En este sentido, Hasbrouck y Saar (2013) proponen usar las carreras estratégicas (*SRuns*, ver sección 3) como medida indirecta para capturar

actividad específica del HFT y aislar, así, el HFT de otras formas de AT<sup>19</sup>. Encuentran que aumentos en la actividad del HFT (más *SRuns*) se asocia con mejoras en liquidez. Además, la literatura existente apunta a la creación de mercado como la estrategia canónica dominante en la industria del HFT. Tal dominancia podría sesgar los resultados de estos estudios, llevándonos a concluir que la relación positiva entre HFT y liquidez se extiende a toda la pléthora de estrategias que se engloban bajo la marca “HFT”.

Estudios más recientes distinguen entre estrategias canónicas. Por ejemplo, Chakrabarty, Pankaj, Shkilko y Sokolov (2021) examinan una iniciativa reguladora de la SEC de noviembre de 2011 conocida como *CCTP (Credit and Capital Thresholds Provision)*, dirigida a prohibir una práctica en la industria conocida como acceso “sin filtro” o “desnudo” (*unfiltered* o *naked*) al mercado<sup>20</sup>. El nuevo protocolo exigía a los *brokers* realizar comprobaciones en tiempo real de las posiciones de sus clientes en múltiples mercados e instrumentos antes de permitirles operar, prohibiendo *de facto* el acceso desnudo. El protocolo tuvo el efecto colateral, seguramente no deseado, de aumentar la latencia del sistema, ya que comprobar la posición del cliente requeriría de tiempo adicional. No obstante, el efecto no fue el mismo para todas las empresas de HFT, ya que algunas estaban registradas como *broker-dealers*, eran miembros del mercado y, por tanto, ya estaban obligadas a cumplir los umbrales de crédito y capital. Sólo las empresas de HFT no registradas y que usaban el acceso sin filtro al mercado se vieron perjudicadas. Chakrabarty *et al.* (2021) muestran que estas últimas eran mayormente HFB, que redujeron sustancialmente su participación. Como consecuencia, el riesgo de selección adversa de los proveedores de liquidez disminuyó y la liquidez del mercado aumentó.

Esta relación negativa entre HFB y liquidez se ve apoyada por otros estudios. Brogaard, Hendershott y Riordan (2017) encuentran que mientras que la venta en corto de otros operadores mejora la liquidez al mejorar la eficiencia en precios, la de los HFT impone un mayor riesgo de selección adversa sobre los creadores de mercado, lo que reduce la liquidez. Foucault, Kozhan y Tham (2017) estudian el impacto de un cambio tecnológico en el mercado de divisas que aumenta la velocidad relativa de los arbitrajes de baja latencia. Este *shock* a la latencia aumentó el riesgo de selección adversa. Por otro lado, Shkilko y Sokolov (2020) muestran que reducciones en la latencia de los HFT que arbitran entre el CME y el NYSE durante episodios de mal tiempo van acompañadas de mejoras en la liquidez del NYSE. Todos estos estudios corroboran que el HFT oportunista ejerce una externalidad negativa sobre los proveedores de liquidez en forma de mayores costes de crear mercado.

Finalmente, Brogaard y Garriott (2019) aprovechan la entrada secuencial de once empresas de HFT a lo largo de un periodo de cuatro años en un mercado alternativo cana-

<sup>19</sup> Chakrabarty *et al.* (2022) proporcionan evidencia empírica que apoya este supuesto.

<sup>20</sup> Es habitual que los *brokers* den acceso al mercado a sus clientes a través de su propia infraestructura. Esto se conoce como *direct market access (DMA)*. Otra práctica habitual es el *sponsored market access*, por la que el cliente utiliza su propia infraestructura para operar, pero con el código identificador del *broker*. Normalmente, el *broker* tendría la responsabilidad de comprobar que sus clientes satisfacen los umbrales de crédito y capital impuestos por el mercado antes de permitirles operar en el sistema. El acceso “desnudo” implica que los clientes acceden directamente saltándose el control del *broker*.

diense, Alpha, para estudiar cómo la competencia entre empresas de HFT afecta a la liquidez. El estudio muestra que el *spread* de Alpha converge hacia el *spread* del Toronto Stock Exchange a medida que aumenta el número de empresas de HFT operando en el mercado, sugiriendo que la competencia entre empresas de HFT tiene un efecto positivo sobre la liquidez. Además, ese efecto es persistente y se traduce en costes de ejecución efectivos menores para los operadores no algorítmicos. Como cabría esperar, atribuyen la mejora de la liquidez a la competencia entre los HFMM.

## 5.2. HTF y formación de precios

¿Son las transacciones y cotizaciones de los HFT informativas? Es decir, ¿contribuyen a la formación del precio? La actividad del HFT, ¿acelera la incorporación de nueva información a los precios? ¿Ha aumentado la eficiencia en precios tras la irrupción del HFT? En esta sección se exponen las conclusiones más relevantes de la investigación empírica que intenta dar respuesta a estas preguntas.

Los HFB basan sus estrategias en negociar sobre señales públicas más rápido que los demás. Por tanto, cabe esperar que su actividad provoque que las oportunidades de arbitraje desaparezcan más rápidamente, que la incorporación de nueva información se acelere y que las distorsiones en precios se corrijan más rápido. De ser así, el HFT oportunista debería contribuir a mejorar la formación del precio, al menos a altas frecuencias. Esta lógica, estándar en modelos de negociación con agentes informados (por ejemplo, O'Hara, 1995; Foucault, Pagano y Röell, 2007), plantea problemas cuando se aplica al HFT. Así, Foucault, Hombert y Rosu (2016) proponen un modelo en el que los HFB negociando con información a corto plazo imponen costes de selección adversa sobre agentes informados que negocian con información a largo plazo. Si esos costes son altos, los agentes informados pueden decidir no negociar, retrasando la incorporación de la información fundamental al precio. En la misma línea, Weller (2018) sostiene que un excesivo por parte de los HFT (recuerde la estrategia de *back-running*) podría incluso desincentivar la adquisición de información fundamental. Finalmente, Dugast y Foucault (2018) proponen un marco teórico en el que los HFT negociando rápidamente en base a información bruta, no contrastada, inyectan ruido en precios. En su modelo, procesar la información filtra el ruido, pero requiere de cierto tiempo que los HFT no tienen. Si el coste de la información bruta disminuye también lo hace la demanda de información procesada y, por ende, la eficiencia en precios a largo plazo.

En cuanto a los HFMM, sabemos que su intensa actividad de seguimiento de órdenes les permite reajustar sus cotizaciones con rapidez y frecuencia en respuesta a todo tipo de señales y noticias del mercado. En consecuencia, sus cotizaciones deberían incorporar información relevante más rápidamente, es decir, ser más informativas sobre el verdadero valor del activo que las de otros operadores, y sus ajustes deberían contribuir a la formación de precios. Además, los HFMM se enfrentan a un coste de gestión de inventario menor que otros operadores de mercado, lo que debería traducirse en menores distorsiones en los precios cau-

sadas por la gestión de inventario (Hendershott y Menkveld, 2014), es decir, menor ruido en precios, aumentando la eficiencia.

Los primeros trabajos empíricos en analizar el impacto del HFT en la eficiencia en precios se fijan en el efecto agregado del AT. Para el mercado de divisas, Chaboud, Chiquoine, Hjalmarsson y Vega (2014) observan que mayor AT se asocia con mayor eficiencia en precios. Mediante métodos estadísticos, establecen que esta relación es causal y que tanto los HFB, a través del arbitraje de baja latencia, como los HFMM, a través de la actualización rápida y continuada de sus cotizaciones, contribuyen a hacer más eficientes los precios de este mercado. Conrad *et al.* (2015) encuentran que activos con mayor actividad del HFT, medida a través del *high-frequency quoting (HFQ)* (ver sección 3), tienen precios más eficientes. Para establecer causalidad utilizan la introducción del sistema de negociación Arrowhead en el Tokio Stock Exchange en enero de 2010, que redujo la latencia del sistema. Encuentran que mayor actividad del HFT, instrumentalizado a través del *shock* exógeno, resultó en mejoras tanto de eficiencia como de liquidez.

La información se refleja en las cotizaciones de los proveedores de liquidez cuando éstos revisan sus órdenes límite en el libro como respuesta a señales valiosas, tanto externas (por ejemplo, anuncios corporativos) como emanadas de la propia negociación (por ejemplo, transacciones). Algunas de estas últimas pueden reflejar a su vez señales informativas más primitivas, adquiridas por agentes informados. Modelos clásicos de formación de precios presuponen que los agentes informados toman liquidez porque su ventaja informativa es perecedera<sup>21</sup>. Por tanto, la demanda de liquidez es informativa porque existe una probabilidad estrictamente positiva de que las órdenes agresivas reflejen negociación informada. La teoría sobre HFT predice que las cotizaciones de los HFMM incorporan la información más rápidamente, reduciendo así las oportunidades tanto de agentes informados como de operadores oportunistas de extraer rentas a su costa (por ejemplo, Hoffmann, 2014; Jovanovic y Menkveld, 2016; Bhattacharya y Saar, 2021). Como resultado, el contenido informativo de la demanda de liquidez podría haber disminuido tras la aparición del HFT. En esta línea, Riordan y Storckenmaier (2012) observan que tras un *shock* a la latencia del mercado alemán Xetra en 2007, el proceso de formación del precio cambió: las transacciones se volvieron menos informativas, mientras que el contenido informativo de las cotizaciones aumentó. En consecuencia, el peso relativo de la demanda de liquidez en la formación del precio disminuyó.

Estudios posteriores distinguen entre estrategias de HFT. Brogaard, Hendershott y Riordan (2014) estudian cómo el HFT oportunista contribuye a la eficiencia en precios. Utilizan una base de datos no pública del Nasdaq que identifica las transacciones que involucran HFT para una muestra de 120 activos entre 2008 y 2010. Mediante técnicas estadísticas, descomponen el precio observado en un componente informativo (precio justo) y un componente transitorio (ruido), para después evaluar cómo impacta el HFT en ambos componentes. Sus resultados

<sup>21</sup> Véase Kyle (1985), Glosten y Milgrom (1985), Easley y O'Hara (1987), Easley, Kiefer, O'Hara y Paperman (1992), Holden y Subrahmanyam (1992), entre otros muchos.

muestran que el HFT oportunista mejora la eficiencia en precios de dos formas diferentes. En primer lugar, negocian agresivamente en la dirección de cambios permanentes en los precios, lo que es coherente con una exitosa negociación direccional: anticipan cambios permanentes en el precio a corto plazo, toman posiciones agresivamente y, al hacerlo, aceleran la incorporación de la nueva información. Además, las transacciones iniciadas por los HFT son más informativas que las iniciadas por otros tipos de operadores. En segundo lugar, los HFT oportunistas negocian en contra de movimientos transitorios en los precios, contra desviaciones temporales entre el precio observado y el precio justo, ayudando así a disminuir el ruido en el precio. Este resultado es consistente con un exitoso arbitraje de baja latencia.

El estudio anterior ignora el componente más importante del tráfico de mensajes: las órdenes límite. El uso intensivo de estas órdenes es una de las características más sobresalientes de los mercados actuales (O'Hara, 2015). En su siguiente estudio, Brogaard *et al.* (2019) proporcionan un estudio más completo y detallado sobre el papel que el HFT juega en el proceso de formación de precios. Utilizan datos del mercado de valores canadiense, donde identifican 61 empresas de HFT de entre un total de 1.706 operadores en el mercado. En media por día, los HFT aportan el 53 % del tráfico total de mensajes. Éste se compone en un 48 % de órdenes límite nuevas y en un 47 % de cancelaciones/revisiones de órdenes límite ya en el libro. Las órdenes de mercado representan menos del 5 % del total de mensajes. Además, el 50 % de toda la actividad se centra en las mejores cotizaciones del mercado, donde los HFT son mucho más activos que otros operadores.

Al estudiar el contenido informativo medio de los diferentes tipos de mensajes, Brogaard *et al.* (2019) encuentran que las órdenes agresivas tienen un mayor impacto medio en precios, seguidas de las órdenes límite y las cancelaciones que alteran las mejores cotizaciones. Toda la actividad que ocurre más allá de esas mejores cotizaciones es irrelevante en la formación del precio. Al comparar los mensajes del HFT con el resto de los operadores, encuentran que las órdenes de los HFT son, en media, más informativas que órdenes similares de otros operadores. Como resultado de lo anterior, al calcular cuánto de la volatilidad del precio justo es atribuible a cada tipo de orden (*information share*) encuentran que la contribución de los HFT es del 42,3 %, unos 10 puntos porcentuales más que la del resto de operadores (33 %). El resto sería atribuible a información no relacionada con el flujo de órdenes. A pesar de que las órdenes agresivas tienen, en media, mayor contenido informativo, son mucho menos frecuentes que las órdenes límite. Como consecuencia, las órdenes de mercado explican un 30 % de la formación de precios mientras que las órdenes límite explican un 45 %. Como el HFT es responsable de la mayor parte del flujo de órdenes límite, se convierten también en los principales contribuyentes al proceso de formación del precio.

## 6. IMPACTO DEL HFT: OTRAS INQUIETUDES

La investigación académica sugiere que el impacto del HFT en la calidad de los mercados financieros tiene sus luces y sus sombras. Por un lado, el HFT globalmente considerado ha contribuido a aumentar la liquidez del mercado, ha acelerado y redefinido el proceso de formación de precios y ha aumentado la eficiencia en precios al menos a frecuencias altas. Sin

embargo, ciertas estrategias que se incluyen dentro del paraguas del HFT generan externalidades negativas en otros operadores y podrían reducir la liquidez. Finalizamos este trabajo dando unas pinceladas sobre algunas de las preocupaciones más recurrentes relacionadas con el HFT, expuestas por reguladores, foros de profesionales y trabajos académicos. Estas inquietudes, en muchos casos, han recibido una atención que se antoja insuficiente por parte de la investigación académica, por lo que podemos considerarlas como no resueltas.

### 6.1. La carrera tecnológica

Las empresas de HFT compiten ferozmente entre sí para explotar unas oportunidades de beneficio que, obviamente, son limitadas. Las empresas más rápidas capturan un mayor porcentaje de éstas y, con ello, una mayor cuota de mercado. Por este motivo, los HFT no reparan en gastos para reducir su latencia relativa. Una de las principales críticas que suscita el HFT es que esta feroz competencia en latencia puede conducir a una carrera tecnológica que puede no ser óptima desde el punto de vista del bienestar social (Biais, Foucault y Moinas, 2015)<sup>22</sup>. El principal temor es que podría reducir la competencia en el sector, ya que las empresas de HFT más lentas podrían ser expulsadas del mercado. Asimismo, el alto coste de adquirir la tecnología necesaria para poder competir con las empresas de HFT ya establecidas podría convertirse en una barrera de entrada para nuevos competidores. Una mayor concentración podría resultar en un aumento de los costes implícitos por negociar (menor liquidez) y, con ello, un mayor coste de capital para las empresas emisoras (por ejemplo, Amihud, Mendelson y Pedersen, 2013). Estas voces críticas apremian a los mercados a que adopten medidas para frenar la carrera tecnológica.

¿Cómo pueden los reguladores detener esta carrera tecnológica o, al menos, evitar que sea perjudicial? Las soluciones sugeridas consisten en ralentizar al HFT para eliminar las ventajas o jerarquías en velocidad, y así conseguir un tablero de juego más equitativo. Una posibilidad es imponer una latencia mínima al sistema, de manera que se reduzcan los incentivos a adquirir la tecnología más rápida. Otra opción es introducir retrasos intencionados y sistemáticos a la velocidad de procesamiento de órdenes (*speed bumps*) de manera que las diferencias en latencia de apenas unos pocos milisegundos no tengan valor. Estos retrasos pueden ser aleatorios, de forma que no sea el mismo para todos los mensajes (por ejemplo, tiempo de procesamiento + retraso aleatorio entre 0 y 10 ms), o puede ser uniforme. Pueden ser simétricos (todos los operadores experimentan el mismo retraso) o asimétricos (por ejemplo, solamente se ralentizan las órdenes que demandan liquidez). También es posible que discriminen entre tipo de mensaje (por ejemplo, se aplica a todo mensaje excepto a cancelaciones)<sup>23</sup>. Observe que

<sup>22</sup> El término utilizado es *technological arms race*. *Arms race* se puede traducir como “carrera armamentística”, en referencia a la competencia entre naciones para aumentar el tamaño y la calidad de los recursos militares.

<sup>23</sup> Algunos mercados norteamericanos han experimentado ya con estas *speed bumps*, por ejemplo Investors Exchange (IEX) en 2013; Aequitas NEO Exchange en 2015, o el TSX Alpha Exchange en 2015. En Europa, el mercado alemán Eurex Exchange impuso una *speed bump* sobre tomadores de liquidez aleatoria (de 1 a 3 ms) en junio de 2019.

estas medidas suponen una restricción vinculante sólo para operadores cuyo éxito depende de la velocidad. Además, sólo afectan a la latencia del mercado. Hipotéticamente, el HFT podría sustituir mayor latencia de mercado por menor latencia individual.

El 17 de junio de 2016 la SEC aprobó la conversión del Investors Exchange (IEX) de *dark pool* a National Securities Exchange. El IEX se convirtió así en el primer mercado electrónico en EE. UU. con un tope de velocidad, ya implantado desde su etapa anterior. En EE. UU., la *Order Protection Rule* obliga a que toda orden se dirija a aquella plataforma que ofrezca las mejores cotizaciones *ask* o *bid* del mercado consolidado. Si ese mercado es IEX, la orden se vería afectada por el tope de velocidad. Chakrabarty, Huang y Jain (2022) muestran que el *speed bump* de IEX aumentó la latencia global del sistema, ralentizando a los operadores más rápidos del mercado. Más importante aún, encuentran que la liquidez experimentó mejoras significativas tras la conversión de IEX, lo que sugiere que el tope de velocidad fue especialmente dañino para las estrategias del HFT oportunista.

Budish *et al.* (2015) muestran teóricamente que, en el contexto de los mercados de alta frecuencia, el mercado continuo puede no ser un diseño óptimo al intensificar los costes de selección adversa de los proveedores de liquidez. En su lugar, proponen un sistema de negociación discreta, basado en subastas sucesivas y frecuentes (de muy corta duración) (*frequent batch auctions* o *FBA*). Para entender esta propuesta, considere un mercado continuo con  $N$  participantes, todos con idénticas latencias y que reaccionan a las mismas señales. Pueden elegir actuar como CM o como HFB. Supongamos que tras una señal informativa, el CM  $i$  tiene una orden en dinero en el libro. Inmediatamente, se dispara una carrera de velocidad entre el CM  $i$  y, potencialmente,  $N-1$  HFB. Supongamos que los  $N$  mensajes llegan al mismo tiempo al servidor del mercado. En un mercado continuo, el *host* procesa los mensajes uno a uno en orden de llegada. Pero si llegan simultáneamente determina qué mensaje ejecutar primero de forma aleatoria. Esto significa que, en nuestro ejemplo, la probabilidad de que la orden del CM  $i$  se ejecute en dinero es de  $(N-1)/N$ . Ante un escenario tan desfavorable, el CM  $i$  compensará sus altos costes de selección adversa manteniendo un *spread* ancho. En cambio, en un mercado de negociación discreta, las órdenes se acumularían durante un determinado periodo de tiempo antes de casarlas, ralentizando *de facto* todas las órdenes y dando al CM  $i$  tiempo suficiente para revisar su orden incluso si es más lento que los HFB.

La teoría de Budish *et al.* (2015) predice que en un mercado continuo los costes de selección adversa serán mayores que en un mercado discreto y que, por tanto, la liquidez será menor. Indriawan, Shkillo y Pascual (2022) utilizan el cambio de mercado discreto (subastas cada cinco segundos) a mercado continuo del Taiwan Stock Exchange (TWSE) el 23 de marzo de 2020 para testar empíricamente las predicciones teóricas de Budish *et al.* (2015). Encuentran que, tras el cambio a mercado continuo, los costes de selección adversa en el TWSE efectivamente aumentaron, mientras que la liquidez disminuyó. El incremento en los costes de selección adversa fue mayor entre activos más líquidos, donde la presencia del HFT cabe esperar que sea mayor. También observan un aumento en el volumen negociado, causado por un mayor volumen tóxico, que asocian al arbitraje de baja latencia. Más volumen significa más beneficios para el mercado, por lo que éstos podrían ser reticentes a cambiar el *status quo*.

Comprobar empíricamente si estas propuestas pueden ser efectivas a la hora de reducir la intensidad de la carrera tecnológica es todo un reto, entre otras cosas, porque las inversiones en velocidad no son directamente observables. Existe, no obstante, evidencia derivada de la economía experimental, esto es, mercados simulados en entornos controlados. Por un lado, Aldrich y López Vargas (2020) encuentran que tras pasar de mercado continuo a FBA, los participantes en su experimento reducen su inversión en velocidad entre un 36 % y un 48 %. Por otro lado, Khapko y Zoican (2021) encuentran que los topes de velocidad asimétricos (aplicados sobre tomadores de liquidez solamente) reducen la inversión en velocidad en un 20 % y el efecto es mayor si aumentamos la magnitud del retraso.

## 6.2. Liquidez fantasma

Aunque los estudios existentes asocian mayor HFT con mejoras en indicadores estándar de liquidez, algunas voces críticas apuntan a diversos problemas que estos indicadores podrían no captar. Uno de ellos es la llamada liquidez fantasma (*ghost o phantom liquidity*). Considere que un HFT quiere comprar IBM. Para ello coloca una orden límite de compra en el NYSE y espera. Ahora bien, dado que IBM se negocia en otras 23 bolsas (ignoremos las *dark pools* por simplificar), el HFT está perdiendo la oportunidad de negociar si la orden de venta compatible llegase a otra plataforma. Así que, para maximizar sus posibilidades de ejecución, el HFT coloca órdenes de compra límite iguales en todas las plataformas de negociación. Cuando se ejecute una de ellas cancelará las demás. Imagine ahora un segundo operador, más lento, que introduce una orden de venta con el objetivo de tomar una de las órdenes límite colocadas por nuestro HFT. Al mismo tiempo, se ejecuta otra de las órdenes límite del HFT en otro mercado. Como la tecnología del HFT es más rápida, los mensajes de cancelación llegan antes al *host* que la orden de venta. Como consecuencia, la orden del vendedor o bien no se ejecuta o lo hace a un precio peor. Este ejemplo ilustra que, para un tomador de liquidez lento, la liquidez observada puede ser menor que la realmente accesible. Es una liquidez fantasma y la duplicación de órdenes, su principal causa.

La liquidez fantasma desaparece rápidamente del libro sin ser ejecutada. Por tanto, es una forma inestable de suministro de liquidez. Voces críticas con el HFT cuestionan que la mejora en liquidez atribuida al HFT sea real, sino más bien una ilusión de liquidez, ya que ésta únicamente existe para aquéllos que son lo suficientemente rápidos como para utilizarla. Esta liquidez ilusoria complica la evaluación de la situación del mercado y, también, el diseño de estrategias de negociación óptimas dirigidas a minimizar los costes de negociar o el impacto en precios.

Degryse, de Winne, Gresse y Payne (2020) estudian la liquidez fantasma en los mercados europeos. Encuentran que se trata de fenómeno económicamente significativo, siendo el causante de una parte importante de la actividad de cancelaciones de órdenes. Además, verifican que los HFT son los que más contribuyen a ella (seguidos de otros AT). No es sorprendente, por tanto, que se dé en mayor grado en valores con una mayor capitalización bursátil

y un mayor grado de fragmentación. El resultado probablemente más preocupante de este estudio es que la liquidez fantasma aumenta los costes efectivos de negociar de los operadores más lentos. La liquidez fantasma es, por tanto, un fenómeno no menor y que causa externalidades negativas sobre los operadores menos sofisticados.

### 6.3. HFT y riesgo sistémico

La liquidez cambia a lo largo del tiempo de forma no perfectamente predecible. Las crisis financieras de 1987 y de 2008-2009 o la crisis del COVID-19 de 2020 son ejemplos (sin duda, extremos) de la incertidumbre asociada a la liquidez futura tanto a nivel de mercado como a nivel de activos individuales (por ejemplo, Rösch y Kaserer, 2014; Beber y Pagano, 2013; Chakrabarty y Pascual, 2023). Esta incertidumbre asociada a la liquidez futura aumenta el riesgo sobre el valor de liquidación de cualquier inversión y, por tanto, sobre los rendimientos netos futuros. Este riesgo, se conoce como riesgo de liquidez.

Chordia, Roll y Subramanyam (2000) demuestran que la liquidez de activos individuales se mueve con la liquidez agregada del mercado. En otras palabras, la liquidez de activos individuales es función de un factor común, que es la liquidez del mercado. Llamamos a este fenómeno comunalidad en liquidez (*commonality in liquidity*). Debido a la existencia de ese factor común, el riesgo de liquidez no se puede eliminar a través de la diversificación. Por tanto, la comunalidad en liquidez es una fuente de riesgo sistemático, al igual que lo es la más conocida comunalidad en rentabilidad.

Sabemos que los movimientos comunes en rentabilidad reducen los beneficios de la diversificación. Los movimientos comunes en liquidez son igualmente indeseables, porque facilitan que *shocks* individuales en liquidez se propaguen rápidamente a todo el sistema, contribuyendo a desestabilizar el mercado. Al igual que los inversores aversos al riesgo exigen una prima por invertir en valores cuyos precios son más sensibles a los movimientos del mercado, también exigirán una prima por invertir en valores cuya liquidez muestre una covarianza mayor con la liquidez del mercado. Una mayor comunalidad en liquidez, por tanto, suma a la beta del activo y aumenta el coste de capital de la empresa (por ejemplo, Acharya y Pedersen, 2005).

Hemos visto que las empresas de HFT siguen estrategias comunes y que compiten entre ellas para explotar las mismas oportunidades de beneficio. Esto sugiere que sus algoritmos deben ser similares y responder a las mismas señales, por lo que la actividad de diferentes empresas de HFT tiene que estar mutuamente correlacionada. Diferentes estudios apoyan este supuesto, mostrando empíricamente que la actividad de las empresas de HFT experimenta una correlación mayor que la de otras empresas de inversión (por ejemplo, Chaboud *et al.*, 2014; Benos, Brugler, Hjalmarsson y Zikes, 2017). Esta comunalidad en la actividad

del HFT preocupa en tanto en cuanto pueda contribuir a aumentar el riesgo sistemático de inversor y, por tanto, tener efectos negativos sobre la inversión real y el crecimiento de las empresas<sup>24</sup>.

Maceniece, Malceniaks y Putnins (2019) examinan esta cuestión aprovechando la entrada escalonada de la plataforma de negociación Chi-X en diversos mercados europeos entre 2007 y 2009. La entrada de Chi-X constituye un buen experimento natural porque provocó un aumento sustancial del HFT en Europa (Menkveld, 2013). Mediante contrastes estadísticos y econométricos, estos autores encuentran que mayor actividad del HFT se asocia con mayor comunalidad, tanto en rendimientos como en liquidez, y el impacto es económicamente significativo. El efecto sobre la comunalidad en rentabilidad se atribuye a las estrategias comunes entre empresas de HFT (Boehmer *et al.*, 2018) y a la mayor rapidez de ajuste de las cotizaciones de los HFT a la información general del mercado. El efecto sobre la comunalidad en liquidez se asocia a su intensiva actividad de seguimiento, a la correlación entre estrategias oportunistas que demandan liquidez, y a la tendencia de los HFMM a borrarse del mercado cuando las condiciones no les son favorables.

En general, el HFT tiene un efecto ambiguo sobre el coste del capital de las empresas y el nivel de inversión real en la economía. Por un lado, la actividad de creación de mercado por parte de los HFT aumenta el nivel medio de liquidez, es decir, disminuye los costes implícitos de negociar en los mercados. Por tanto, una mayor contribución de los HFMM a la provisión de liquidez debería reducir el coste de capital de las empresas a través de una menor prima por iliquidez (Amihud y Mendelson, 1986). Por otro lado, el HFT aumenta el riesgo sistemático y, por tanto, la beta de la empresa (Acharya y Pedersen, 2005). Cuál de estos efectos domina, es una cuestión que no ha recibido aún respuesta.

#### 6.4. Fragilidad

Otro argumento común entre los críticos del HFT es su posible falta de compromiso a la hora de proporcionar liquidez y cómo esto puede aumentar la fragilidad del mercado. Recordemos, los HFMM son proveedores de liquidez endógenos (*ELP*), es decir, proporcionan liquidez voluntariamente, para beneficiarse de ello. No tienen la obligación de estar siempre presentes en el mercado o de proporcionar liquidez en contra de la tendencia dominante cuando hay fuertes desequilibrios de compra y venta. Existe el riesgo de que desaparezcan al unísono en momentos de alta tensión, cuando proporcionar liquidez es arriesgado, o cuando las oportunidades de beneficio son escasas, aumentando la fragilidad del mercado y contribuyendo a desestabilizarlo.

Esta preocupación es especialmente comprensible si se tiene en cuenta que estos *ELP* han desplazado a los CM tradicionales. Si los primeros abandonan el barco en tiempos de

<sup>24</sup> También preocupa que pueda contribuir a desestabilizar los mercados, como veremos en la sección 6.4.

tormenta, los segundos no cabe esperar que se pongan al timón en su ausencia, simplemente porque ya no les resulta rentable. No pueden cubrir sus pérdidas durante las tormentas con los beneficios que ya no obtienen en tiempos de calma. Además, las empresas de HFT, por lo general, están poco capitalizadas, lo que significa que están sujetas a riesgo de fallido<sup>25</sup>. En épocas de estrés o en presencia de una perturbación significativa en los mercados, podría producirse una oleada de fallidos, que podría extenderse también a otras empresas, generando riesgo sistémico.

Annand y Venkataraman (2016) estudian si los ELP (HFMM) que operan en el Toronto Stock Exchange proporcionan liquidez de forma fiable. Al igual que Malceniece *et al.* (2019), encuentran que la oferta de liquidez de los diferentes ELP está fuerte y positivamente correlacionada, de forma que suele moverse de forma sincrónica (comunalidad). Así, la contribución global de los ELP a la liquidez de un activo concreto se mueve con su contribución global en todo el mercado. Además, la contribución de un ELP concreto en un activo dado se mueve con la contribución global de los ELP en dicho activo. Finalmente, la participación global de los ELP varía con las condiciones del mercado: aumenta con el volumen y la frecuencia de negociación (menores costes de gestión de inventario), pero disminuye durante periodos de fuertes desequilibrios entre compras y ventas (mayor riesgo de selección adversa). Esto sugiere que la fragilidad del mercado, impulsada por el comportamiento sincrónico de los HFMM, podría aumentar cuando las condiciones del mercado son desfavorables para la provisión de liquidez.

¿Contribuye el HFT a desestabilizar los mercados? La evidencia en este sentido es mixta. Kirikenko *et al.* (2017) encuentran que durante el *Flash Crash* del 6 de mayo de 2010, los HFMM no alteraron la dinámica de sus inventarios, a pesar de la fuerte caída de precios. Annand y Venkataraman (2016) observan que la participación de los HFT en la provisión de liquidez aumenta con la volatilidad (periodos de estrés), posiblemente porque mayor volatilidad se asocia a beneficios anormales en la creación de mercado. Chakrabarty y Pascual (2023) encuentran que tras el estallido de la crisis del COVID-19 los valores del S&P500 con mayor presencia del HFT no experimentaron una mayor reducción ni en la liquidez media ni en la competencia por la provisión de liquidez que aquellos activos con una menor participación del HFT, ni siquiera en aquellos sectores de actividad más afectados por la crisis. Frente a toda esta evidencia positiva, Brogaard *et al.* (2018) encuentran que, durante movimientos extremos en los precios de los activos individuales, los HFMM proporcionan liquidez al resto del mercado, pero este comportamiento cambia cuando se producen movimientos extremos de precios simultáneamente en varios activos. En general, la evidencia empírica existente debería aliviar el temor de algunos reguladores a que los HFMM pudieran retirarse en masa de la provisión de liquidez en tiempos de estrés.

---

<sup>25</sup> Como ejemplo, véase el caso de Knight Capital, el mayor operador en renta variable en EE. UU. en 2012, con una cuota de mercado del 17 %. El 1 de agosto de 2012, un error de código en un algoritmo provocó pérdidas multimillonarias a la empresa en sólo una hora de negociación, siendo absorbida por la empresa rival Getco LLC una semana después (<https://www.henricodolfing.com/2019/06/project-failure-case-study-knight-capital.html>).

### 6.5. Formación de precios a frecuencias bajas

La evidencia empírica sugiere que los HFT contribuyen significativamente al proceso de formación del precio, pero esas mejoras se han documentado para frecuencias muy altas. Las voces críticas con el HFT consideran estas mejoras en eficiencia irrelevantes, puesto que la mayoría de los inversores no tienen horizontes de inversión tan cortos y las decisiones corporativas no se toman con una frecuencia de milisegundos. La cuestión relevante debería ser si los HFT hacen más eficientes los precios en frecuencias que son importantes para los “humanos”.

Dos trabajos independientes han abordado esta cuestión recientemente. Por un lado, Chakrabarty, Moulton y Wang (2022) estudian si el HFT alivia el problema (humano) del déficit de atención. Varios estudios muestran que los operadores humanos se distraen fácilmente alrededor de anuncios de beneficios cuando muchas empresas anuncian sus beneficios simultáneamente (Hirshleifer, Lim y Teoh, 2009), cuando hay eventos deportivos importantes (Drake, Gee y Thornock, 2015) o cerca de festivos o fines de semana (Della Vigna y Pollet, 2009). Cuando esto ocurre, los precios de las acciones infrarreaccionan al contenido de los anuncios y, posteriormente, la información se incorpora a los precios gradualmente durante las siguientes semanas. Este fenómeno se conoce como *post earnings announcement drift* (PEAD). A menos que los algoritmos reflejen de algún modo los sesgos humanos de sus propios programadores, los algoritmos no deberían sufrir de déficit de atención. En línea con este argumento, el estudio encuentra que el HFT ayuda a paliar los efectos de la falta de atención en la formación de precios, tanto a corto como a largo plazo.

Por otro lado, Chordia y Miao (2020) analizan si los HFT facilitan la incorporación de información fundamental en los precios. Al igual que en el estudio anterior, se centran en los anuncios de beneficios. Utilizando *SRun* como medida indirecta de HFT (sección 3), analizan las rentabilidades anormales del día del anuncio y del día siguiente condicionadas a la magnitud de la sorpresa contenida en el anuncio y al nivel de actividad del HFT. También examinan el PEAD, definido como la rentabilidad anormal acumulada durante los 60 días siguientes al anuncio. Encuentran que la actividad del HFT mejora la eficiencia en precios. La reacción del mercado a la sorpresa contenida en el anuncio aumenta con la actividad del HFT y el PEAD disminuye, hasta el punto de ser no significativo cuando la participación del HFT es muy alta.

En general, estos estudios sugieren que el HFT no sólo contribuye a mejorar la eficiencia de los precios en las frecuencias ultra altas. También mejora la eficiencia en precios en horizontes que son relevantes para la toma de decisiones de inversores individuales y empresas.

### 6.6. Adquisición de información

Un operador informado contribuye a la formación del precio porque adquiere nueva información (señal privada) y negocia en base a ella. En cambio, cuando un HFT es el primero

en reaccionar a una señal proveniente del mercado de futuros, bien para tomar posiciones especulativas o bien para ajustar sus cotizaciones en el mercado de contado, está negociando con una señal pública. No obstante, al acelerar la incorporación de ésta en el precio de contado está contribuyendo al proceso de formación del precio. El HFT, por tanto, mejora la eficiencia con respecto a información existente, ya revelada.

Cuando el HFT utiliza algoritmos de *machine learning* para detectar actividad informada y negociar con ella (*back running*), la competencia del HFT acelera la incorporación de la información privada al precio. Observe, sin embargo, que el HFT está negociando con información adquirida por otros operadores (*free-riding*). Además, estos algoritmos de anticipación erosionan las rentas que los agentes informados pueden extraer de sus señales privadas (Yang y Zhu, 2020; Baldauf y Mollner, 2020). Si esta actividad del HFT es muy intensa y persistente, podría desalentar la adquisición de información por parte de los agentes informados. Puede darse, por tanto, la paradoja de que el HFT contribuye a la formación del precio respecto a la información disponible, al tiempo que la reduce con respecto a la información adquirible.

#### Cuadro 4.

#### Impacto del HFT sobre la calidad del mercado

<i>Dimensión</i>	<i>Conclusiones</i>	<i>Evidencia</i>
Liquidez	(a) Efecto positivo del HFT globalmente considerado.	(a) Hendershott, Jones y Menkveld (2011); Riordan y Storkenmaier (2012); Hasbrouck y Saar (2013); Boehmer, Fong y Wu (2020).
	(b) Efecto positivo del HFT creador de mercado (HFMM).	(b) Menkveld (2013); Brogaard <i>et al.</i> (2015); Brogaard y Garriott (2019).
	(c) Efecto negativo del HFT oportunista (HFB).	(c) Brogaard, Hendershott y Riordan (2017); Foucault, Kozhan, y Tham (2017); Shkilko y Sokolov (2020); Chakrabarty <i>et al.</i> (2021); Chakrabarty, Huang y Jain (2022); Indriawan, Shkilko y Pascual (2022).
	(d) El HFT contribuye a generar liquidez fantasma.	(d) Degryse <i>et al.</i> (2020).
	(e) EL HFT aumenta los movimientos comunes en liquidez.	(e) Chaboud <i>et al.</i> (2014); Benos <i>et al.</i> , 2017; Boehmer, Saar, and Wu (2018); Maceniece, Malceniaks y Putnins (2019).
	(f) La evidencia, por lo general, no apoya la hipótesis de que el HFT aumenta la fragilidad de los mercados.	(f) Annand y Venkataraman (2016); Kirikenko <i>et al.</i> (2017); Brogaard, Carrion, Moyaert, Riordan, Shkilko y Sokolov (2018); Chakrabarty y Pascual (2023).

## Cuadro 4. (continuación)

## Impacto del HFT sobre la calidad del mercado

Dimensión	Conclusiones	Evidencia
Eficiencia y formación del precio	(a) Efecto positivo del HFT globalmente considerado.	(a) Chaboud <i>et al.</i> (2014); Conrad, Wahal, y Xiang (2015); Hu, Pan y Wang (2017).
	(b) Efecto positivo del HFT creador de mercado (HFMM).	(b) Riordan y Storkenmaier (2012); Brogaard, Hendershott y Riordan (2019); Chakrabarty <i>et al.</i> (2022).
	(c) Efecto positivo del HFT oportunista (HFB).	(c) Brogaard, Hendershott y Riordan (2014; 2019).
	(d) Efecto positivo en la eficiencia incluso a frecuencias bajas.	(d) Chordia y Miao (2020); Chakrabarty, Moulton y Wang (2022).
	(e) El HFB desincentiva la adquisición de información.	(e) Weller (2018); Lee y Watts (2020).

Este cuadro resume las principales conclusiones de la literatura académica sobre el impacto del HFT en la calidad del mercado, y se citan los artículos más representativos en cada caso.

Weller (2018) estudia empíricamente esta hipótesis midiendo la adquisición de información alrededor de anuncios de beneficios en EE. UU. condicionada al nivel de actividad del HFT, que valora mediante medidas indirectas. Intuitivamente, cuanto más adquisición de información se produzca, más información se incorporará al precio antes del anuncio y menor será la reacción del mercado al propio anuncio. Si la competencia del HFT desincentiva la adquisición de información, mayor será la reacción del mercado al anuncio público. Weller encuentra que la incorporación de nueva información antes del anuncio cae con la actividad de HFT, incluso hasta un mes antes de la fecha del anuncio. Muestra, por tanto, una fuerte asociación negativa entre HFT y adquisición de información. En la misma línea, Lee y Watts (2020) encuentran que un *shock* negativo a la actividad del HFT se asocia a un incremento en la adquisición de información previa a anuncios de beneficios.

El cuadro 4 resume las principales conclusiones de la investigación sobre el impacto del HFT en la calidad del mercado.

## 7. CONCLUSIONES

Mediante la revisión de la investigación académica sobre negociación de alta frecuencia o HFT desde el año 2010 hasta la actualidad, este trabajo evalúa el impacto que el surgimiento de este nuevo tipo de participante ha tenido sobre la calidad de los mercados financieros, entendida en términos de mayor liquidez y eficiencia en precios.

Concluimos que el HFT globalmente considerado ha tenido un efecto neto positivo en la liquidez de los activos y mercados financieros. Este impacto se debe en gran medida a la estrategia canónica dominante en el HFT, la creación de mercado. Muchos HFT eligen

la estrategia de proporcionar liquidez voluntariamente, actuando como creadores de mercado endógenos, para generar beneficios. Estos HFMM utilizan tecnología y servicios de baja latencia, una activa gestión del riesgo –a través del intensivo monitoreo de sus órdenes– y una actividad simultánea en varios mercados para conseguir ventajas competitivas frente a otros creadores de mercado en forma de menores costes operativos, de selección adversa y de gestión de inventario. En un entorno altamente competitivo, los HFMM trasladan esa ventaja en costes a sus clientes en forma de menores primas y descuentos por negociar, aumentando la liquidez.

No obstante, además de crear mercado, los HFT también implementan estrategias oportunistas como el arbitraje de baja latencia, la especulación direccional y el *news trading*. Todas estas estrategias imponen una externalidad negativa sobre los proveedores de liquidez relativamente más lentos en forma de mayores costes de selección adversa. La investigación teórica predice, y la empírica corrobora, que mayor presencia del HFT oportunista se asocia con un menor nivel de liquidez.

Los detractores del HFT apuntan a potenciales efectos negativos del HFT que las medidas estándar de liquidez difícilmente pueden capturar. Por un lado, parte de la liquidez proporcionada por los HFT se evapora rápidamente, sin que pueda ser aprovechada por aquellos operadores relativamente más lentos. La evidencia existente indica que esta liquidez fantasma es un fenómeno económicamente significativo y una fuente de externalidades negativas sobre operadores menos sofisticados. Por otro lado, el HFT aumenta la comunalidad en rentabilidades y liquidez, lo que conlleva menores beneficios por diversificar y un mayor riesgo sistemático. Si el aumento del riesgo sistemático superase los beneficios derivados de los menores costes de negociar (menores primas por iliquidez), el HFT podría traer consigo un aumento del coste de oportunidad de las empresas y, como consecuencia, un efecto negativo sobre la inversión real en la economía. Finalmente, depender de los HFT para proveer liquidez podría aumentar la fragilidad del mercado, ya que estos proveedores de liquidez endógenos podrían desaparecer al unísono cuando el riesgo de proporcionar liquidez sea anormalmente alto o los beneficios anormalmente bajos. La evidencia existente apunta, sin embargo, a que este temor es infundado.

Concluimos también que, tanto el HFT globalmente considerado como los HFMM y los HFT oportunistas por separado, contribuyen a hacer los precios más eficientes. Los HFMM actualizan sus cotizaciones rápidamente ante cualquier señal informativa. Los HFT oportunistas negocian en la dirección de cambios permanentes en los precios a muy corto plazo o reducen el ruido en precios negociando en contra de desviaciones temporales respecto al valor de consenso. Como resultado, tanto los cambios en sus cotizaciones como las transacciones iniciadas por los HFT contribuyen significativamente a la formación del precio. Voces críticas con el HFT cuestionan la relevancia de estas mejoras en eficiencia por darse a frecuencias muy altas, a las que ni las empresas ni los operadores humanos toman decisiones. Sin embargo, estudios recientes sugieren que el HFT podría también ayudar a mejorar la eficiencia en horizontes que son relevantes para inversores y empresas. Otros señalan que mientras que el HFT, globalmente considerado, mejora la eficiencia en precios respecto a la

información existente (pública o privada), el HFT oportunista, mediante estrategias como el *back running*, podría desincentivar la adquisición de nueva información, lo que podría afectar a la eficiencia en precios a medio y largo plazo. La evidencia empírica existente apoya este argumento.

Tras años de mejorar la tecnología del mercado para adaptarla a las necesidades de la negociación algorítmica, algunos mercados están empezando a buscar formas de ralentizar el proceso de negociación con el fin de nivelar el campo de juego en cuanto a velocidad se refiere y frenar la carrera tecnológica en latencia. Algunas propuestas suponen variaciones mínimas sobre la microestructura de los mercados y son fáciles de implementar, como imponer retrasos intencionados y sistemáticos en el tiempo de procesamiento de órdenes. Otras opciones, sin embargo, suponen cambios drásticos y complejos, como sustituir la negociación continua por subastas de alta frecuencia. Estos cambios podrían encontrar la resistencia de los propios mercados, que podrían priorizar sus propios intereses (mayor volumen, mayores beneficios en mercados continuos) sobre los de los participantes en la negociación (menores costes de crear mercado, mayor liquidez, mayor bienestar en subastas de alta frecuencia).

Este trabajo muestra que bajo la etiqueta del HFT se incluyen múltiples estrategias y que, a la hora de evaluar su impacto sobre la calidad del mercado, es conveniente considerarlas de forma independiente. Del mismo modo, cualquier iniciativa dirigida a restringir la actividad del HFT o a eliminar las jerarquías en velocidad, debería diseñarse y evaluarse cuidadosamente en el contexto de las diferentes estrategias del HFT. Una iniciativa mal orientada podría tener efectos contrarios a los deseados sobre la calidad del mercado. Cualquier política dirigida a estimular los efectos positivos del HFT y reducir sus costes amplificaría el beneficio neto del HFT sobre la calidad de los mercados que, tras esta revisión de la literatura, se antoja mayormente positivo.

Con la consolidación de la industria del HFT y tras constatar que el HFT dista de la imagen perversa que retrata el *bestseller* de Michael Lewis, la negociación algorítmica ha dejado de copar los titulares de la prensa especializada. El mundo académico poco a poco va también desviando su atención del HFT hacia otros temas de mayor actualidad. Y es que muchas de las cuestiones inicialmente planteadas a raíz de la eclosión del HFT parecen haber recibido ya una respuesta satisfactoria. Por tanto, cabe esperar cierta desaceleración en el ritmo de producción de nuevos estudios académicos sobre HFT. No obstante, otras muchas cuestiones, no menores, algunas señaladas en este trabajo, se han tratado de manera tangencial y pueden dar fruto a nuevos proyectos de investigación que enriquezcan nuestro conocimiento sobre estos operadores amantes de la velocidad. Habrá que estar atentos.

## Referencias

- ABAD, D., MASSOT, M., NAWN, S., PASCUAL, R. y YAGÜE, J. (2022). Message traffic and short-term illiquidity in High-Speed Markets. *SSRN Electronic Journal*.

- ABAD, D. y PASCUAL, R. (2010). Switching to a temporary call auction in times of high uncertainty. *Journal of Financial Research*, 33(1), pp. 45–75.
- ACHARYA, V. V. y PEDERSEN, L. H. (2005). Asset pricing with liquidity risk. *Journal of Financial Economics*, 77(2), pp. 375–410.
- AIT-SAHALIA, Y. y SAGLAM, M. (2017). High Frequency Market Making: Implications for Liquidity. *SSRN Electronic Journal*.
- ALDRICH, E. M. y LÓPEZ VARGAS, K. (2020). Experiments in high-frequency trading: comparing two market institutions. *Experimental Economics*, 23(2), pp. 322–352.
- ALDRIDGE, I. (2009). *High-frequency trading: A practical guide to algorithmic strategies and trading systems*. Wiley.
- AMIHUD, Y. y MENDELSON, H. (1986). Asset pricing and the bid-ask spread. *Journal of Financial Economics*, 17(2), pp. 223–249.
- AMIHUD, Y., MENDELSON, H. y PEDERSEN, L. H. (2013). *Market Liquidity*. Cambridge Books.
- ANAND, A. y VENKATARAMAN, K. (2016). Market conditions, fragility, and the economics of market making. *Journal of Financial Economics*, 121(2), pp. 327–349.
- ANGEL, J. J., HARRIS, L. E. y SPATT, C. S. (2015). Equity trading in the 21<sup>st</sup> Century: An update. *Quarterly Journal of Finance*, 5(1), pp. 1–39.
- AQUILINA, M., BUDISH, E. y O'NEILL, P. (2022). Quantifying the high-frequency trading “arms race”. *The Quarterly Journal of Economics*, 137(1), pp. 493–564.
- BALDAUF, M. y MOLLNER, J. (2020). High-Frequency Trading and Market Performance. *Journal of Finance*, 75(3), pp. 1495–1526.
- BARON, M., BROGAARD, J., HAGSTRÖMER, B. y KIRILENKO, A. (2019). Risk and Return in High-Frequency Trading. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 54(3), pp. 993–1024.
- BARTLETT, R. P. y MCCRARY, J. (2015). Trying to force the SEC's hand on high-speed trading. *The New York Times*, 18 de diciembre.
- BARTLETT, R. P. y MCCRARY, J. (2019). How rigged are stock markets? Evidence from micro-second timestamps. *Journal of Financial Markets*, 45, pp. 37–60.
- BEBER, A. y PAGANO, M. (2013). Short-Selling Bans Around the World: Evidence from the 2007-09 Crisis. *Journal of Finance*, 68(1), pp. 343–381.
- BENOS, E., BRUGLER, J., HJALMARSSON, E. y ZIKES, F. (2017). Interactions among High-Frequency Traders. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 52(4), pp. 1375–1402.
- BESSEMBINDER, H., PANAYIDES, M. y VENKATARAMAN, K. (2009). Hidden liquidity: An analysis of order exposure strategies in electronic stock markets. *Journal of Financial Economics*, 94(3), pp. 361–383.
- BHATTACHARYA, A. y SAAR, G. (2021). Limit Order Markets under Asymmetric Information. *SSRN Electronic Journal*.
- BIAIS, B. y FOUCAULT, T. (2014). HFT and market quality. Bankers. *Markets and Investors*, 128, pp. 5–19.
- BIAIS, B., FOUCAULT, T. y MOINAS, S. (2015). Equilibrium fast trading. *Journal of Financial Economics*, 116(2), pp. 292–313.
- BIAIS B. y WOOLLEY P. (2011). *High frequency trading*. Toulouse University.
- BOEHMER, E., FONG, K. y WU, J. J. (2021). Algorithmic trading and market quality: International evidence. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 56(8), pp. 2659–2688.
- BOEHMER, E., LI, D. y SAAR, G. (2018). The competitive landscape of high-frequency trading firms. *Review of Financial Studies*, 31(6), pp. 2227–2276.

- BOEHMER, E., SAAR, G. y YU, L. (2005). Lifting the veil: an analysis of pre-trade transparency at the NYSE. *Journal of Finance*, 60, pp.783–815.
- BONGAERTS, D. y VAN ACHTER, M. (2021). Competition among liquidity providers with access to high-frequency trading technology. *Journal of Financial Economics*, 140(1), pp. 220–249.
- BOWLEY, G. (2010). Computers that trade on the news. *The New York Times*, 22 de diciembre.
- BOWLEY, G. (2011). The new speed of money, reshaping markets. *The New York Times*, 1 de enero.
- BROGAARD, J., CARRION A., MOYAERT, T., RIORDAN, R., SHKILKO, A. y SOKOLOV, K. (2018). High frequency trading and extreme price movements. *Journal of Financial Economics*, 128(2), pp. 253–265.
- BROGAARD, J. y GARRIOTT, C. (2019). High-Frequency Trading Competition. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 54(4), pp. 1469–1497.
- BROGAARD, J., HAGSTRÖMER, B., NORDÉN, L. y RIORDAN R. (2015). Trading Fast and Slow: Colocation and Liquidity. *Review of Financial Studies*, 28(12), pp. 3407–3443.
- BROGAARD, J., HENDERSHOTT, T. y RIORDAN, R. (2014). High-frequency trading and price discovery. *Review of Financial Studies*, 27(8), pp. 2267–2306.
- BROGAARD, J., HENDERSHOTT, T. y RIORDAN, R. (2017). High frequency trading and the 2008 short-sale ban. *Journal of Financial Economics*. 124(1), pp. 22–42.
- BROGAARD, J., HENDERSHOTT, T. y RIORDAN, R. (2019). Price Discovery without Trading: Evidence from Limit Orders. *Journal of Finance*, 74(4), pp. 1621–1658.
- BROLLEY, M. y MALINOVA, K. (2021). Informed liquidity provision in a limit order market. *Journal of Financial Markets*, 52, 100566.
- BUDISH, E., CRAMPTON, P. y SHIM, J. (2015). The high frequency trading arms race: frequent batch auctions as a market design response. *The Quarterly Journal of Economics*, 130 (November), pp. 1547–1621.
- CARTEA, A., JAIMUNGAL, S. y PENALVA, J. (2015). *Algorithmic and High-Frequency Trading*. Cambridge University Press.
- CARTEA, Á., PAYNE, R., PENALVA, J. y TAPIA, M. (2019). Ultra-fast activity and intraday market quality. *Journal of Banking & Finance*, 99, pp. 157–181.
- CHABOUD, A. P., CHIQUOINE, B., HJALMARSSON, E. y VEGA, C. (2014). Rise of the machines: Algorithmic trading in the foreign exchange market. *The Journal of Finance*, 69(5), pp. 2045–2084.
- CHAKRABARTY, B., COMERTON-FORDE, C. y PASCUAL, R. (2022). Identifying HFT activity without proprietary data. *SSRN Electronic Journal*.
- CHAKRABARTY, B., JAIN, P. K., SHKILKO, A. y SOKOLOV, K. (2021). Unfiltered market access and liquidity: Evidence from the SEC Rule 15c3-5. *Management Science*, 67, pp. 1183–1198.
- CHAKRABARTY, B., HENDERSHOTT, T., NAWN, S. y PASCUAL, R. (2022). Order exposure in high-frequency markets. *SSRN Electronic Journal*.
- CHAKRABARTY, B., HUANG, J. y JAIN, P. K. (2022). Effects of Leveled Speed on Market Quality and Exchange Competition. *SSRN Electronic Journal*.
- CHAKRABARTY, B., MOULTON, P. C. y PASCUAL, R. (2017). Trading system upgrades and short-sale bans: Uncoupling the effects of technology and regulation. *Journal of Empirical Finance*, 43(May), pp. 74–90.
- CHAKRABARTY, B., MOULTON, P. C. y WANG, X. (2022). Attention: How high-frequency trading improves price efficiency following earnings announcements. *Journal of Financial Markets*, 57(November), 100690.
- CHAKRABARTY, B. y PASCUAL, R. (2023). Stock liquidity and algorithmic market making during the COVID-19 crisis. *Journal of Banking & Finance*, 106415.

- CHORDIA, T., GREEN, T. C. y KOTTIMUKKALUR, B. (2018). Rent seeking by low-latency traders: Evidence from trading on macroeconomic announcements. *Review of Financial Studies*, 31(12), pp. 4650–4687.
- CHORDIA, T. y MIAO, B. (2020). Market efficiency in real time: Evidence from low latency activity around earnings announcements. *Journal of Accounting and Economics*, 70(2–3), 101335.
- CHORDIA, T., ROLL, R. y SUBRAHMANYAM, A. (2000). Commonality in liquidity. *Journal of Financial Economics*, 56(1), pp. 3–28.
- COCHRANE, J. H. (2013). Finance: function matters, not size. *Journal of Economic Perspectives*, 27(2), pp. 29–50.
- COMERTON-FORDE, C. y PUTNINS, T. J. (2015). Dark trading and price discovery. *Journal of Financial Economics*, 118, pp. 70–92.
- CONRAD, J., WAHAL, S. y XIANG, J. (2015). High-frequency quoting, trading, and the efficiency of prices. *Journal of Financial Economics*, 116(2), pp. 271–291.
- DEGRYSE, H., DE WINNE R., GRESSE, C. y PAYNE, R. (2020). Cross-venue liquidity provision: High frequency trading and ghost liquidity. *SSRN Electronic Journal*.
- DELLAVIGNA, S. y POLLET, J. (2009). Investor inattention and Friday earnings announcements. *The Journal of Finance*, 64(2), pp. 709–749.
- DING, S., HANNA, J. y HENDERSHOTT, T. (2014). How slow is the NBBO? A comparison with direct exchange feeds. *Financial Review*, 49, pp. 313–332.
- DRAKE, M., ROULSTONE, D. y THORNOCK, J. (2015). The determinants and consequences of information acquisition via EDGAR. *Contemporaneous Accounting Research*, 32, pp. 1128–61.
- DUGAST, J. y FOUCAULT, T. (2018). Data abundance and asset price informativeness. *Journal of Financial Economics*, 130(2), pp. 367–391.
- DUHIGG, C. (2009). Stock traders find speed pays, in milliseconds. *The New York Times*, 23 de julio.
- EASLEY, D., LÓPEZ DE PRADO, M. y O'HARA, M. (2013). High Frequency Trading. Risk Books.
- EGGINTON, J. F., VAN NESS, B. F. y VAN NESS, R. A. (2016). Quote Stuffing. *Financial Management*, 45(3), pp. 583–608.
- EUROPEAN SECURITIES AND MARKET AUTHORITY (ESMA). (2014). High-frequency trading activity in EU equity markets. *Economic Report*, No. 1. (<https://www.esma.europa.eu>).
- FOUCAULT, T. (2013). Algorithmic trading: Issues and preliminary evidence. En F. ABERGEL, J. BOUCHAUD, T. FOUCAULT, C. LEHALLE y M. ROSENBAUM, *Market Microstructure: Confronting Many Viewpoints* (pp. 1–40). Wiley.
- FOUCAULT, T., HOMBERT, J. y ROŞU, I. (2016). News trading and speed. *Journal of Finance*, 71(1), pp. 335–382.
- FOUCAULT, T., KADAN, O. y KANDEL, E. (2013). Liquidity cycles and make/take fees in electronic markets. *The Journal of Finance*, 68(1), pp. 299–341.
- FOUCAULT, T., KOZHAN, R. y THAM, W. W. (2017). Toxic Arbitrage. *The Review of Financial Studies*, 30(4), pp. 1053–1094.
- FOUCAULT, T., PAGANO, M. y RÖELL, A. (2007). *Market Liquidity: Theory, Evidence and Policy*. Oxford University Press.
- FRIEDERICH, S. y PAYNE, R. (2015). Order-to-trade ratios and market liquidity. *Journal of Banking and Finance*, 50, pp. 214–223.
- FRINO, A., MOLLICA, V. y WEBB, R. I. (2014). The impact of co-location of securities exchanges' and traders' computer servers on market liquidity. *Journal of Futures Markets*, 34(1), pp. 20–33.
- GARVEY, R. y WU, F. (2010). Speed, distance, and electronic trading: New evidence on why location matters. *Journal of Financial Markets*, 13(4), pp. 367–396.

- GLOSTEN, L. R. y MILGROM, P. R. (1985). Bid, ask, and transaction prices in a specialist market with heterogeneously informed traders. *Journal of Financial Economics*, 14, pp. 71–100
- GOLDSTEIN, M. A., HU, G. y MENG, J. G. (2009). An analysis of liquidity across markets: Execution costs on the NYSE versus electronic markets. En J. MORREY y A. GUYTON (eds.), *Liquidity, Interest Rates and Banking (Financial Institutions and Services)*, capítulo 3. New York: Nova Publishers.
- GOLDSTEIN, M. A., KUMAR, P. y GRAVES, F. C. (2014). Computerized and high-frequency trading. *Financial Review*, 49(2), pp. 177–202.
- HASBROUCK, J. (1995). One security, many markets: Determining the contributions to price discovery. *The Journal of Finance*, 50, pp. 1175–1199.
- HASBROUCK, J. (2018). High-Frequency Quoting: Short-Term Volatility in Bids and Offers. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 53(2), pp. 613–641.
- HASBROUCK, J. (2021). Price Discovery in High Resolution. *Journal of Financial Econometrics*, 19(3), pp. 395–430.
- HASBROUCK, J. y SAAR, G. (2009). Technology and liquidity provision: The blurring of traditional definitions. *Journal of Financial Markets*, 12, pp. 143–172.
- HASBROUCK, J. y SAAR, G. (2013). Low-latency trading. *Journal of Financial Markets*, 16(4), pp. 646–679.
- HARRIS, L. y HASBROUCK, J. (1996). Market vs. limit orders: The SuperDOT evidence on order submission strategy. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 31, pp. 213–231.
- HENDERSHOTT, T., JONES, C. M. y MENKVELD, A. J. (2011). Does Algorithmic Trading Improve Liquidity? *The Journal of Finance*, 46(1), pp. 1–34.
- HENDERSHOTT, T. y MENKVELD, A. J. (2014). Price pressures. *Journal of Financial Economics*, 114, pp. 405–423.
- HENDERSHOTT, T. y MOULTON, P. C. (2011). Automation, speed, and stock market quality: The NYSE's Hybrid. *Journal of Financial Markets*, 14(4), pp. 568–604.
- HENDERSHOTT, T. y RIORDAN, R. (2013). Algorithmic trading and the market for liquidity. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 48(4), pp. 1001–1024.
- HIRSCHEY, N. (2021). Do high-frequency traders anticipate buying and selling pressure? *Management Science*, 67(6), pp. 3321–3345.
- HIRSHLEIFER, D., LIM, S. y TEOH, S. H. (2009). Driven to distraction: extraneous events and underreaction to earnings news. *The Journal of Finance*, 64(5), pp. 2289–2325.
- HO, T. S. y STOLL, R. (1983). The dynamics of dealer markets under competition. *The Journal of Finance*, 38(4), pp. 1053–1074.
- HOFFMANN, P. (2014). A dynamic limit order market with fast and slow traders. *Journal of Financial Economics*, 113(1), pp. 156–169.
- HONG KONG INSTITUTE FOR MONETARY AND FINANCIAL RESEARCH (HKIMR). (2021). Algorithmic and high-frequency trading in Hong Kong's equity market: Adoption, market impact and risk management. *Applied Research Report*, No.1/2021.
- HU, G. C., PAN, J. y WANG, J. (2017). Early peek advantage? Efficient price discovery with tiered information disclosure. *Journal of Financial Economics*, 126, pp. 399–421.
- HULL, J. C. (2021). *Options, Futures, and other Derivatives*. Pearson.
- INDRIAWAN, I., PASCUAL, R. y SHKILKO, A. (2022). On the effects of continuous trading. *SSRN Electronic Journal*.
- JAIN, P. K. (2005). Financial market design and equity premium: Electronic versus floor trading. *The Journal of Finance*, 40(6), pp. 2955–2985.

- JOHNSON, B. (2010). *Algorithmic trading and DMA: An introduction to direct access trading strategies*. 4Myeloma Press.
- JOVANOVIĆ, B. y MENKVELD, A. J. (2016). Middlemen in Limit Order Markets. *SSRN Electronic Library*.
- JØRGENSEN, K., SKJELTORP, J. y ØDEGAARD, B. A. (2018). Throttling hyperactive robots – Order-to-trade ratios at the Oslo Stock Exchange. *Journal of Financial Markets*, 37, pp. 1–16.
- KHAPKO, M. y ZOICAN, M. (2021). Do speed bumps curb low-latency investment? Evidence from a laboratory market. *Journal of Financial Markets*, 55, 100601.
- KHOMYN, M. y PUTNINS, Š, T. J. (2021). Algos gone wild: What drives the extreme order cancellation rates in modern markets? *Journal of Banking and Finance*, 129, pp. 1-16.
- KIRILENKO, A., KYLE, A., SAMADI, M. y TUZUM, T. (2017). The Flash Crash: High-frequency trading in an electronic market. *The Journal of Finance*, 72(3), pp. 967–998.
- KOVAC, P. (2014). *Flash Boys: Not So Fast: An Insider's Perspective on High-Frequency Trading*. Directissima Press.
- KWAN, A., PHILIP, R. y SHKILKO, A. (2020). The Conduits of Price Discovery: A Machine Learning Approach. *SSRN Electronic Journal*.
- LAUGHLIN, G., AGUIRRE, A. y GRUNDFEST, J. (2014). Information transmission between financial markets in Chicago and New York. *Financial Review*, 49, pp. 283-312.
- LEE, C. M. C. y WATTS, E. M. (2021). Tick size tolls: Can a trading slowdown improve earnings news discovery? *Accounting Review*, 96(3), pp. 373–401.
- LEWIS, M. (2014). *Flash boys: A Wall Street Revolt*. Norton & Company.
- LIU, W. (2009). Monitoring and limit order submission risks. *Journal of Financial Markets*, 12(1), pp. 107-141.
- MALCENIECE, L., MALCENIEKS, K. y PUTNINS, Š, T. J. (2019). High frequency trading and comovement in financial markets. *Journal of Financial Economics*, 134(2), pp. 381–399.
- MALINOVA, K., PARK, A. y RIORDAN, R. (2018). Do Retail Investors Suffer from High Frequency Traders? *SSRN Electronic Journal*.
- MENKVELD, A. J. (2013). High frequency trading and the new market makers. *Journal of Financial Markets*, 16(4), pp. 712–740.
- MENKVELD, A. J. (2016). The Economics of High-Frequency Trading: Taking Stock. *Annual Review of Financial Economics*, 8, pp. 1–24.
- NARANG, R. (2013). *Inside the black box: A simple guide to quantitative and high frequency trading*. Wiley.
- O'HARA, M. (1995). *Market Microstructure Theory*. Blackwell.
- O'HARA, M. (2015). High frequency market microstructure. *Journal of Financial Economics*, 116(2), pp. 257–270.
- PARDO, A. y PASCUAL, R. (2012). On the hidden side of liquidity. *The European Journal of Finance*, 18(10), pp. 949–967.
- PATTERSON, S. (2012). *Dark pools: The rise of A.I. trading machines and the looming threat to Wall Street*. Cornerstone Digital.
- POPPER, G. (2012). On Wall Street, the rising cost of faster trades. *The New York Times*, 13 de agosto.
- RIORDAN, R. y STORKENMAIER, A. (2012). Latency, liquidity and price discovery. *Journal of Financial Markets*, 15(4), pp. 416–437.
- RÖSCH, C.G. y KASERER, C. (2014). Reprint of: Market liquidity in the financial crisis: The role of liquidity commonality and flight-to-quality. *Journal of Banking & Finance*, 45(1), pp. 152–170.
- SECURITIES EXCHANGE COMMISSION (SEC). (2010). Concept release on equity market structure. (<https://www.sec.gov/rules/concept/2010/34-61358.pdf>).

- SECURITIES EXCHANGE COMMISSION (SEC). (2014). Equity market structure literature review. Part II: High frequency trading (<http://www.sec.gov/marketstructure/research>).
- SHKILKO, A. y SOKOLOV, K. (2020). Every cloud has a silver lining: Fast trading, microwave connectivity, and trading costs. *The Journal of Finance*, 75(6), pp. 2899–2927.
- SOFIANOS, G. y WERNER, I. (2000). The trades of NYSE floor brokers. *Journal of Financial Markets*, 3, pp. 139–176.
- SUBRAHMANYAM, A. y ZHENG, H. (2016). Limit order placement by high-frequency traders. *Borsa Istanbul Review*, 16(4), pp. 185–209.
- VAN KERVEL, V. (2015). Competition for Order Flow with Fast and Slow Traders. *Review of Financial Studies*, 28(7), pp. 2094–2127.
- WELLER, B. M. (2018). Does Algorithmic Trading Reduce Information Acquisition? *The Review of Financial Studies*, 31(6), pp. 2184–2226.
- YANG, L. y ZHU, H. (2020). Back-Running: Seeking and Hiding Fundamental Information in Order Flows. *The Review of Financial Studies*, 33(4), pp. 1484–1533.