



TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS

OPTIMIZACIÓN DE OPORTUNIDADES DE ARBITRAJE EN MERCADOS DE DIVISAS

Autor

Pablo Hernández Zamora

Tutor

José Ángel Capitán Gómez



AÑO ACADÉMICO 2021-2022

POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Pablo Hernández Zamora, autor del TFG "Optimización de oportunidades de arbitraje en mercados de divisas", bajo la tutela del profesor José Ángel Capitán Gómez, declara que este trabajo es original, en el sentido de que ha puesto el mayor empeño en citar debidamente todas las fuentes utilizadas.

En Madrid, a 2 de julio de 2022



Fdo: Pablo Hernández Zamora



RESUMEN

A lo largo de este trabajo expondremos detalladamente las bases necesarias para el desarrollo de una herramienta informática, cuyo fin reside en el aprovechamiento de las ineficiencias de los mercados financieros para obtener un beneficio económico, con un riesgo prácticamente nulo. La idea radica en la compraventa de divisas en los distintos mercados financieros. A esta práctica se le conoce como arbitraje.

Profundizaremos en la teoría que hay detrás de este método de inversión, los algoritmos necesarios para poder llevarlo a cabo, y expondremos finalmente los resultados macroeconómicos obtenidos tras nuestro estudio.

Cabe destacar que, pese a desarrollar la idea del arbitraje, esta herramienta proporciona mucha información, desde la oscilación temporal del precio de las diferentes divisas escogidas en un ámbito macroeconómico, hasta los momentos idóneos para poder llevar a cabo esta práctica minimizando aún más el riesgo.

Desarrollaremos tanto la teoría de grafos necesaria para entender la idea de esta herramienta, como los algoritmos matemáticos de minimización propuestos para nuestro método, tales como el algoritmo de Bellman-Ford o el método de optimización “Simulated Annealing”.

La finalidad del trabajo es la creación de una herramienta capaz de encontrar oportunidades de arbitraje y, sobre todo, conseguir extraer toda la información con respecto a la volatilidad o no de las diferentes divisas, dejando en segundo plano cuestiones como la optimización computacional que el programa ha de poseer para poder ser utilizado en un caso real, ya que las ventanas de arbitraje suelen darse en un muy corto periodo de tiempo.

Por último, visualizaremos cómo trabaja el programa creado, y lo pondremos a prueba en la implementación de un caso real.

Palabras clave: Arbitraje, mercados financieros, algoritmo, rutas, divisas, moneda, programa, grafos, Python, Algoritmos de Dijkstra y de Bellman-Ford, método de optimización “Simulated Annealing”, aleatorización, economía, bolsa de valores



ABSTRACT

Throughout this end-of-degree thesis we will explain and develop of a computer program, aimed at taking advantage of the inefficiencies of the financial markets to optimize an economic benefit, with practically zero risk. The idea lies in exchange currencies in different financial markets. This practice is known as arbitrage.

We first explain the theory behind this investment method, the algorithms necessary to carry it out, and finally we analyze the macroeconomic results obtained after our study. This tool gives us a lot of information, ranging from the temporal variation of the price of the different currencies, in a macroeconomic scenario, to the optimal moments in which arbitrage has to be carried minimizing even more the overall risk.

We will develop both the graph theory necessary to understand this method, as well as the mathematical minimization algorithms used, such as the Bellman-Ford algorithm or Simulated Annealing optimization technique.

The purpose of the work is the creation of a tool capable of finding arbitrage opportunities and, more importantly, to extract all the information regarding the volatility or not of the different currencies, leaving in the background issues such as the computational optimization that the program must have to be used in a practical situation, since arbitrage windows usually occur in a very short period.

Finally, we will visualize how the created program works, and we will test it in the implementation of a real case.

Keywords: Arbitrage, stock exchange, financial markets, algorithm, routes, currencies, optimization, graphs, Python, Dijkstra and Bellman-Ford algorithms, Simulated Annealing optimization technique, metaheuristic algorithms, economics



ÍNDICE

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD.....	1
RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3
GLOSARIO DE DIVISAS	6
1 INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 Mercado de divisas.....	10
1.2 Depreciación de divisas.....	11
1.2.1 Efecto de la depreciación.....	11
1.3 Apreciación de divisas	12
1.3.1 Efecto de la apreciación	12
1.4 Arbitraje	13
1.4.1 Tipos de arbitraje.....	14
2 CONCEPTOS BÁSICOS	16
2.1 Teoría de grafos	16
2.1.1 Tipos de grafo.....	17
2.2 Algoritmos de maximización de beneficio	19
2.2.1 Algoritmo de Bellman-Ford	20
2.2.2 Algoritmo “Simulated Annealing”.....	20
2.2.3 Aleatorización no dirigida.....	22
2.3 Procedimiento.....	23
2.4 Obtención de datos.....	25
3 RESULTADOS	27
3.1 Caso real	27
3.2 Análisis estadístico	27
3.2.1 Histograma de máximos beneficios	27
3.2.2 Probabilidades de oportunidades de arbitrajes exitosas	29
3.2.3 Ley de potencias	32
3.2.4 Estudio de picos de beneficios	34
3.2.5 Moneda que retornar el mayor beneficio.....	40



3.2.6	Correlación entre beneficio y longitud de la ruta	42
3.2.7	Correlación entre la longitud del camino y su número de aparición	43
4	CONCLUSIONES	44
5	REFERENCIAS	46
6	ANEXOS.....	49
6.1	Pseudocódigo Bellman-Ford.....	49
6.2	Código modificado para aplicación del algoritmo Bellman-Ford	50
6.3	Función que almacena todos los datos de la red	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1	Representación de cambios entre divisas	15
Fig. 2	Visualización del camino que retorna beneficio	15
Fig. 3	Representación entre nodos y enlace.....	17
Fig. 4	Grafo dirigido	17
Fig. 5	Grafo no dirigido sin ordenar.....	18
Fig. 6	Grafo no dirigido completo	18
Fig. 7	Grafo dirigido con pesos entre enlaces.....	19
Fig. 8	Función objetivo a minimizar.....	21
Fig. 9	Representación gráfica de minimización de función objetivo	22
Fig. 10	Gráfica de máximo beneficio para una única realización del algoritmo.....	28
Fig. 11	Gráfica de máximos beneficios para 5 realizaciones.....	29
Fig. 12	Correlación del número de apariciones de la divisa agrupándola por tipo de beneficio	33
Fig. 13	Histograma suavizado mediante logaritmos	34
Fig. 14	Gráfica que representa el tipo de cambio entre EUR y ZWL el 19/05/2022.....	38
Fig. 15	Gráfica que representa el tipo de cambio entre ZWL y BYN el 19/05/2022	39
Fig. 16	Gráfica que representa el tipo de cambio entre BYN y EUR el 19/05/2022	39
Fig. 17	Porcentaje de aparición de monedas en rutas con un beneficio superior al 20%	40
Fig. 18	Porcent. aparición de monedas en rutas del 1%	41
Fig. 19	Porcent. aparición de monedas en rutas del 5%	41
Fig. 20	Diagrama de dispersión entre longitud de rutas y el beneficio retornado.....	43
Fig. 21	Diagrama de cajas del número de caminos divididos por su grado	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Agrupación de valores.....	32
Tabla 2	Representación ordenada de las 100 mejores rutas de beneficio del modelo 2	36



GLOSARIO DE DIVISAS¹

AED: Dirham DE EAU	DKK: Corona danesa	KWD: Dinar kuwaití
AFN: Afgani afgano	DOP: Peso dominicano	KYD: Dólar de las Islas Cayman
ALL: Lek	DZD: Dinar argelino	KZT: Tenge kazajo
AMD: Dram armenio	EGP: Libra egipcia	LAK: Kip laosiano
ANG: Florín holandés	ERN: Nakfa	LBP: Libra libanesa
AOA: Kwanza angoleño	ETB: Birr etíope	LKR: Rupia de Sri Lanka
ARS: Peso argentino	EUR: Euro	LRD: Dólar liberiano
AUD: Dólar tuvaluano	FJD: Dólar fijiano	LSL: Loti
AWG: Florín arubeño	FKP: Libra malvinense	LYD: Dinar libio
AZN: Manat azerbaiyano	GBP: Libra esterlina	MAD: Dirham marroquí
BAM: Marco bosnioherzegovino	GEL: Lari	MDL: Leu Moldavo
BBD: Dólar de Barbados	GHS: Cedi	MGA: Ariary malgache
BDT: Taka	GIP: Libra gibraltareña	MKD: Dinar
BGN: Lev	GMD: Dalasi	MMK: Kyat birmano
BHD: Dinar bareiní	GNF: Franco guineano	MNT: Tugrik
BIF: Franco burundés	GTQ: Quetzal	MOP: Pataca
BMD: Dólar bermudeño	GYD: Dólar guyanés	MUR: Rupia de Mauricio
BND: Dólar de Brunei	HKD: Dólar de Hong Kong	MVR: Rupia de maldivas
BOB: Boliviano	HNL: Lempira	MWK: Kwacha malauí
BRL: Real brasileño	HRK: Kuna	MXN: Peso mexicano
BSD: Dólar bahameño	HTG: Gourde	MYR: Ringgit malayo
BTN: Ngultrum butanés	HUF: Forinto húngaro	MZN: Metical mozambiqueño
BWP: Pula	IDR: Rupia indonesia	NAD: Dólar de Namibia
BYN: Rublo bielorruso	ILS: Nuevo séquel	NGN: Naira
BZD: Dólar beliceño	INR: Rupia india	NIO: Córdoba oro
CAD: Dólar canadiense	IQD: Dinar iraquí	NOK: Corona noruega
CDF: Franco congoleño	IRR: Rial iraní	NPR: Rupia nepalí
CHF: Franco suizo	ISK: Corona islandesa	NZD: Dólar neozelandés
CLP: Peso chileno	JMD: Dólar jamaquino	OMR: Rial omaní
CNY: Renminbi	JOD: Dinar jordano	PAB: Balboa
COP: Peso colombiano	JPY: Yen	PEN: Nuevo Sol
CRC: Colón costarricense	KES: Chelín keniano	PGK: Kina
CUP: Peso cubano	KGS: Som	PHP: Peso filipino
CVE: Escudo caboverdiano	KHR: Riel camboyano	PKR: Rupia pakistaní
CZK: Czech Koruna	KMF: Franco comorense	PLN: Zloty
DJF: Franco yibutiano	KRW: Won	PYG: Guaraní

¹ [lista divisas](#)



QAR: Riyal catari	SYP: Libra siria	UZS: Som uzbeko
RON: Leu rumano	SZL: Lilangeni	VND: Dong
RSD: Dinar serbio	THB: Baht	VUV: Vatu
RUB: Rublo ruso	TJS: Somoni	WST: Tala
RWF: Franco ruandés	TMT: Manat turcomano	XAF: Franco CFA de África Central
SAR: Riyal saudí	TND: Dinar tunecino	XCD: Dólar del Caribe oriental
SBD: Dólar de Islas Salomón	TOP: Pa'anga	XDR: SDR (Derecho Especial de Retiro)
SCR: Rupia de Seychelles	TRY: Lira turca	XOF: Franco CFA de África Occidental
SDG: Libra sudanesa	TTD: Dólar de Trinidad y Tobago	XPF: Franco CFP
SEK: Corona sueca	TWD: Nuevo dólar de Taiwán	YER: Rial yemení
SGD: Dólar de Singapur	TZS: Chelín tanzano	ZAR: Rand
SHP: Libra de Santa Helena	UAH: Grivnia	ZMW: Kwacha zambiano
SLL: Leone	UGX: Chelín ugandés	ZWL: Dólar zimbabuense
SOS: Chelín somalí	USD: Dólar estadounidense	
SRD: Dólar de Surinam	UYU: Peso uruguayo	
SSP: Libra sursudanesa		



1 INTRODUCCIÓN

A medida que avanzamos como sociedad, las economías mundiales encuentran maneras diferentes de aumentar su capital, con el fin de mejorar consecutivamente el nivel de vida de todas las personas. Encontramos diversas formas de poder obtener capital, algunas de ellas son más sofisticadas con lo que nos retornan una mayor rentabilidad, pero a su vez conlleva un mayor riesgo de pérdida de capital.

Generalmente, el mercado destinado a poner en práctica estos métodos de inversión para poder generar capital, es el mercado de valores. En la actualidad y desde 1831 en España, se puso en marcha la interacción con dicho mercado.

El término “valor”, en este contexto, se refiere a cualquier instrumento financiero negociable, y algunos en los que podemos invertir son: acciones de una compañía, compra de bonos, adquisición de deuda, especulación de activos en el mercado “spot” o en el mercado “forward”, compraventa instantánea de bienes, acciones, monedas, etc.

El mercado “spot” es un tipo de mercado al contado en el cual las transacciones se compran o venden en un muy corto periodo de tiempo. Como contraposición, nos encontramos el mercado “forward” o mercado a futuros, donde la compraventa de activos se realiza en un lapso de tiempo más elevado.

Este último mercado, da lugar a los contratos “forward”, acuerdos entre dos partes que estipulan la compra o venta de un activo a un precio específico y en una fecha de vencimiento predefinida. Esto resulta de gran utilidad a la hora de asegurar el precio de venta de un bien en un futuro, para evitar las posibles pérdidas que las fluctuaciones del precio de ese bien pudieran ocasionar. Un ejemplo sería el reciente incremento del precio de la gasolina. [1]

Otro uso de estos contratos está destinado a la especulación, acción basada en la esperanza de que el precio de un bien suba o baje, basándose en hechos macroeconómicos o por pura intención del individuo, con la finalidad de generar beneficio.

El instrumento financiero que definirá la esencia del presente trabajo se le conoce como divisa, y el método a seguir para la obtención de beneficio con el movimiento de estas, se le conoce como arbitraje triangular.

Si bien no es una tarea sencilla, podemos obtener grandes ganancias a lo largo del tiempo, aplicando los conocimientos adecuados. Existen multitud de mercados financieros en la actualidad, distribuidos alrededor del mundo y situados en las



principales potencias económicas. Algunos de estos mercados son: NASDAQ, IBEX 35 (bolsa de Madrid), bolsa de Nueva York, de Tokio, de Shanghái, de Hong Kong, de Australia o bolsa de Londres, por nombrar unos pocos.

Concretamente, la distancia física que separa todos estos mercados produce latencias a la hora de actualizar el valor monetario en todos los mercados adyacentes donde opere el bien.

Cuando un bien aumenta su valor en un determinado mercado, este debería aumentar también en el resto de mercados donde opere este bien y en el mismo intervalo de tiempo, pero no es posible debido, principalmente, al flujo de información el cual no es instantáneo en todos los mercados. Esto da lugar a la existencia de discrepancias en el valor monetario del activo el cual debería tener paridad, produciendo que, por un instante muy corto de tiempo, la diferencia de precios entre distintos mercados pueda ser explotada para obtener beneficios.

Extrapolando este proceso a un ejemplo, el valor de una acción de una compañía que ha salido a bolsa, debería mantener su valor en todos los mercados de forma constante, ya que se trata de la misma compañía, pero debido a la ineficiencia en los flujos de información entre mercados, puede que, cuando esa acción cambie de valor en el mercado NASDAQ, en un momento concreto, en el mercado IBEX 35 esta acción siga manteniendo su valor antiguo, produciendo posibles oportunidades de beneficio en un muy corto periodo de tiempo.

El arbitraje triangular, aprovecha este principio de desigualdad, actuando sobre las desigualdades producidas entre divisas de distintos países en más de un mercado a la vez. Este método tiene riesgo prácticamente nulo, pues no se basa en la especulación de las divisas, sino en encontrar el camino correcto a seguir entre divisas mediante algoritmos matemáticos.

El propio hecho de que el riesgo sea muy bajo da lugar a que las ganancias generalmente sean también muy bajas, aunque puede haber casos puntuales donde la rentabilidad sea considerablemente alta.

Estos casos, los veremos a lo largo del trabajo y realizaremos un estudio exhaustivo de ellos, pero debemos saber que son casos que muy concretos y que pueden generarse con mayor facilidad cuando un mercado concreto atraviesa un ciclo económico de mayor incertidumbre que otro.



Esto se debe a situaciones puntuales que permiten oportunidades de arbitraje considerables, hechos que pueden repercutir tanto positiva como negativamente en el valor de las divisas, depreciando o apreciando el valor de estas en momentos concretos, creando así mayores beneficios a la hora de explotar estas diferencias.

El arbitraje proporciona beneficios apreciables a personas físicas o jurídicas que posean una gran cantidad de capital, lo que hará que por muy pequeño que sea el beneficio, este seguirá siendo notable en términos absolutos. El mercado donde se llevan a cabo estas interacciones se le conoce como mercado de divisas o “Foreign Exchange” (FX).

A continuación, explicaremos con detalle toda la terminología que sirve de base para entender los principios en los que se basa el arbitraje.

1.1 Mercado de divisas

El mercado de divisas o “Foreign Exchange” (FX) es un mercado no organizado, en el cual se compra y se venden las distintas monedas que hay en el mundo.

Los mercados no organizados son también llamados descentralizados u “Over The Counter” (OTC), debido a que no poseen un lugar físico donde se negocien los bienes. La característica de no tener una cámara de compensación se traduce en la no existencia de terceras partes actuando como intermediarios. [2] [3] Un ejemplo de intermediario sería la existencia de un banco financiero entre 2 partes de un acuerdo, tratando de asegurar una cuantía mínima que cubra las pérdidas en caso de que una de las partes incumpla su obligación.

Estos casos, donde sí existe cámara de compensación, se dan en los mercados organizados, donde, a diferencia del mercado OTC, la existencia de intermediarios garantiza una mínima seguridad a la hora de operar en cualquier mercado.

El mercado de divisas actualmente cuenta con un volumen de negociación diario de unos 4 trillones de dólares. Como hemos mencionado con anterioridad, este mercado no cuenta con órgano de compensación, es un mercado no organizado, por lo tanto, cada operación se cierra entre un contrato particular entre las partes.

Este mercado se encuentra operativo las 24 horas del día, durante 5 días a la semana, comenzando sus labores el domingo por la tarde, con la apertura del mercado en Australia y finalizando el viernes con el cierre del mercado de Estados Unidos (Nueva York).



Pese a que permanezca abierto las 24 horas del día, hay horas concretas donde el flujo de transacciones sea menor, debido a que un determinado país involucrado en ese mercado esté en período nocturno, dejando únicamente las transacciones de clientes de otros países donde, por su zona geográfica, la hora de operar en ese mercado les sea conveniente.

Por lógica sería correcto asumir que, en torno a mediodía, tanto residentes del país como no residentes pueden coincidir realizando transacciones. Esto nos lleva a pensar que cuanto mayor sea la afluencia de gente, menores oportunidades de arbitraje habrá, pues un mayor flujo de transacciones hará que la diferencia entre divisas se produzca por menos tiempo, debido a la ley natural de la oferta y la demanda, las divisas tenderán a converger en un punto de igualdad para todas ellas, como en principio debería ocurrir teóricamente.[5]

1.2 Depreciación de divisas

La depreciación de una divisa surge en un escenario con libre flotación del tipo de cambio que es establecido por la interacción de la oferta y demanda del mercado.[6]

Otro término importante en este contexto es el de la devaluación de la moneda, aunque parezca muy similar al anterior, este se utiliza cuando el gobierno de un país fija un tipo de cambio e informa que su valor pasará de un valor a otro más elevado.

Conseguir entender la diferencia entre ambas terminologías nos ayuda a percibir cómo la coyuntura económica y los eventos políticos pueden influir, y de hecho estudiaremos casos muy particulares donde sucede esto, en el valor de la divisa.[1]

1.2.1 Efecto de la depreciación

La enciclopedia financiera define la depreciación de la divisa como “la pérdida de valor de la moneda de un país con respecto a una o más monedas de referencia extranjeras, que se produce, por lo general, en un sistema de tipo de cambio flotante”.

Podemos decir que, si una divisa se deprecia, significa que ha bajado su valor en comparación con la moneda de otro país, incrementando así la volatilidad de esta [8].

- Efectos en vendedores de exportación

Si un negocio estadounidense, por ejemplo, se especializa en la venta de exportaciones, una depreciación del dólar causa que sus productos se vuelvan más baratos para sus clientes extranjeros. Por lo tanto, sube la demanda externa de bienes producidos en Estados Unidos y de activos basados en dólares.



- Efectos en compradores de exportación

Si los consumidores de Estados Unidos compran exportaciones de otros países, una depreciación del dólar ocasionaría que, al comprar bienes del exterior, estos les resulten más caros que comprar el mismo bien en terreno local, donde se maneje el mismo tipo de divisa.

Esto se debe en gran medida a que las importaciones se encarecen cuando la moneda nacional se deprecia.

1.3 Apreciación de divisas

El caso opuesto al mencionado en el punto anterior es la apreciación de divisas. Se trata en el aumento del valor de la moneda de un país con respecto a una o más monedas de referencias extranjera, que, normalmente, se produce en un sistema de cambios flotantes.[10]

Los motivos que pueden ocasionar el aumento del valor de la divisa son variados y normalmente relacionados con una elevada demanda de ella, aunque también pueden deberse a causas geopolíticas como hemos podido comprobar con este último conflicto protagonizado por Rusia y Ucrania, donde podemos ver cómo aumenta la incertidumbre en los mercados internacionales debido a este suceso. Esto genera un incremento en la demanda de activos refugio (como el dólar), debido a su uso tan expandido en gran parte de los mercados financieros, lo que produce que, al haber mayor demanda, los activos refugio aumenten su valor.

1.3.1 Efecto de la apreciación

El aumento en el valor de la divisa va a tener diferentes efectos sobre la economía nacional, entre ellos tenemos los siguientes:

- Un deterioro en la actividad económica, en la medida en la que se registrará un descenso en la demanda agregada como consecuencia del descenso en las exportaciones y al aumento en las importaciones.
- Un deterioro en la balanza comercial y en la balanza de bienes y servicios, siempre que el efecto volumen de aumento en las importaciones sea superior al efecto precio de abaratamiento (es la llamada condición de Marshall- Lerner)
- Una reducción en la tasa de inflación, debido al abaratamiento de los bienes y servicios importados cuando se expresan en una moneda nacional.
- Un deterioro en la competitividad de los productos de fabricación nacional respecto a los productos fabricados en el exterior.
- Una mejora en la relación de intercambio debido a un mayor uso de la misma divisa como moneda de cambio para cerrar acuerdos entre empresas.



1.4 Arbitraje

En el resumen hemos nombrado brevemente la idea del arbitraje para un caso concreto como son las divisas, pero en la práctica, existen varios tipos de arbitraje.

El concepto de arbitraje, a grandes rasgos, engloba toda actividad que se base en la compraventa de un mismo activo en mercados diferentes, aprovechando las desigualdades monetarias, para retornar un beneficio.

Pero esto no siempre es posible, ya que la propia explotación del arbitraje produce un efecto estabilizador, el cual hace que los mercados consigan compensar las diferencias y alcancen el equilibrio que debería poseer de manera natural. Esto se produce debido al principio de oferta y demanda, donde la oferta de un bien con un precio menor hace que más personas lo adquieran en mayor cantidad que en un mercado donde este se encuentre más caro, produciendo así un incremento en los precios de este bien. [11]

Por el contrario, en los mercados donde este bien se encontrase más caro, la personas que han adquirido el bien por un importe menor venderán este mismo en el mercado con el precio mayor, produciendo así que el valor del bien disminuya por haber gran cantidad de personas ofertando el mismo producto.

Esto converge en el punto de igualdad, donde, en mercados donde existía una variación en el precio de un mismo bien, convergen en el punto medio alcanzado por el propio mercado. Por este motivo, las ventanas de aprovechamiento del arbitraje son muy escasas en el tiempo, del orden de unos pocos segundos, ya que la propia existencia de una desigualdad para una misma divisa produce que las personas exploten esta diferencia, llegando así a un punto de igualdad.[12]

Cuando las oportunidades de arbitraje no existen debido a que los precios de un mismo activo tienen las mismas magnitudes, hablamos de equilibrio de arbitraje.

De acuerdo con todo esto, podemos concluir en que el arbitraje es todo lo contrario a la especulación. Mientras que el arbitrajista en esta operación tiene el activo en su poder unos pocos segundos hasta que consigue venderlo, corriendo muy poco riesgo durante la operación, el especulador trata de quedarse el activo mucho tiempo, esperando que en un futuro este incremente su valor y pueda venderlo. Si las expectativas del especulador no se cumplen, este puede perder todo su capital, incluso incurrir en pérdidas.[13]



Hemos repetido que en el arbitraje el riesgo es minúsculo, pero no es nulo del todo. Podría darse el caso que, en el transcurso de la operación, el valor de un bien pueda haber cambiado, y dado que para obtener beneficios debemos invertir una gran cantidad de capital, de igual manera que podríamos ganar una gran cantidad, podríamos perderla, aunque no es lo más probable.

En este trabajo nos enfocaremos en un tipo concreto de arbitraje, el arbitraje triangular, pero es más importante mencionar que existen otros tipos de arbitraje. Los describimos a continuación.

1.4.1 Tipos de arbitraje

- Arbitraje de riesgo

En este tipo de arbitraje se ha de tener un conocimiento sobre el funcionamiento de las acciones y el mundo financiero en general. Este tipo de arbitraje consiste en comprar acciones de una empresa que va a ser comprada por otra, mientras se venden las acciones de la empresa que va a comprar a la otra.

Cuando una compañía es comprada por otra (hija), lo habitual es que las acciones de esta compañía tengan un valor menor que la empresa compradora (padre) y, además, el precio de las acciones de la compañía padre tiende a bajar en general, llegando a converger con el precio de las acciones de la compañía hija.

Esto abre una oportunidad de arbitraje, vendiendo las acciones de la empresa padre, las cuales están a un precio mayor, antes de que ésta adquiriera la compañía, lo que conlleva que el precio de la acción del empresa padre disminuya hasta alcanzar el precio de la hija, y comprando acciones de la empresa hija, pues sabemos que estas acciones se convertirán en acciones de la empresa padre al final del proceso de adquisición, consiguiendo así tener el mismo número de acciones de la misma compañía al final de la operación, pero con el plus de haber obtenido una ganancia.

- Arbitraje de dos puntos

Arbitraje ya mencionado de manera general, se da cuando compramos un activo en un mercado inicial a bajo precio (punto uno) y vendemos este mismo en otro mercado donde vale más (punto dos).



- Arbitraje de tres puntos o triangular

Es el arbitraje en torno al cual girará este trabajo. En los ejemplos anteriores de tipos de arbitrajes hemos hecho alusión a la compraventa de activos, pero únicamente en dos mercados. Este arbitraje tiene su peculiaridad de que si operamos únicamente en 2 mercados no conseguiríamos beneficio, pero si añadimos un tercero o más mercados diferentes, las oportunidades de arbitraje comienzan a florecer.

Estamos ante el arbitraje triangular, en el que el activo de comercio principal son las propias divisas.[14]

- Ejemplo de arbitraje triangular

Podríamos comprar una divisa con un valor X en el tiempo t , al tiempo que la vendemos en otro mercado cuyo valor sea mayor, en un tiempo $t + 1$, obteniendo así una ganancia. Para ejemplificarlo, simplificaremos el problema a 3 únicas divisas, USD (dólar), JPY (yen japonés) y GBP (libra esterlina), con valores de intercambio ficticios, para mayor comprensión del método.[15]

Imaginemos que conocemos los valores de cambio para 3 pares de divisas en un tiempo t , y nos gustaría conocer si existe una oportunidad de arbitraje partiendo de la moneda USD. Tenemos un capital de inversión de \$1.000,00. Los tipos de cambio entre monedas, en este ejemplo, son:

$$\frac{JPY}{USD} = 100, \quad \frac{USD}{GBP} = 1.60, \quad \frac{JPY}{GBP} = 140.$$

Conociendo estos cambios, podríamos probar todas las combinaciones entre divisas, hasta comprobar si en alguna de ellas existe arbitraje.

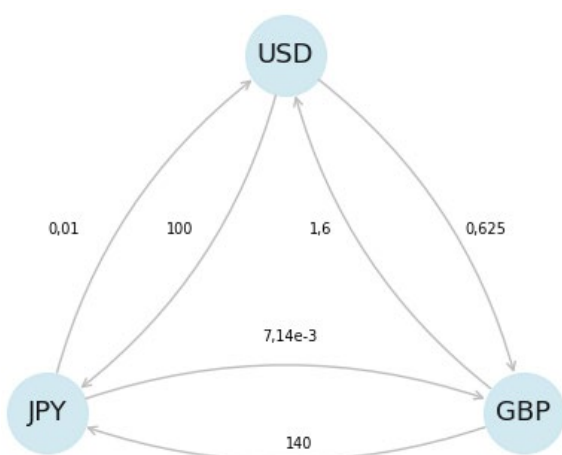


Fig. 1 Representación de cambios entre divisas

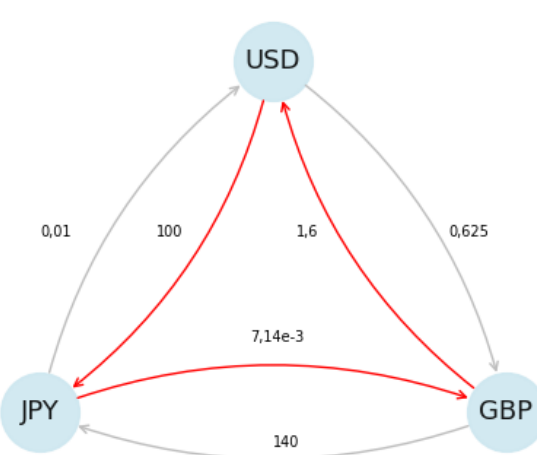


Fig. 2 Visualización del camino que retorna beneficio



Con este método, comprobamos que en la ruta USD -> JPY -> GBP -> USD, invirtiendo \$1000, obtenemos \$1.142,85 después de realizar todos los cambios de divisas. Únicamente moviendo el capital de una divisa a otra, vemos que hemos obtenido un beneficio del 14,28%.

Para este ejemplo, contamos con 6 tipos de cambios entre las monedas, pero en realidad, el número de divisas crece hasta 161 monedas distintas de todo el mundo, dando lugar a una red con $161 \times 160 = 25.760$ enlaces distintos (tantos como cambios de divisas posibles entre pares de monedas existen), haciendo imposible el tanteo manual de todas las combinaciones una a una. No sólo debido al número de enlaces, sino a que el número de caminos posibles dentro de esta red crece exponencialmente con el número de nodos (monedas).[17]

Para explicar adecuadamente la metodología que hemos desarrollado en este trabajo, necesitamos explicar con detalle algunos conceptos de teoría de grafos y métodos de optimización sobre redes.

2 CONCEPTOS BÁSICOS

2.1 Teoría de grafos

La teoría de grafos nació con la finalidad de poder estudiar conjuntos de datos que a primera vista parecen arbitrarios y sin una conexión aparente pero que, con la implementación de los grafos, somos capaces de entender la naturaleza que los envuelve. Resultan ser muy útiles solucionando problemas de gran complejidad.

Un grafo modeliza matemáticamente relaciones binarias que existe entre los elementos que lo forman, que son conocidos como nodos, y las relaciones entre nodos se modelizan en el grafo a través de conexiones entre pares de nodos (que se llaman enlaces).

Matemáticamente, un grafo se define como una lista de pares ordenados compuestos por nodos de inicio y fin (u, v) , los cuales, de igual manera que los enlaces, pueden venir acompañados de un número real que caracteriza al nodo o al enlace. En el caso de los enlaces, esta cantidad es conocida como el peso del enlace; en el caso de los nodos, la cantidad puede ser cualquier valor que queramos estudiar (Fig. 3). El número de nodos que componen el grafo se le conoce como orden (N) , y al número de enlaces que salen o entran de cada nodo se conoce como grado del nodo.[16]



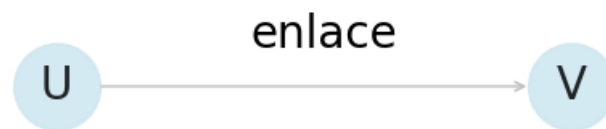


Fig. 3 Representación entre nodos y enlace

En nuestro caso, tenemos un grafo donde los nodos son todas las monedas que existen, y los enlaces son todos los tipos de cambio entre pares de monedas. Como se trata de un grafo completo (que contiene todos los enlaces posibles entre pares de monedas, excepto los auto-enlaces), el grado total de nuestra red será igual a $G = N * (N - 1)$, siendo N el número de nodos de nuestra red. El número total de enlaces de la red depende del número de nodos que en la red posea.

2.1.1 Tipos de grafo

- Grafo dirigido

Consta de un conjunto de nodos y enlaces donde cada nodo se asocia de forma unidireccional a través de una flecha que indica la dirección de la relación entre nodos. La condición común es que los nodos siempre tienen un destino hacia otro nodo y los enlaces poseen pesos distintos. Son conocidos también como digrafos.

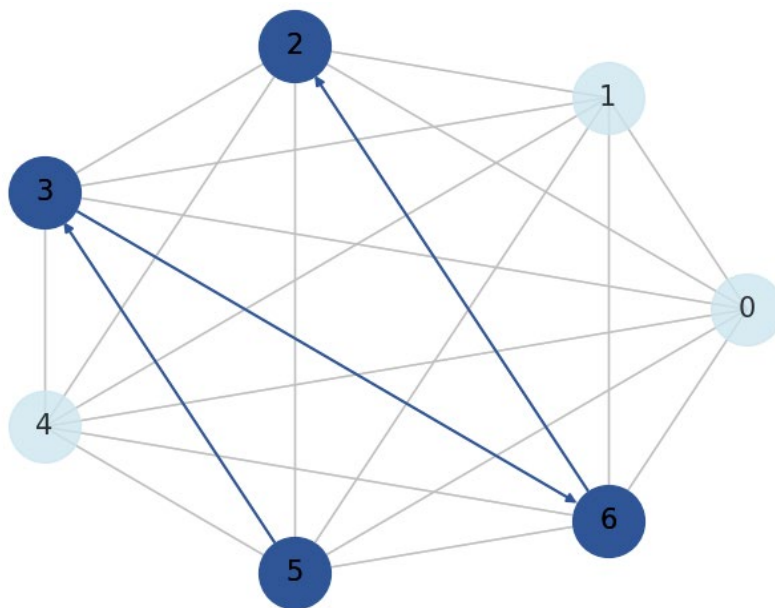


Fig. 4 Grafo dirigido



Grafo no dirigido

De manera opuesta al caso anterior, los nodos del grafo están unidos entre si mediante enlaces carecen de pesos y de sentido, esto quiere decir que un enlace puede recorrerse desde cualquiera de sus nodos y en cualquier dirección.

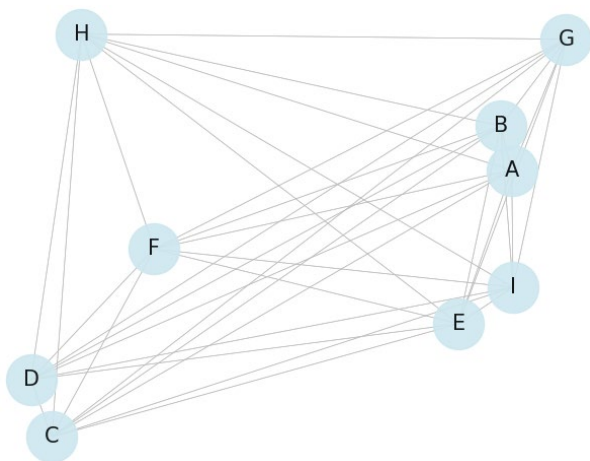


Fig. 6 Grafo no dirigido sin ordenar

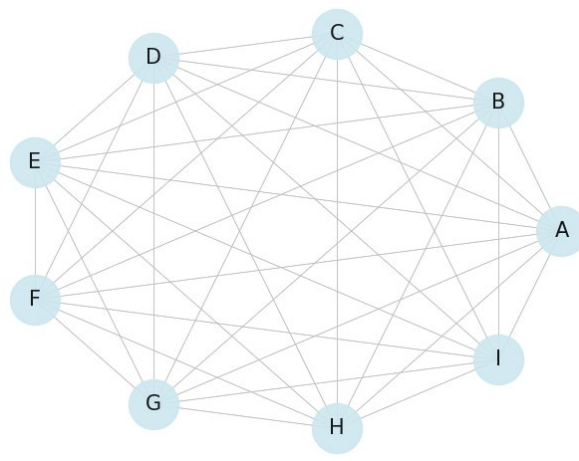


Fig. 5 Grafo no dirigido completo

- Grafo dirigidos con pesos

Este tipo de grafos será el que más información contiene y con el que podremos realmente conocer el grado de correlación entre los distintos nodos. También se le conoce, como en el primer caso, como digrafo, por las similitudes que comparten. A la relación que existe entre dos nodos que comparten un enlace común se le conoce como adyacencia.

Podemos observar que los enlaces pueden ser de un sentido único o de doble sentido, como en el caso que abajo se presenta.

Este tipo de grafo dirigido con pesos será el que debemos tener en cuenta a la hora de crear nuestro modelo de arbitraje, pues pese a que podamos ir en ambos sentidos, estos sentidos tendrán pesos diferentes, debidos a las ineficiencias ya comentadas anteriormente.



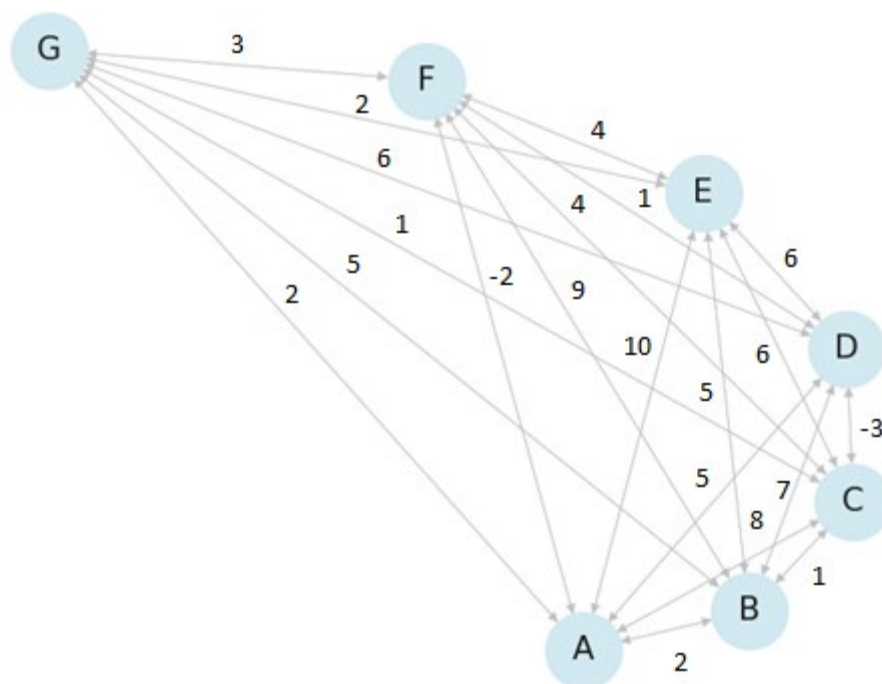


Fig. 7 Grafo dirigido con pesos entre enlaces

Todas estas imágenes representan las relaciones entre los nodos, dependiendo de los datos que estemos tratando, podremos representar los pesos a escala para poder ver si siguen algún patrón concreto, y poder estudiar con mayor precisión el motivo de estas agrupaciones.

Para el caso que nos ocupa, no nos interesa su visualización por tanto, representaremos la red priorizando la estética de ésta únicamente.

2.2 Algoritmos de maximización de beneficio

En nuestro intento por diseñar un programa informático que estudie las oportunidades de arbitraje en el mercado de valores, deberemos tratar con diversos algoritmos que automaticen los cálculos necesarios para llevar a cabo dicho programa y poder con él entender en mayor medida, este método de inversión.

Todos estos algoritmos tienen un mismo fin: maximizar el beneficio económico de la transacción, y para ello exploran los diferentes caminos existentes en el grafo, con el fin de maximizar las ganancias resultantes de la ruta. En el caso del cambio de monedas, los tipos de cambio en el camino A -> B -> C deben multiplicarse con los tipos de cambio A -> B y B -> C. Si dichos pesos se definen en escala logarítmica, basta con sumarlos para obtener el logaritmo del beneficio. Por tanto, los algoritmos de maximización buscan la ruta que maximice la suma de los pesos en escala logarítmica, lo cual



proporcionará la máxima ganancia (deshaciendo los logaritmos con la función exponencial).

2.2.1 Algoritmo de Bellman-Ford

Este algoritmo fue propuesto por 2 matemáticos, Lester Randolph Ford Jr. y Richard E. Bellman. Juntos lograron desarrollar un algoritmo que podía calcular el camino más corto de un digrafo ponderado donde, y a diferencia de otros algoritmos mundialmente conocidos como lo es el algoritmo de Dijkstra (el cual es utilizado por empresas como Google, para calcular la ruta más corta entre dos puntos en su aplicación “maps”), los pesos de los enlaces pueden ser negativos.[18][19]

Resumidamente, el método consiste en, dado un digrafo con pesos diferentes en los enlaces y con valor infinito en los nodos, ir iterando sobre el digrafo, hasta conseguir reducir al mínimo posible el valor de los nodos, los cuales partían de infinito.

El algoritmo comienza asignándole el valor 0 al nodo por el que queramos empezar a iterar. Seguido de esto debemos sumar el valor del nodo n , junto con el peso del enlace que une al nodo $n+1$ y evaluar si esta suma minimiza el valor que posee el nodo $n+1$. Como hemos comenzado asignándole un valor infinito a todos los nodos, la primera iteración cumplirá esta evaluación y asignaremos al último nodo el valor de esta suma. Realizando esta operación $N-1$ veces, podremos encontrar el camino que minimice la ruta entre nodos.

Este es un algoritmo muy útil en cuestiones de arbitraje triangular, ya que está preparado para operar con bucles dentro del grafo, cosa muy común en esta práctica ya que la idea es encontrar una ruta que comience y acabe en el mismo punto: los caminos que buscamos son cíclicos sobre el grafo.[20]

2.2.2 Algoritmo “Simulated Annealing”

La traducción del nombre de este algoritmo vendría a decir algo como “enfriamiento simulado”, cuyo nombre no es al azar, si no que se inspira en los procesos que se llevan a cabo en el mundo de la metalurgia, cuando se procesan materiales metálicos (generalmente vigas de acero) para otorgarles la mayor resistencia posible.

Está comprobado que un enfriamiento instantáneo de la viga que se está procesando, acarrea una disminución considerable en las propiedades de ésta, creando incluso microfisuras, las cuales pueden hacer que esa viga no cumpla las medidas de seguridad establecidas y deba ser desechada. Esto incurriría en grandes pérdidas para la empresa



en cuestión pues no es un proceso económico el procesar vigas para el ámbito constructivo.

Por todo esto, la temperatura de enfriamiento del material se somete a un entorno muy controlado para poder controlar la velocidad de enfriamiento de la viga.

Este principio es en el que se basa este algoritmo. Principalmente realiza una búsqueda aleatoria, que no solo acepta cambios que mejoran la función objetivo (esto es, la función matemática cuyo valor se quiere optimizar), sino que también acepta algunos cambios que la empeoran, con la intención de explorar todo el rango de posibilidades y encontrar el valor mínimo de la función.[21]

Se trata de un proceso iterativo, suponiendo un número finito de iteraciones. Cada vez que el algoritmo encuentra un valor, independientemente de si este valor es bueno o malo, será aceptado al comienzo (en el régimen de “alta temperatura”, donde se aceptan cambios al azar). Esto se hace con el fin de explorar toda la función, ya que puede ser una función muy rugosa (Fig. 8) que parezca que un mínimo local sea el mínimo global, el mínimo que tratamos de encontrar.

A medida que el algoritmo va iterando, la “temperatura” baja paulatinamente y los cambios que empeoran la energía comienzan a rechazarse, con una probabilidad de rechazo que aumenta progresivamente. De esta forma, el proceso se irá “congelando”, llegando un momento en donde los valores que no mejoran la función serán rechazados, haciendo que cada vez sea más difícil acabar el algoritmo con un valor que empeore nuestra búsqueda.

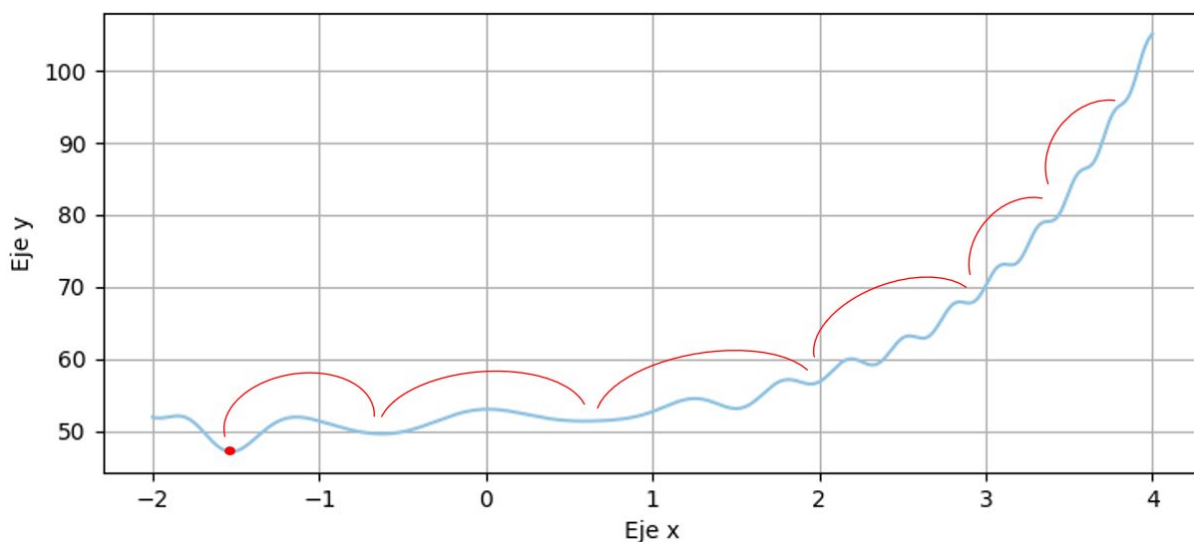


Fig. 8 Función objetivo a minimizar



Tras aplicar este algoritmo a la función $f(x)$ representada en la Figura 8, podemos observar, tanto la gráfica de “Estados” como la de “Costes”, como los valores van oscilando hasta converger en el punto mínimo de esta función. Para el caso que nos ocupa este punto es (-1.52. 47,11).

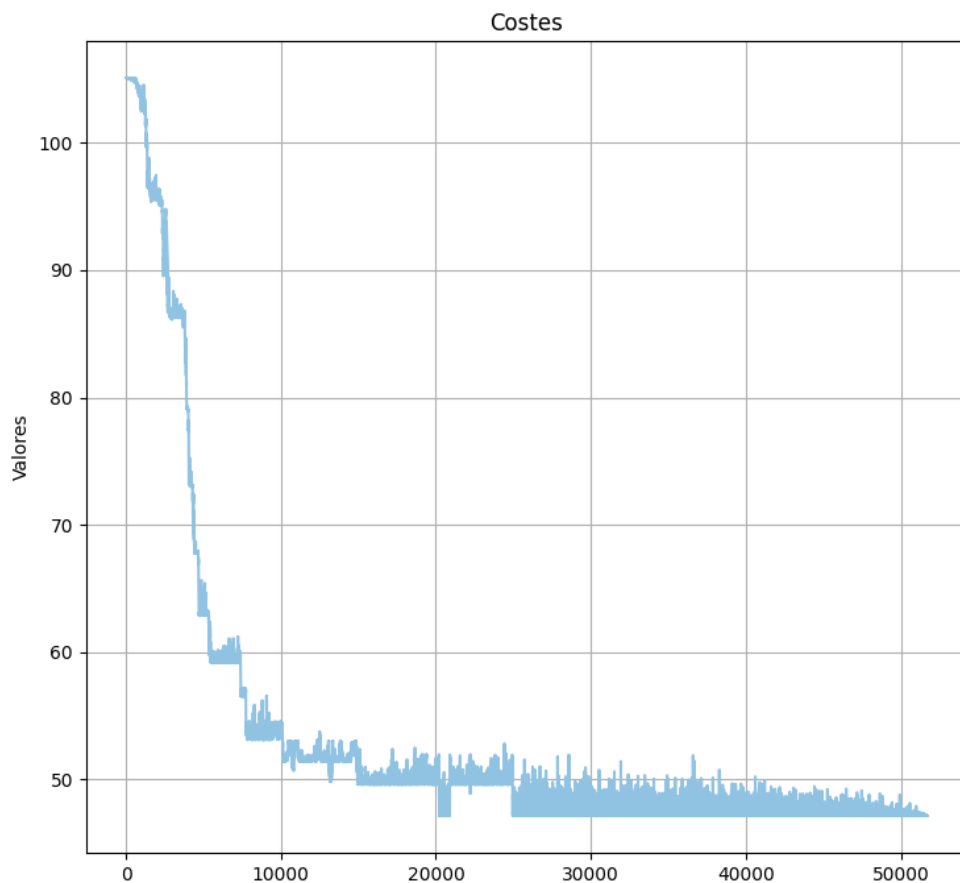


Fig. 9 Representación gráfica de minimización de función objetivo

2.2.3 Aleatorización no dirigida

A diferencia del algoritmo “Simulated Annealing”, la aleatorización no dirigida se basa en conseguir encontrar oportunidades de arbitraje en una red de divisas, cuya ordenación por la cual comenzar la búsqueda, se mantenga aleatoria en cada iteración, manteniendo invariables las divisas origen- destino que son las divisas por las cuales debemos comenzar el algoritmo de Bellman-Ford.[22][23]

El principio de este método se basa en estudiar toda la red, sin almacenar ninguna información cada vez que se itera.



Para llevar a cabo este método debemos aleatorizar el conjunto de monedas que conforman nuestra red, para que cada iteración realizada tenga un origen diferente y, por tanto, retorne caminos diferentes.

A continuación, vamos a ejemplificarlo con nuestra herramienta.

Para poder obtener un camino, independientemente de si el beneficio es alto o bajo, se ha de crear la red principal con el conjunto de las 161 divisas de las que disponemos. Tras haber creado la red, la herramienta generará una lista de todos los enlaces que existen dentro de la red, siendo 25.760 enlaces totales dentro de nuestra red. Estos enlaces se almacenan listándolos en un orden concreto, para que más adelante el algoritmo Bellman-Ford comience a iterar sobre esta lista.

La esencia de la aleatorización no dirigida se basa en aleatorizar esta lista de enlaces, para que, en cada iteración, la lista disponga los enlaces en un orden diferente, pudiendo así conseguir caminos diferentes en cada realización. De no aleatorizar este inicio, el algoritmo siempre exploraría el mismo camino ya que siempre comenzará por el mismo punto.

Si bien es cierto que la eficacia de este podría no ser tan elevada como la del algoritmo “Simulated Annealing”, con este método podemos explorar rutas aleatorias que pudieran retornar un gran beneficio, sin demorar de manera masiva el tiempo necesario para explorar toda la red como era el caso de “Simulated Annealing”.

Como en todos los casos de aleatorización, este algoritmo podría no encontrar la ruta que óptima dentro de la red, pero si nos puede arrojar gran información si lo dejamos operar durante un número de iteraciones determinado.

Hoy en día, gracias a los equipos informáticos, la aleatorización es una gran aliada a la hora de encontrar máximos o mínimos en funciones cuya rugosidad podría hacer que, encontrar un mínimo global de manera matemática, fuese una tarea muy compleja.

Estos métodos tienen la ventaja de que siempre pueden modificarse para que lleven a cabo la misma tarea de manera más eficiente.

2.3 Procedimiento

Como hemos visto en puntos anteriores, para la obtención de una ruta mínima, el procedimiento clásico e ineficaz, consistiría en multiplicar los pesos de los enlaces entre nodos, y observar que ruta nos retorna un mayor beneficio.



Como estamos ante un problema de maximización en un grafo, la idea elemental se basa en maximizar la función objetivo asignando el máximo valor a cada nodo que visitemos.

El problema reside en la existencia de posibles bucles dentro de la red a estudiar, que hagan que en cada iteración que hagamos, el nodo siguiente crezca de valor de manera indefinida, no pudiendo nunca llegar a un máximo.

Ante esta disyuntiva, debemos enfocar el problema como si de una función objetivo a minimizar se tratara, sabiendo, además, que un problema de maximización se puede igualar a un problema de minimización, pero invirtiendo el signo de la función objetivo.

Teóricamente, ha de existir paridad en todos los mercados financieros en el mismo instante de tiempo.[7] Esto quiere decir que la ratio de una misma divisa en mercados diferentes, han de estar igualados a la unidad, por ejemplo $\frac{EUR_{ibex}}{EUR_{NASDAQ}} = 1$.

Por tanto, la función a maximizar se puede expresar como el producto de las tasas de cambio X_{ij} entre las divisas i y j : $\prod_{i \rightarrow j} X_{ij} > 1$, donde el producto recorre todos los nodos que forman el ciclo de cambios entre monedas. Cuando nos encontramos con muchas multiplicaciones consecutivas, podemos tomar logaritmos y transformar los productos en sumas, de modo que la función objetivo es más sencilla al tratarse de una simple suma de pesos en escala logarítmica: $\sum_{i \rightarrow j} \log(X_{ij}) > \log(1) = 0$. Podemos expresar la función objetivo como una función a minimizar, simplemente cambiando el signo de la expresión: nuestro objetivo es minimizar la suma $-\sum_{i \rightarrow j} \log(X_{ij}) < 0$.

Una vez obtenido este valor, simplemente deshaciendo los logaritmos que hicimos anteriormente, el peso de la ruta cíclica será $K = e^{-\sum_{i \rightarrow j} \log(X_{ij})}$. De esta forma podemos ver si obtenemos una ganancia o no: si $K > 1$, existe oportunidad de arbitraje; si no, incurriríamos en pérdidas.

Podemos simplificar todo este procedimiento matemático con la ayuda de los grafos, como ya hemos dicho. Entendiendo los nodos de este como divisas, y los enlaces como el tipo de cambio entre divisas, podríamos conformar una red dirigida donde todos los nodos están conectados entre sí en ambos sentidos, y donde la diferencia entre enlaces nos permite la oportunidad de obtener un beneficio.

Como hemos mencionado anteriormente, el peso de estos enlaces sería en gran medida negativo, por tanto, para poder resolver el problema, el único algoritmo de los nombrados anteriormente que trabaja correctamente con pesos y bucles negativos es el algoritmo de Bellman-Ford.[3]



Este algoritmo únicamente nos devolverá el primer camino que encuentre de entre todos los enlaces, que retorne un beneficio, por muy pequeño que sea, haciendo indispensable que, para poder encontrar rutas con una mayor rentabilidad, debamos repetir este algoritmo de forma aleatoria, cambiando la distribución de las monedas para que Bellman-Ford pueda mostrarnos otros caminos distintos.

Gracias al método de la aleatorización no dirigida, podremos aleatorizar, el número de veces que consideremos necesario, el algoritmo Bellman-Ford y poder explorar en mayor medida la red que conforman las divisas.

2.4 Obtención de datos

Para llevar a cabo este método y poder analizar las oscilaciones de la moneda y explorar las oportunidades de arbitraje, hemos tenido que registrar diariamente cómo se encontraban los valores de cambio de divisas en un tiempo concreto del día.

Usamos una API (Application Programming Interface) para registrar estos valores. Una API básicamente es un conjunto de definiciones y protocolos que se utiliza para desarrollar e integrar el software de las aplicaciones, permitiendo la comunicación entre 2 aplicaciones de software a través de un conjunto de reglas.

Un ejemplo sería la forma en la que un usuario accede a una página web para obtener un tipo concreto de información. Este usuario, cuando realiza una consulta dentro de una web para conocer el tipo de cambio entre un par de divisas, la web le proporciona la información que este ha pedido, pero para poder llevar a cabo esta tarea, es necesario el uso de una API.

Ésta se encarga de llevar la consulta del usuario en un formato legible que pueda comprender la base de datos donde se almacenan todos estos datos de manera rápida.

Una vez que se conoce la respuesta a la consulta, la base de datos se comunica con la API para mostrarle la respuesta y esta es la encargada de procesar la información, pasarla a un lenguaje que comprenda el usuario e imprimirla por pantalla.

Si nos paramos a pensar en el tiempo que esto requiere, podríamos encontrarnos que, si queremos encontrar oportunidades de arbitraje, necesitamos ser lo más eficientes y rápidos posibles, no pudiendo permitirnos la pérdida de tiempo que conlleva consultar la información de los cambios de divisas de manera tradicional.

Por este mismo motivo es por el que hemos requerido el uso de una API para nuestro programa, siendo capaces de consultar la información que queramos, extrayéndola directamente de la API y evitando así los tiempos de carga de la página.



Cabe destacar que, para este estudio, hemos priorizado la obtención de opciones de arbitraje de gran beneficio a la velocidad del método computacional para obtener dichas oportunidades, intentando obtener resultados y conclusiones sobre los beneficios obtenidos, así como su comportamiento estadístico, antes de desarrollar un método más eficaz que podamos adoptar en un caso de inversión real.

Con esta API, obtuvimos las ratios monetarias entre las divisas, pero únicamente para un solo instante del día.

Si bien es cierto que, para poder operar en caso real, necesitaríamos actualizar este valor prácticamente a tiempo real, para poder llevar a cabo el estudio del arbitraje, con un valor diario repartido entre muchos días, fue más que suficiente.

Algo importante a tener en cuenta, fue la hora usada para inmortalizar los cambios de divisas para cada día, la cual era la 00:00:00 UTC +0000. El motivo de representar la hora en el formato universal (Universal Time Coordinated), es que en España la hora varía, dependiendo de la estación en la que nos encontremos, por ese motivo al principio de nuestro estudio, comenzamos capturando los detalles a la 1.00 AM y hemos terminado capturando los valores a las 2.00 AM.

De no haber capturado los intercambios en el mismo intervalo de tiempo, ocasionaría que los datos que obtuviéramos fueran erróneos, debido a un desfase temporal entre meses de una hora.

Teniendo en cuenta que los márgenes para aprovechar oportunidades de arbitraje oscilan en microsegundos, la diferencia de una hora entre captura y captura ocasionaría un error en los datos de partida y por consiguiente un análisis ineficiente.

Si bien es cierto que, para el uso real del programa, necesitaríamos actualizar la ratio de divisas a tiempo real, en este trabajo fue suficiente el conocer el estado de las divisas en un único tiempo, para poder armar el programa y, en caso de que realmente se desee utilizar, poder extrapolar todo el programa, a una API que nos aporte los valores actualizados al instante.

Esta API poseía el registro de 161 monedas, todas ellas con su ratio entre el resto de las otras divisas, conformando así una matriz de 161x161 elementos donde se almacenan todos los posibles cambios un grafo con 161 nodos y 25.921 enlaces interconectados unos con otros.

Todos los procesos aquí descritos, se realizaron mediante la creación de un programa que automatiza los procesos de consulta a la API y su posterior ordenamiento para analizar las posibles oportunidades de arbitraje que se presenten. En el apéndice se



muestra un esquema del código implementado en Python para resolver el problema de optimización de oportunidades de arbitraje. [24]

3 RESULTADOS

En este punto pasaremos a presentar los datos obtenidos de nuestro estudio. Mostraremos si existe o no algún patrón que nos indique si podemos prever que ruta será la que debemos escoger, antes si quiera de que esta esté disponible, o de que actividades a nivel macroeconómico hacen que oscilen o no los tipos de cambio.

Todas las gráficas y representaciones de los datos han sido realizadas en este trabajo y son, por tanto, novedosas.

3.1 Caso real

Para este estudio, tomamos los valores en el mismo instante de tiempo y repartido en 60 días a lo largo de marzo, abril, mayo y principios de junio.

Aplicando el procedimiento mencionado, ejecutamos nuestro programa con la intención de encontrar el camino que nos retorne el mayor beneficio posible.

Para este análisis, antepusimos el encontrar el máximo beneficio, independientemente del tiempo necesario para ello en una escala manejable, el algoritmo “Simulated Annealing” tardó más de 12 horas en donde el máximo valor encontrado no llegaba a un beneficio del 1% y, por tanto, desechamos su uso. Los resultados presentados aquí se obtuvieron con una combinación del método de Bellman-Ford y una búsqueda aleatoria sobre la red.

Cabe resaltar que los resultados aquí reflejados solo podrían obtenerse en caso de que el algoritmo de optimización consiga rastrear todas las posibilidades en un lapso muy corto de tiempo.

3.2 Análisis estadístico

3.2.1 Histograma de máximos beneficios

Hemos dejado trabajar a nuestro algoritmo, deteniéndose cuando este obtuviera 1000 caminos los cuales retornasen un beneficio positivo, por muy bajo que fuera, excluyendo aquellos que resultaban en pérdidas, dentro de un mismo día. Hemos repetido esta operación a lo largo de los 60 días y hemos extraído de cada día el valor máximo encontrado.



En la Fig. 10, observamos la gráfica que representa el máximo valor obtenido a lo largo de los días.

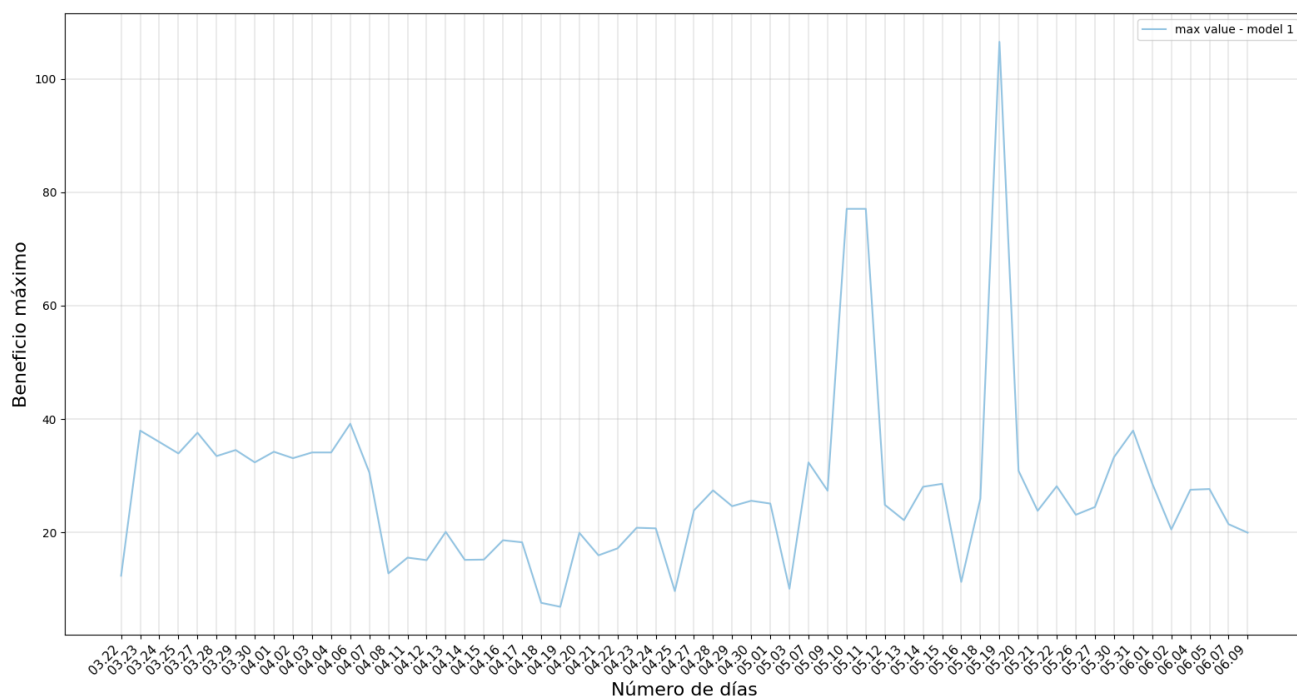


Fig. 8 Gráfica de máximo beneficio (en tanto por ciento) para una única realización del algoritmo

A simple vista observamos días con picos de beneficio muy elevados y no logramos apreciar ningún patrón que nos indique el motivo de por qué unos días es tanto el beneficio que podemos obtener y otros días tan poco, llevándonos a pensar que los beneficios podrían no haberse calculado correctamente.

Para explorar si éste era el caso, hemos repetido el proceso anterior de aleatorización de la red 4 veces más, para explorar aún más las oportunidades de arbitraje, y para aportar robustez a nuestro algoritmo [25]. Finalmente contamos con 5 realizaciones de 1.000 caminos diferentes para cada día, obteniendo así una base de datos de 300.000 caminos distintos a lo largo de estos 60 días.

En la Fig.11 podemos ver una gráfica donde se recogen todas las realizaciones obtenidas, representando el máximo beneficio en función del tiempo.

Observamos que los datos entre diferentes realizaciones son bastante semejantes entre sí, lo que indica la robustez de nuestros resultados, existiendo alguna discrepancia en días puntuales, debiéndose esto al método de aleatorización explicado anteriormente.



En definitiva, el hecho de optimizar un algoritmo de minimización, aleatorizando la posición de los datos de partida hace que, pese a que explore en gran medida toda la red, su análisis no sea lo suficientemente profundo como para encontrar el camino óptimo.

Esta metodología puede encontrar buenos valores mínimos, pero no necesariamente ha de encontrar el camino más eficiente.

Observamos como para el día 19 de mayo, la tendencia de que en ese día haya un pico del beneficio, se extiende para todos los modelos, encontrando un beneficio muy superior en la realización 1 en comparación al resto de realizaciones. Podemos observar así que la gráfica presenta valores reales siguiendo la tendencia en todos los modelos.

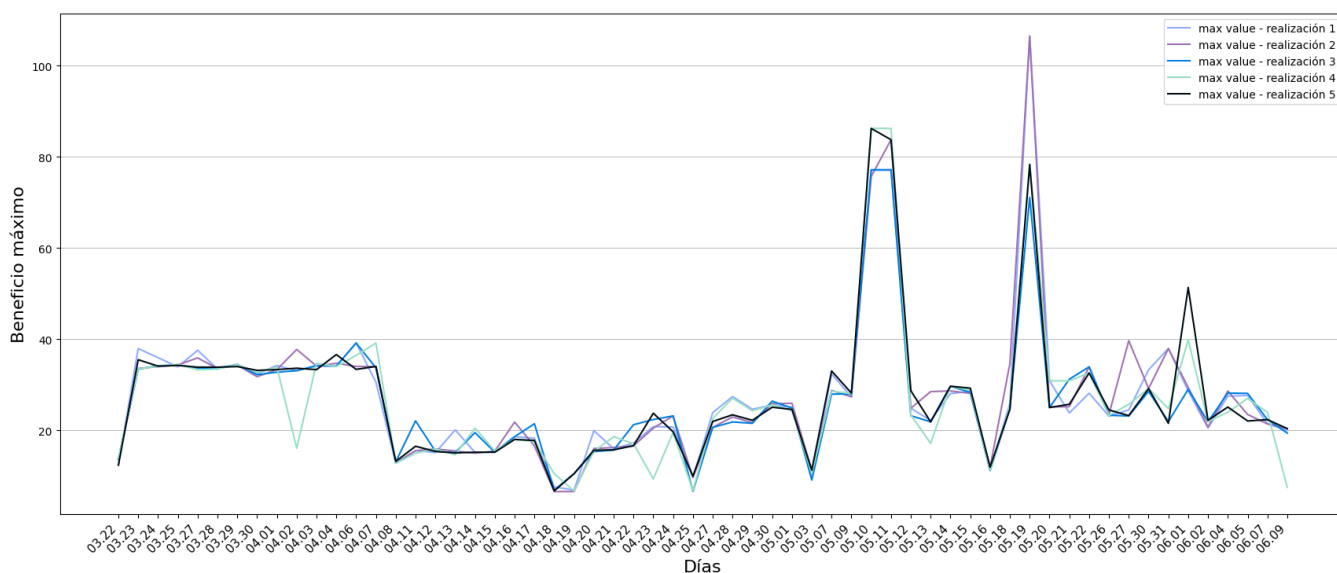


Fig. 9 Gráfica de máximos beneficios para 5 realizaciones

3.2.2 Probabilidades de oportunidades de arbitrajes exitosas

La gráfica anteriormente descrita, es una representación del camino más rentable por día, a lo largo de todas las muestras, recogiendo los datos en la tabla 1.

Además de lo anterior, en la tabla también hemos representado, por porcentajes, la distribución de probabilidad de oportunidades de arbitraje que encontramos para cada registro.

Podemos observar cómo, de forma generalizada, la probabilidad de reportar un caso donde la oportunidad de arbitraje sea inferior al 1%, está en torno al 85% del modelo, para oportunidades “accesibles”, el porcentaje de éxito ronda el 15% y sólo el 0.50% de los casos proporcional beneficios superiores al 20%.



Hemos categorizado los beneficios en estos intervalos por lo siguiente: los caminos que retornen un beneficio menor al 1% conllevan invertir una cantidad de capital inicial desmesurada para obtener una rentabilidad notoria. Sin embargo, para aquellos caminos que superen el 20% se considera que para que nuestra herramienta encuentre caminos óptimos, el tiempo computacional que se demanda es tan elevado, que la herramienta deja de ser eficiente debido a que en el tiempo transcurrido hasta que se encuentre este camino, el valor de la divisa a tiempo real ya se ha actualizado, dejando inservible los datos extraídos de la API, haciendo así que esa oportunidad de arbitraje quede extinta.

El tramo que por diferencia sería el más adecuado, es aquel que no cumpla estas condiciones, todos aquellos caminos con un beneficio entre el 1% y el 20% serían los caminos óptimos para invertir nuestro capital, pues consideramos que la relación tiempo- beneficio es la ideal para encontrar un camino relativamente beneficioso en un tiempo adecuado para realizar la transacción necesaria.



Días	Iteración	Porcentaje de oportunidad de arbitraje			Valores máximos				
		< 1%	Accesibles	> 20%	Modelos				
					1	2	3	4	5
03.22.22	5000	86,600%	13,400%	0,000%	12,37	13,66	13,66	13,92	12,38
03.23.22	5000	88,360%	11,260%	0,380%	37,96	33,59	33,43	33,52	35,51
03.24.22	5000	88,740%	10,780%	0,480%	35,96	33,98	34,18	34,03	34,09
03.25.22	5000	91,080%	8,400%	0,520%	33,94	34,36	34,36	34,50	34,26
03.27.22	5000	84,480%	14,860%	0,660%	37,59	35,91	33,69	33,28	33,87
03.28.22	5000	85,740%	13,780%	0,480%	33,47	33,59	33,70	33,44	33,86
03.29.22	5000	85,060%	14,180%	0,760%	34,54	34,34	34,39	34,44	34,01
03.30.22	5000	85,300%	14,260%	0,440%	32,37	31,78	32,22	32,71	33,17
04.01.22	5000	87,980%	11,440%	0,580%	34,24	33,34	32,76	33,87	33,34
04.02.22	5000	86,940%	12,780%	0,280%	33,10	37,76	33,10	16,09	33,64
04.03.22	5000	83,160%	16,260%	0,580%	34,11	34,11	34,23	34,73	33,33
04.04.22	5000	83,200%	16,200%	0,600%	34,11	34,73	34,11	34,02	36,64
04.06.22	5000	80,880%	18,800%	0,320%	39,18	34,03	39,18	36,45	33,39
04.07.22	5000	80,900%	18,760%	0,340%	30,58	34,01	33,73	39,18	34,03
04.08.22	5000	88,900%	11,100%	0,000%	12,79	12,84	13,12	12,79	13,20
04.11.22	5000	85,140%	14,840%	0,020%	15,56	15,55	22,09	14,99	16,52
04.12.22	5000	89,140%	10,860%	0,000%	15,13	15,94	15,42	15,94	15,38
04.13.22	5000	89,900%	10,080%	0,020%	20,10	15,47	15,10	14,65	15,06
04.14.22	5000	87,300%	12,680%	0,020%	15,17	15,00	19,52	20,49	15,20
04.15.22	5000	88,600%	11,400%	0,000%	15,22	15,47	15,22	15,53	15,22
04.16.22	5000	85,980%	14,000%	0,020%	18,63	21,82	18,63	18,02	18,02
04.17.22	5000	85,860%	14,120%	0,020%	18,27	16,58	21,45	17,54	17,79
04.18.22	5000	84,000%	16,000%	0,000%	7,59	6,56	6,90	10,49	6,72
04.19.22	5000	84,440%	15,560%	0,000%	6,90	6,59	10,49	6,69	10,49
04.20.22	5000	85,180%	14,820%	0,000%	19,93	16,03	15,34	15,40	15,64
04.21.22	5000	89,600%	10,400%	0,000%	15,97	16,24	15,69	18,62	15,73
04.22.22	5000	83,620%	16,360%	0,020%	17,20	16,60	21,24	17,08	16,64
04.23.22	5000	79,700%	20,060%	0,240%	20,83	20,50	22,38	9,36	23,77
04.24.22	5000	76,840%	23,020%	0,140%	20,73	23,17	23,17	19,51	19,69
04.25.22	5000	83,460%	16,540%	0,000%	9,66	9,66	6,60	6,77	9,96
04.27.22	5000	83,720%	16,120%	0,160%	23,89	20,66	20,66	22,59	21,96
04.28.22	5000	79,540%	20,000%	0,460%	27,42	22,95	21,85	27,07	23,42
04.29.22	5000	81,420%	18,120%	0,460%	24,64	21,71	21,55	24,31	22,22
04.30.22	5000	83,560%	15,920%	0,520%	25,59	25,86	26,42	25,59	25,08
05.01.22	5000	84,820%	14,640%	0,540%	25,10	25,95	24,89	24,32	24,60
05.03.22	5000	89,140%	10,860%	0,000%	10,07	11,27	9,11	10,53	11,27



05.07.22	5000	79,900%	19,740%	0,360%	32,35	28,78	27,95	28,60	33,04
05.09.22	5000	84,520%	14,800%	0,680%	27,37	27,36	28,02	28,07	28,18
05.10.22	5000	81,820%	16,560%	1,620%	77,07	75,70	77,19	86,26	86,26
05.11.22	5000	82,140%	16,400%	1,460%	77,07	83,78	77,19	86,26	83,78
05.12.22	5000	83,740%	15,700%	0,560%	24,87	24,87	23,22	23,40	28,70
05.13.22	5000	81,000%	18,660%	0,340%	22,17	28,51	21,87	17,15	21,87
05.14.22	5000	88,100%	11,540%	0,360%	28,06	28,66	29,69	29,69	29,69
05.15.22	5000	83,780%	15,560%	0,660%	28,58	28,13	28,34	28,82	29,27
05.16.22	5000	91,580%	8,420%	0,000%	11,28	11,92	11,17	11,29	11,92
05.18.22	5000	83,540%	15,820%	0,640%	25,96	34,65	24,83	25,27	24,66
05.19.22	5000	82,160%	13,920%	3,920%	106,53	106,53	71,14	78,36	78,36
05.20.22	5000	88,920%	10,720%	0,360%	30,87	25,14	25,01	30,87	25,02
05.21.22	5000	89,240%	10,320%	0,440%	23,83	25,21	31,23	30,87	25,73
05.22.22	5000	84,260%	15,280%	0,460%	28,16	33,95	33,95	32,61	32,61
05.26.22	5000	83,560%	15,900%	0,540%	23,12	23,51	23,32	23,28	24,48
05.27.22	5000	83,760%	15,660%	0,580%	24,48	39,68	23,16	25,72	23,24
05.30.22	5000	83,840%	14,700%	1,460%	33,29	29,18	28,56	29,18	29,18
05.31.22	5000	84,980%	14,420%	0,600%	37,97	37,97	21,93	24,78	21,55
06.01.22	5000	84,700%	13,820%	1,480%	28,65	29,44	29,02	39,88	51,35
06.02.22	5000	78,760%	20,940%	0,300%	20,53	20,72	21,91	21,96	22,23
06.04.22	5000	84,800%	14,540%	0,660%	27,54	28,63	28,18	23,99	25,12
06.05.22	5000	82,280%	17,300%	0,420%	27,66	23,49	28,11	27,02	22,06
06.07.22	5000	83,520%	16,100%	0,380%	21,46	21,42	22,36	23,98	22,36
06.09.22	5000	90,200%	9,760%	0,040%	19,97	20,39	19,41	7,51	20,39
Total	-	84,890%	14,654%	0,456%	106,53	106,53	77,19	86,26	86,26

Tabla 1 Agrupación de valores

3.2.3 Ley de potencias

En la Fig. 11, se representa el valor máximo por día, representando como máximo 60 valores, pero, utilizando toda la base de datos generada para los diferentes días, podemos analizar mucho más que únicamente las rutas máximas, ya que nuestra base cuenta con 300.000 datos, todos ellos representando posibles rutas de arbitraje.

Esto nos abre la posibilidad a un estudio en profundidad para poder comprender distintos aspectos de los tipos de cambio y ver en que afecta a la hora de encontrar caminos lucrativos. Surgen preguntas tales como si estos caminos realmente pueden ser detectados gracias a patrones que se repiten a lo largo de los períodos, o si el movimiento de las divisas se debe exclusivamente a procesos aleatorios, o si, por el contrario, existen variables correlacionadas que nos puedan aportar una ventaja a la



hora de detectar posibles caminos rentables. Todo ello se comentará en las conclusiones del trabajo.

Para ello comenzaremos estudiando cómo se distribuye el beneficio a lo largo de todos los caminos obtenidos. Para este caso no hemos hecho distinción por realizaciones, sino que hemos considerado todos los datos en conjunto, pues únicamente queremos conocer de manera general cuántos caminos del total pertenecen a probabilidades muy bajas de beneficio, cuántos a porcentajes medios y cuántos a porcentajes muy altos.

Como ya hemos podido visualizar en la Tabla 1 del punto anterior, las probabilidades de arbitrajes exitosos son muy escasas, algo que va de la mano con la coherencia de los mercados financieros pues, como sabemos, este tipo de inversión tiene un muy bajo riesgo, con lo que gran parte de los beneficios serán mínimos, muy próximos a 0 en casos donde el mercado ya haya igualado sus bienes.

Esto mismo hemos plasmado en la Fig. 12 donde, de manera ordenada, podremos ver como se distribuyen los porcentajes de los caminos que con más frecuencia se repiten a los que menos.

La distribución de beneficios es de tipo ley de potencias, que significa que hay muchos casos con beneficio pequeño, y muy pocos con gran beneficio, lo que da lugar a una cola pesada en la distribución. En esta figura hemos representado únicamente beneficios entre 0 y 5.5% para poder corroborar cómo efectivamente, gran cantidad de los valores (en torno al 85% como se ve en la Tabla 1) rondan beneficios muy bajos.

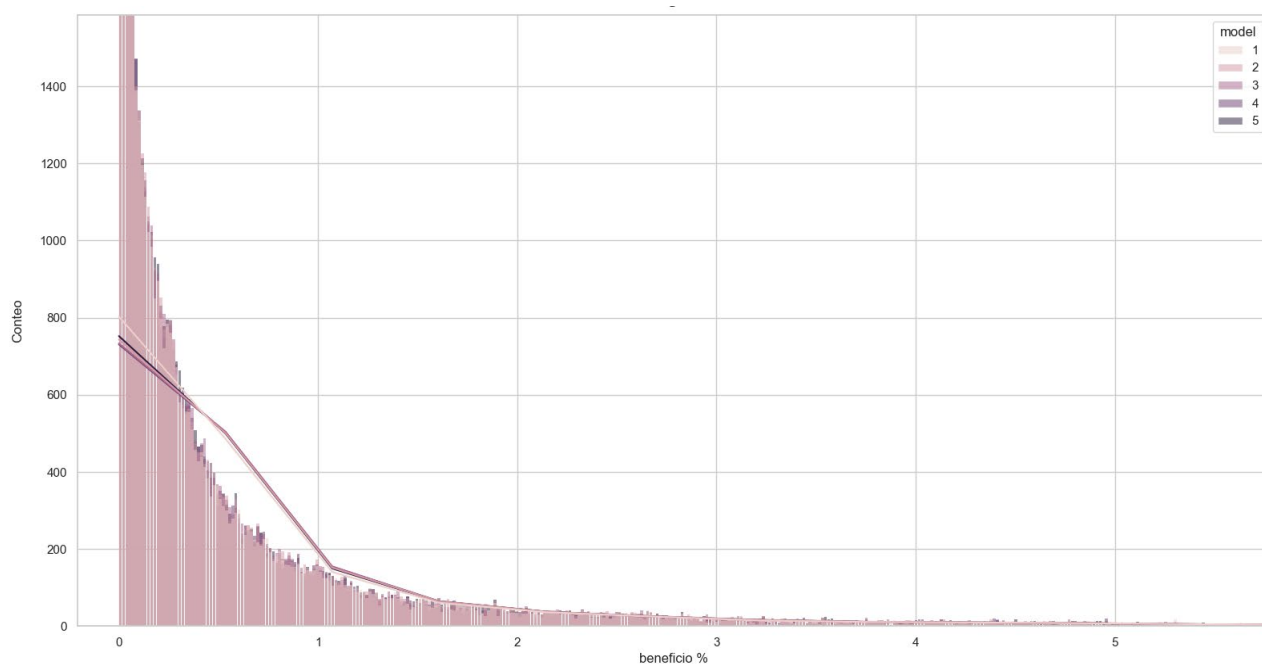


Fig. 10 Histograma que muestra el número de apariciones de una divisa agrupándola por tipo de beneficio



Por este motivo, vamos a representar el histograma en escala logarítmica, obteniendo así una mejor representación de los valores al aplicar logaritmos en ambos ejes, no modificando el resultado final, pero si la escala.

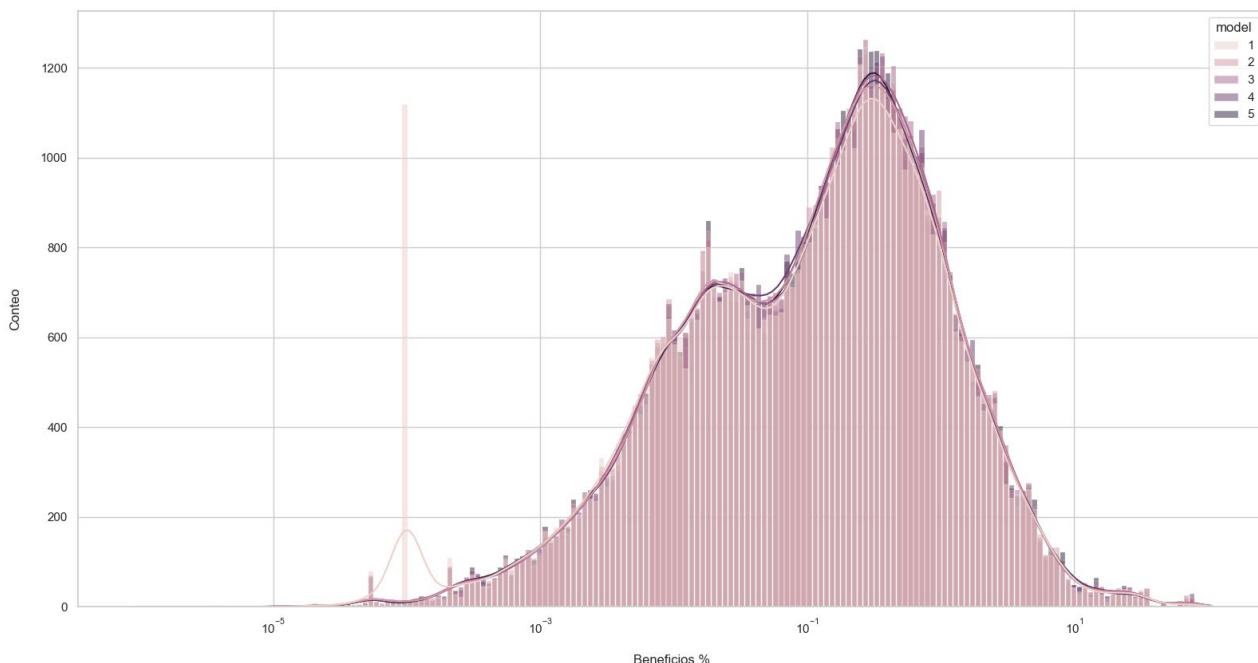


Fig. 11 Histograma suavizado mediante logaritmos

Como vemos, de igual manera, una gran parte de los datos se encuentra en torno a un beneficio casi nulo, 1%, siguiendo así una distribución con una media bien definida en escala logarítmica. Aunque tiene dos modas, eso nos indicaría que la distribución de beneficios es asemeable a una distribución log-normal.

3.2.4 Estudio de picos de beneficios

Hemos estudiado la tendencia de las divisas en un ámbito global, a lo largo de 60 días, y hemos visualizado cómo en ocasiones, para las 5 muestras obtenidas, hay días donde el beneficio teórico que podríamos alcanzar es muy elevado, llegando en una ocasión a sobrepasar el 100% de beneficio, algo que a simple vista podría llevarnos a pensar que nuestros resultados no son correctos.

Por este motivo vamos a estudiar la metodología seguida para sacar los datos dentro de un día. Para este caso vamos a estudiar el día más atípico que hemos podido observar, el 19 de mayo de 2022.



3.2.4.1 Proceso de aleatorización

El primer paso es obtener el número de oportunidades que consideremos necesario para poder validar los caminos encontrados. Para nuestro estudio son 5 muestras de 1000 iteraciones.

Pero en el caso que nos ocupa, vamos a escoger únicamente la muestra 2, donde se encontró el pico con un beneficio de 106%.

Vamos a representar los 100 primeros valores con mayor porcentaje de beneficio, con sus respectivos caminos que se deberían tomar para conseguir esta rentabilidad.

Beneficio %	Rutas
106,5255314	['EUR', 'ZWL', 'BYN', 'EUR']
78,3588165	['EUR', 'ZWL', 'TND', 'EUR']
67,90986706	['EUR', 'ZWL', 'MUR', 'EUR']
67,71618819	['EUR', 'ZWL', 'MMK', 'EUR']
67,50473659	['EUR', 'ZWL', 'LRD', 'EUR']
67,00252781	['EUR', 'ZWL', 'CDF', 'EUR']
66,44548579	['EUR', 'ZWL', 'SDG', 'EUR']
66,40532821	['EUR', 'ZWL', 'SLL', 'EUR']
66,39878924	['EUR', 'ZWL', 'GYD', 'EUR']
66,20217459	['EUR', 'GBP', 'ZWL', 'FJD', 'EUR']
66,01115411	['EUR', 'ZWL', 'GTQ', 'EUR']
65,84858945	['EUR', 'ZWL', 'DOP', 'EUR']
65,79178246	['EUR', 'ZWL', 'MDL', 'EUR']
65,52692897	['EUR', 'ZWL', 'NGN', 'EUR']
65,43855508	['EUR', 'ZWL', 'UZS', 'EUR']
65,42555873	['EUR', 'ZWL', 'ARS', 'EUR']
65,26153461	['EUR', 'ZWL', 'CRC', 'EUR']
65,16584808	['EUR', 'ZWL', 'DZD', 'EUR']
65,09453114	['EUR', 'ZWL', 'JMD', 'EUR']
64,96680971	['EUR', 'ZWL', 'COP', 'EUR']
62,03593881	['EUR', 'ZWL', 'PYG', 'EUR']
48,07238491	['EUR', 'GGP', 'ZWL', 'SGD', 'EUR']
47,68497985	['EUR', 'ZWL', 'PHP', 'EUR']
47,50021817	['EUR', 'ZWL', 'JPY', 'EUR']
47,50011543	['EUR', 'ZWL', 'AUD', 'EUR']
47,41834359	['EUR', 'ZWL', 'HUF', 'EUR']
47,08820437	['EUR', 'ZWL', 'BRL', 'EUR']
34,77968114	['EUR', 'JEP', 'ZWL', 'SAR', 'EUR']

Beneficio %	Rutas
7,756883774	['EUR', 'RWF', 'WST', 'EUR']
7,499962299	['EUR', 'GBP', 'TWD', 'TND', 'EUR']
7,166296052	['EUR', 'GYD', 'TND', 'EUR']
7,143031729	['EUR', 'SDG', 'TND', 'EUR']
6,332041293	['EUR', 'RWF', 'BIF', 'EUR']
6,1200404	['EUR', 'SBD', 'TND', 'EUR']
5,579216885	['EUR', 'RWF', 'MMK', 'EUR']
5,560267557	['EUR', 'RWF', 'UYU', 'EUR']
5,47854581	['EUR', 'MGA', 'TND', 'EUR']
4,775716272	['EUR', 'RWF', 'HTG', 'EUR']
4,539142991	['EUR', 'RWF', 'BOB', 'EUR']
4,5184378	['EUR', 'RWF', 'MVR', 'EUR']
4,407184053	['EUR', 'SYP', 'MGA', 'EUR']
4,331230698	['EUR', 'RWF', 'ALL', 'EUR']
4,235959364	['EUR', 'HNL', 'TRY', 'SBD', 'CZK', 'EUR']
4,209077897	['EUR', 'RWF', 'MUR', 'EUR']
4,200697491	['EUR', 'RWF', 'NGN', 'EUR']
4,17468471	['EUR', 'RWF', 'ARS', 'EUR']
4,146859526	['EUR', 'RWF', 'UZS', 'EUR']
4,126603526	['EUR', 'RWF', 'ETB', 'EUR']
4,123532799	['EUR', 'KGS', 'MAD', 'EUR']
3,944639654	['EUR', 'SYP', 'AFN', 'EUR']
3,843409076	['EUR', 'DZD', 'WST', 'EUR']
3,779531794	['EUR', 'RWF', 'RUB', 'EUR']
3,673950066	['EUR', 'GBP', 'MDL', 'WST', 'EUR']
3,453041625	['EUR', 'RWF', 'AED', 'MAD', 'EUR']
3,44793588	['EUR', 'RWF', 'AMD', 'EUR']
3,442031874	['EUR', 'MVR', 'WST', 'EUR']



34,22832733	['EUR', 'ZWL', 'KID', 'EUR']	3,33451205	['EUR', 'VES', 'TND', 'EUR']
34,1928985	['EUR', 'ZWL', 'AWG', 'EUR']	3,280964186	['EUR', 'KGS', 'MGA', 'EUR']
34,19003398	['EUR', 'ZWL', 'NPR', 'EUR']	3,126461975	['EUR', 'BHD', 'TND', 'EUR']
34,17821329	['EUR', 'ZWL', 'DJF', 'EUR']	3,1248188	['EUR', 'USD', 'TND', 'EUR']
34,17737932	['EUR', 'ZWL', 'KWD', 'EUR']	3,118577811	['EUR', 'SYP', 'CDF', 'EUR']
34,17338416	['EUR', 'ZWL', 'LBP', 'EUR']	2,961445197	['EUR', 'NGN', 'MAD', 'EUR']
34,16253094	['EUR', 'ZWL', 'AED', 'EUR']	2,933586339	['EUR', 'DKK', 'MDL', 'MAD', 'EUR']
34,16198704	['EUR', 'ZWL', 'BBD', 'EUR']	2,931877037	['EUR', 'MDL', 'MAD', 'EUR']
30,04181425	['EUR', 'RWF', 'BYN', 'EUR']	2,87524313	['EUR', 'GYD', 'WST', 'EUR']
25,46335278	['EUR', 'MWK', 'BYN', 'EUR']	2,843521165	['EUR', 'AZN', 'MAD', 'EUR']
24,18692102	['EUR', 'MVR', 'BYN', 'EUR']	2,817153468	['EUR', 'SYP', 'HTG', 'EUR']
24,1273733	['EUR', 'LYD', 'BYN', 'EUR']	2,804575955	['EUR', 'HNL', 'MAD', 'EUR']
21,66094907	['EUR', 'AFN', 'BYN', 'EUR']	2,803758123	['EUR', 'BRL', 'SBD', 'FKP', 'EUR']
15,09294171	['EUR', 'MDL', 'BYN', 'EUR']	2,799660758	['EUR', 'SYP', 'LYD', 'TVD', 'EUR']
8,773880012	['EUR', 'SHP', 'KZT', 'BYN', 'EUR']	2,789471829	['EUR', 'RWF', 'KRW', 'EUR']
8,725749398	['EUR', 'KZT', 'BYN', 'EUR']	2,788177519	['EUR', 'IRR', 'AFN', 'EUR']
8,532399563	['EUR', 'VES', 'BYN', 'EUR']	2,767182627	['EUR', 'DOP', 'MAD', 'EUR']
8,331530693	['EUR', 'TRY', 'BZD', 'BYN', 'EUR']	2,74459737	['EUR', 'SYP', 'GYD', 'EUR']
8,303151695	['EUR', 'BBD', 'BYN', 'EUR']	2,738842893	['EUR', 'SYP', 'LYD', 'EUR']
8,02881881	['EUR', 'DZD', 'TND', 'EUR']	2,736446501	['EUR', 'MVR', 'MAD', 'EUR']
8,003532864	['EUR', 'GIP', 'YER', 'TND', 'EUR']	2,698526431	['EUR', 'RWF', 'AWG', 'EUR']
7,80206602	['EUR', 'PHP', 'TND', 'EUR']	2,675766396	['EUR', 'MNT', 'AFN', 'XOF']

Tabla 2 Representación ordenada de las 100 mejores rutas de beneficio de la realización 2

Observando la Tabla 2, podemos comprobar como el camino que nos retorna mayor beneficio está compuesto por el euro (EUR), el dólar zimbabuense (ZWL) y el rublo bielorruso (BYN).

3.2.4.2 Método de comprobación

Una vez que conocemos las rutas que nos ofrecen este beneficio, vamos a comprobar por un lado si este proceso se hizo correctamente, y por otro lado vamos a comprobar si los datos base de los que partimos son datos válidos.

Para este último apartado, comprobaremos los datos de intercambio de divisas de nuestra base de datos con un registro de Google de esa fecha en concreto.

El único inconveniente es que la hora de registro con la que comprobaremos esto, no coincide con la hora en la que nosotros registramos todos los valores, por tanto, para comprobarlo nos basaremos en si el valor del tipo de cambio desde que nosotros registramos los valores hasta la hora en la que la página web obtuvo su



registro es una diferencia muy exagerada es su movimiento oscila entre los valores aceptados para los tipos de cambio.

3.2.4.2.1 Comprobación de nuestra base de datos

Nuestra base de datos es una matriz de 161x161 donde quedan registrados todos los enlaces entre divisas. Si nos centramos en los saltos correspondientes a nuestro caso de estudio EUR → ZWL → BYN → EUR observamos los siguiente.

Para un capital inicial de 1€, los tipos de cambio serían:

EUR/ ZWL = 302,1648

ZWL/ BYN = 0,01968

BYN/ EUR = 0,3473

Si multiplicamos los tipos de cambio obtenido con el capital inicial, observamos que acabamos con un total de 2,065€, restando el capital inicial nos queda el beneficio del 106,52% que hemos obtenido previamente. De esta forma, nuestra metodología está correctamente aplicada, pero podría darse la situación de que directamente los cambios entre divisas fueran erróneos desde el principio.

Para ello procederemos a realizar la comprobación con fuentes auxiliares para aportar veracidad a nuestra base de datos.

3.2.4.2.2 Comprobación con base externa de Google

Para este caso hemos usado la conocida web CUEX² donde hemos podido extraer todos los tipos de cambios para las monedas implicadas en este camino.

Además de conocer el tipo de cambio para esa fecha, CUEX nos ofrece varias gráficas para conocer el estado de las divisas y poder analizar si este tipo de oportunidad de arbitraje tan elevada tiene sentido o no.

Como podemos observar en la Fig.12, el tipo de cambio entre el primer salto EUR → ZWL es de 339,2670.

Esta gráfica representa únicamente el último valor registrado del tipo de cambio, es decir, el valor en el momento del cierre del mercado financiero donde se esté operando. Generalmente al momento del cierre, el valor coincide con el promedio de cambios que han tenido lugar a lo largo del día, con lo que podemos deducir que el valor mostrado en la gráfica representa el promedio de tipos de cambios acaecidos a lo largo del día.

² Página web utilizada para extraer los registros de los cambios de divisas de la fecha de estudio, [CUEX](#)



El inconveniente que presenta esta página es que solo recoge los máximos y mínimos del día actual, no pudiendo conocer los valores extremos del día 19 de mayo.

Pese a no poder conocerlo, podemos hacernos una idea de la horquilla en la que este tipo de cambio se mueve, viendo los valores del día en el que se está consultando esta página 15/06/2022.

Mínimo 334,7274

Promedio 365,2196

Máximo 390,4095

Analizando estos valores, nos encontramos con una diferencia incremental de un 9,1% para el caso más desfavorable, con respecto del valor medio.

Extrapolando este ejemplo a nuestro caso concreto, conociendo el valor promedio del día 19/05/2022 de 339,2670 y nuestro valor obtenido de 302,1648, obtenemos una diferencia del 12,2%, un valor que se considera aceptable.



Fig. 12 Gráfica que representa el tipo de cambio entre EUR y ZWL el 19/05/2022

Para el siguiente tipo de cambio dentro de nuestro camino atípico, el valor que obtuvimos nosotros en relación al capturado por CUEX, y que podemos observar en la Fig.13, es prácticamente idéntico, dando por válido nuestro valor y comprobando que los valores que nuestra API captura, son datos correctos, pudiendo en ocasiones ser más extremos por el hecho de capturar los valores en el momento de apertura de los mercados financieros, hecho que irremediablemente lleva implícito unos precios más alejados del promedio a lo largo del día, dado en parte por la ineficiencia del mercado financiero anteriormente descrita.





Fig. 13 Gráfica que representa el tipo de cambio entre ZWL y BYN el 19/05/2022

Podemos observar también que el tipo de gráfica para el cambio ZWL → BYN en este período es mucho más suave que las otras dos gráficas.

Esto no es casualidad, dado el hecho histórico que estamos viviendo y por consiguiente pueden aparecer situaciones donde las oportunidades de arbitraje florezcan con mayor facilidad.



Fig. 14 Gráfica que representa el tipo de cambio entre BYN y EUR el 19/05/2022

Como última gráfica, nos encontramos la relación entre el BYN y el EUR Fig.14, donde el valor promedio obtenido por CUEX es de 0,2811 y lo valores extremos a día de hoy son:

Mínimo 0,2737

Máximo 0,3592

Como nuestro valor se encuentra dentro de este margen, podemos dar por válido el valor de nuestro programa.

Como hemos podido comprobar, este valor que aparentemente podría parecer fruto de un error en el procedimiento o en la toma de datos, se trata únicamente de una situación excepcional que es igual de válida que el resto de los valores encontrados.



Buscando los hechos acontecidos en el día del estudio, hemos encontrado que una de las noticias que se venían escuchando días antes, era referente a la salida de una de las cadenas de comida rápida más importantes del mundo, McDonald's³.

Este hecho pudo hacer que el valor del rublo se depreciase de tal manera que se produjese una oportunidad de arbitraje inusual.

Para finalizar este apartado, cabe resaltar que pese a que esta metodología de trabajo sea lenta para obtener grandes oportunidades de beneficio como es el caso del ejemplo, es un paso para seguir para poder ir optimizando el algoritmo y conseguir mejoras en cuanto a eficacia y posible utilización para un caso de inversión real.

3.2.5 Moneda que retornar el mayor beneficio

Otro estudio que hemos realizado está enfocado en encontrar la divisa que, a lo largo de los días, ha aparecido en más ocasiones en los caminos que retornar más de un 20% de rentabilidad.

Hemos excluido la moneda origen ya que ésta va a aparecer un 100% de las veces.

Dado que los caminos con un beneficio mayor al 20% son muy escasos, hemos plasmado en un diagrama circular el porcentaje de aparición de las monedas en estas rutas.

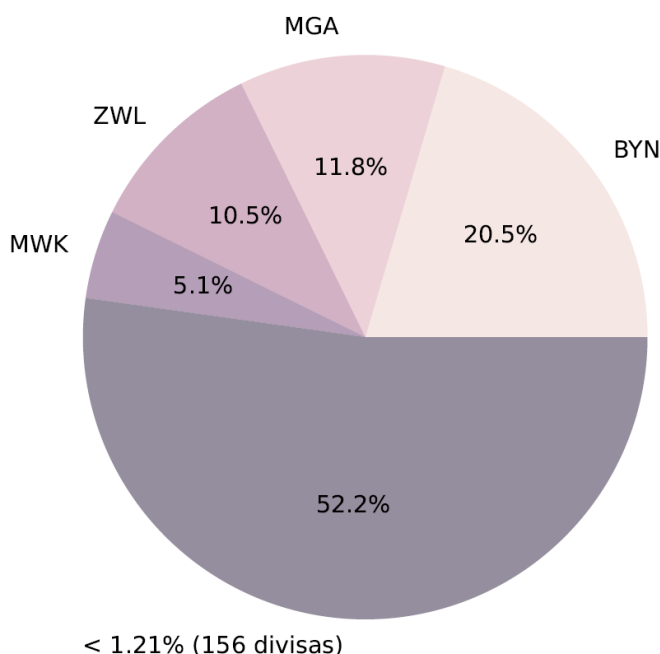


Fig. 15 Porcentaje de aparición de monedas en rutas con un beneficio superior al 20%

³ Noticia extraída de [EL PAÍS](#)



Como podemos observar en la Fig.17, la moneda que aparece en más rutas que retornan más del 20% es el BYN. No es de extrañar que sea esta la divisa que tiene mayor protagonismo, pues es la moneda principal que se ha visto envuelta en los recientes conflictos sucedidos en Europa a lo largo de estos últimos meses.

No debemos caer en el error de pensar que la porción de la gráfica correspondiente al 52.2% es la moneda que más se repite y, por tanto, sería la mejor opción. Debemos pensar que en esta gráfica deben aparecer un total de 160 divisas ya que son todas las divisas usadas en los algoritmos aplicados (restamos el € pues debemos excluir a la moneda origen), por este motivo, se ha pues un límite a la hora de generar las gráficas para mayor limpieza de ésta.

Para que la gráfica no quede saturada con el porcentaje de aparición de cada divisa, hemos juntado en una única porción, la suma de todas aquellas divisas cuya tasa de aparición sea menor a un tanto por ciento elegido según la gráfica.

En la Fig. 17 observamos cómo 156 divisas de 160, tienen una tasa de aparición menor al 1,21%, por tanto, hemos sumado todos los porcentajes de cada divisa y lo hemos aunado en una única porción del diagrama, haciendo un total del 52.5%.

Podemos observar una vez más como todo sigue teniendo sentido, es decir, se sigue corroborando que, a grandes rasgos, más de la mitad del total de rutas obtenidas, una gran cantidad de ellas retornan muy poco beneficio.

A continuación, mostraremos 2 gráficas semejantes a la anterior, pero esta vez obteniendo el porcentaje de aparición de las monedas en rutas del 5% y del 1% respectivamente.

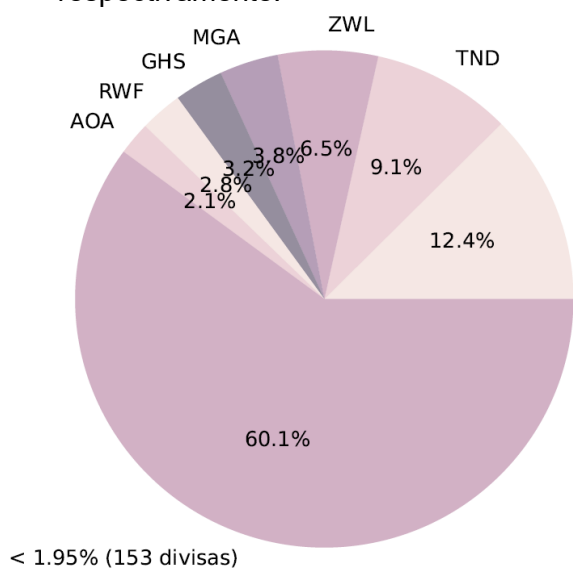


Fig. 17 Porcent. aparición de monedas en rutas del 5%

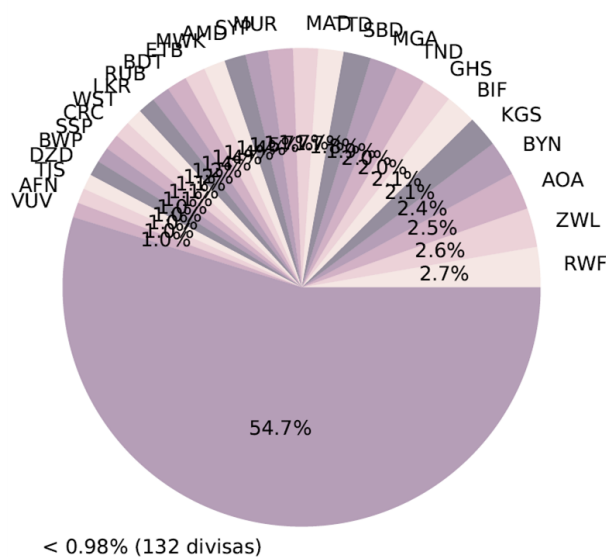


Fig. 16 Porcent. aparición de monedas en rutas del 1%



Como última observación, cabe destacar que en el reparto del 1%, es lógico pensar que su distribución sea más proporcional entre todas las monedas, pues casi todas las monedas aparecen como mínimo una vez en alguna de las 300.000 rutas que hemos analizado.

3.2.6 Correlación entre beneficio y longitud de la ruta

Como último punto de nuestro trabajo, vamos a estudiar la relación, si existiera, entre la longitud que conforman las rutas halladas con el beneficio que estas proporcionan.

Cuando nos referimos a longitud de caminos nos referimos al número de divisas por el que está conformada la ruta que deberíamos seguir si queremos obtener algún beneficio. En la Fig. 20 hemos representado el número de enlaces del camino como el valor del eje de abscisas, mientras que el beneficio se representará en el eje de ordenadas.

Cada punto representa un posible camino a elegir. Como vemos, encontramos caminos con un mínimo de 2 enlaces, hasta 7. Un camino de longitud 3 se correspondería por ejemplo con un camino donde el número de enlaces sea 3, EUR -> FKP -> XOF -> EUR.

En los caminos de longitud 2 partimos de la moneda inicial y realizamos un cambio para regresar a nuestra divisa inicial. Esta solución no tiene lógica pues, pese a que nuestro algoritmo encuentra un beneficio, estos son beneficios muy pequeños.

Los caminos que ofrecen un mayor beneficio son aquellos de longitud 3, seguido por los caminos de longitud 4, pudiendo comprender por qué a esta práctica se la conoce generalmente como arbitraje triangular.

Como curiosidad, el camino más largo que hemos podido encontrar se trata de un camino de longitud 7, EUR -> FKP -> XOF -> GBP -> AZN -> BMD -> UAH -> EUR, cuyo beneficio ronda el 0,13 % y donde vemos como la divisa BYN no se encuentra en él.



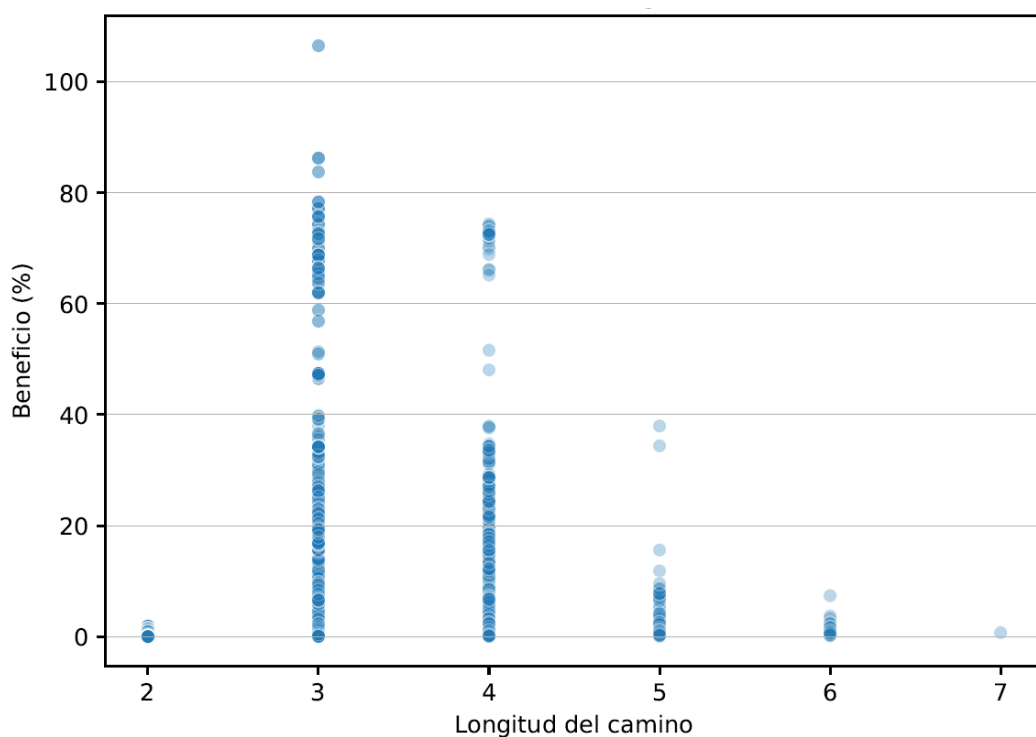


Fig. 18 Diagrama de dispersión entre longitud de rutas y el beneficio retornado

3.2.7 Correlación entre la longitud del camino y su número de aparición

Como último resultado que hemos obtenido del análisis estadístico, hemos estudiado la distribución del número de caminos en función de su longitud. Es el diagrama de cajas representado en la Fig. 21, donde podemos ver cómo la distribución del número de caminos de una longitud dada es más o menos simétrica, correspondiéndose con una Gaussiana, a excepción de los caminos más largos.

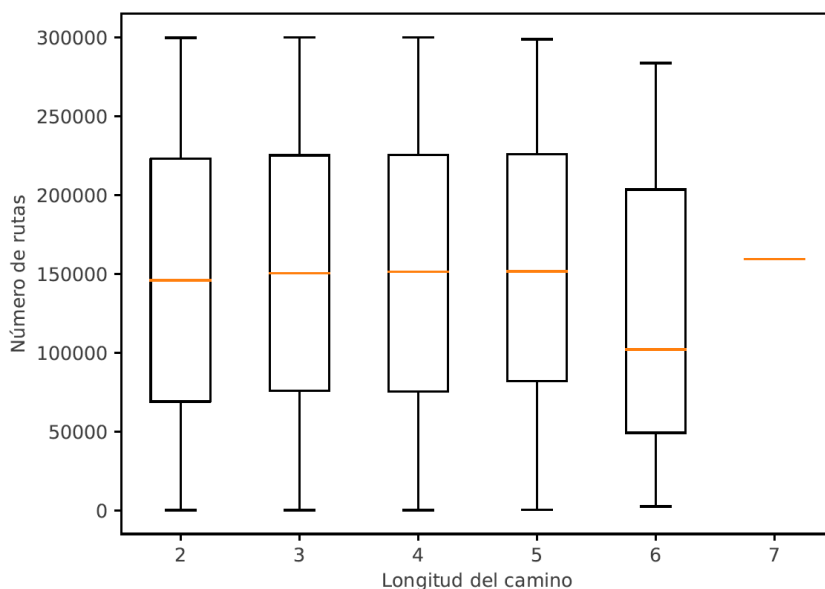


Fig. 191 Diagrama de cajas del número de caminos divididos por su grado



4 CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo, hemos partido de una introducción al concepto de arbitraje y los distintos tipos que existen, para después aplicar algoritmos matemáticos que puedan automatizar procesos de optimización de oportunidades de arbitraje, que a simple vista pueden parecer complicados. Hemos caracterizado también las propiedades estadísticas de los caminos óptimos resultantes.

Realizando un correcto estudio sobre todas las variables con las que contamos, podemos llegar a obtener en mayor o menor medida un beneficio considerable aprovechando las desigualdades de los mercados de divisas existentes, en momentos muy concretos de tiempo.

Las observaciones que podemos sacar de los resultados obtenidos son, en parte coherentes con lo sucedido a nivel macroeconómico, avalando que nuestro método adaptado para el estudio de viabilidad de posibles maneras de inversión es correcto.

Una de las conclusiones más importantes que hemos podido obtener, y que hemos sido capaces de demostrar, se trata de los caminos para diferentes días que reportan la máxima rentabilidad.

Llama la atención ver cómo podemos conseguir tan altos beneficios. Si consiguiéramos optimizar el programa de tal forma que estos caminos pudieran ser conocidos en décimas de segundo, tendríamos una herramienta de gran utilidad práctica, ya que, con la estructura actual del programa, enfocado al estudio de los tipos de cambios entre divisas y no a una aplicación real, es inalcanzable.

Estos beneficios hemos visto que son muy volátiles dependiendo del día en el que nos encontremos, dando a entender que es prácticamente imposible predecir si un determinado camino, que previamente haya sido beneficioso, puede volver a serlo en otro momento del tiempo. Por otro lado, podemos afirmar que aquellos caminos que posean longitudes de 3 o 4 movimientos, son caminos que van a tener más probabilidad de devolver un camino con rentabilidad elevada.

Tiene sentido pensar que la longitud de los caminos influye positivamente, pues una longitud más alta de movimientos ocasionaría una lentitud mayor a la hora de aplicar el método, aumentando consigo el riesgo de que el valor de los enlaces del camino se actualice.

No debemos olvidar que los datos que hemos visualizado pertenecen a un momento en el día muy concreto, donde, debido a la hora de captura de datos, las probabilidades de encontrar un camino con mayor probabilidad aumentan sustancialmente, pero la realidad es que la probabilidad de encontrar los valores expuestos es muy pequeña.



Generalmente, debido a la gran cantidad de caminos que retornan un menor beneficio, es más probable encontrar rápidamente un camino con una rentabilidad muy pequeña, y en este método de inversión, lo que prima es la velocidad de actuación una vez que se ha encontrado el camino, ya que los valores pueden cambiar en menos de un segundo, haciendo inservible el camino encontrado.

Por último, podemos resaltar cómo en el mercado de divisas, gran parte de lo que sucede en él, está afectado por todos y cada uno de los sucesos a nivel macroeconómico que suceden en el mundo, por tanto, podemos afirmar que el movimiento de las divisas no se debe a procesos aleatorios, sino que existen variables correlacionadas que pueden influenciar los tipos de cambio.

Sin ir más lejos, las rutas máximas encontradas están ligadas a dos monedas especialmente interesantes. Una de ellas, el rublo bielorruso, moneda que más cambios está sufriendo ya que es la principal afectada por el conflicto acaecido entre Rusia y Ucrania en los meses donde se realizó este trabajo, y la otra el dólar zimbabuense, una divisa muy poco utilizada en el mercado de divisas, consiguiendo así que las posibles ineficiencias que pudieran aparecer en los mercados financieros tarden mucho más en ser actualizadas, debido a que el flujo de oferta y demanda es muy bajo.

Como vemos, independientemente del país en el que residamos, cualquier moneda que pueda operar en los mercados financieros, por muy insignificante que a priori pueda parecer, dándose unas circunstancias concretas puede ocasionar un gran movimiento a nivel mundial en la sociedad, provocando discrepancias altamente beneficiosas, a nivel económico, que pueden ser explotadas con los conocimientos y las herramientas adecuadas.



5 REFERENCIAS

- [1] Bangura, M., Boima, T., Pessima, S., & Kargbo, I. (2021). Modeling Returns and Volatility Transmission from Crude Oil Prices to Leone-US Dollar Exchange Rate in Sierra Leone: A GARCH Approach with Structural Breaks. *Modern Economy*, 12, 555-575. **[DOI]**

- [2] Froese, W. and Ludlow, M. (2014) Efficacy of Over-the-Counter (OTC) Medical Device Products as a Tool in Clinical Weight Management. *Food and Nutrition Sciences*, 5, 1637-1643. doi: 10.4236/fns.2014.517176.

- [3] Martínez Martínez, D. C. (2002). La creación de una Cámara de Compensación en Colombia.

- [4] Aguirre Álvarez, C. B. (2018). Influencia de los intermediarios bancarios y no bancarios en el desarrollo de las MYPES del sector comercio del distrito de Huánuco-2016.

- [5] Darbi, T.A.T.M. and Al Aazzabi, S.E. (2021) The Structure of Treasury and Foreign Exchange. *Open Access Library Journal*, 8: e7968. **[DOI]**

- [6] Ortiz Wadgymar, A. (1983). LA ECONOMIA MEXICANA: RETROSPECTIVA, DILEMA ACTUAL Y PERSPECTIVAS. *Problemas Del Desarrollo*, 14(56), 33–53. **[DOI]**

- [7] Corella, Alejandro Crespo (2016). El gran abanico mundial: “Mercado de divisas” [TFG]. Universidad de Zaragoza.

- [8] Epaphra, M. (2017) Modeling Exchange Rate Volatility: Application of the GARCH and EGARCH Models. *Journal of Mathematical Finance*, 7, 121-143. **[DOI]** (página 5)

- [9] Approximate distributed Bellman-Ford algorithms (Vol. 42, no. 8, pp. 2515–2517). (1994). B. Awerbuch, A. Bar-Noy and M. Gopal. **[Google Scholar]**

- [10] Soni, R. (2018) Does Firms Have Impact of Currency Appreciation and Currency Volatility on Market Shares? —Study of Selected Financial and Non-Financial Firms of India. *Theoretical Economics Letters*, 8, 1004-1017. **[DOI]**



- [11] A. Fernández-Pérez, F. Fernández-Rodríguez and S. Sosvilla-Rivero, "Genetic Algorithm for Arbitrage with More than Three Currencies," *Technology and Investment*, Vol. 3 No. 3, 2012, pp. 181-186. doi: 10.4236/ti.2012.33025.
- [12] Dall'Orto Cacho, D. (2013). El teorema fundamental de precios de arbitraje con costos de transacción en un mercado de divisas.
- [13] de la Dehesa, Guillermo (2008). La especulación sobre las materias primas. *El País*, 14.
- [14] Armendáriz, H. L. (2021). Caracterización de arbitraje financiero en el mercado de divisas.
- [15]] S. Bai and F. Robinson, "Automated Triangular Arbitrage: A Trading Algorithm for Foreign Exchange on a Cryptocurrency Market," KTH Royal Institute of Technology. Sweden
- [16] Menéndez Velázquez, A. (1998). Una breve introducción a la teoría de grafos. *Suma*.
- [17] S. Bai and F. Robinson, "Automated Triangular Arbitrage: A Trading Algorithm for Foreign Exchange on a Cryptocurrency Market," KTH Royal Institute of Technology. Sweden.
- [18] Idrisu, M., Evans, P. O., & Nyor, N. (2021, July 28). FUTMinna Institutional Repository: Comparative analysis and implementation of dijkstra's and floyd's algorithms for optimal transportation network of motorcycle town service. namp. **[Book]**
- [19] Hernández, E. B. (2005). Simulación de los Algoritmos Dijkstra y Bellman-Ford para ruteo de paquetes en redes de comunicaciones.



- [20] Olivos Iparraguirre, J. (2009). Algoritmos para caminos mínimos (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Ingeniería).
- [21] Laarhoven, P. V. J., Aarts, E. H., & Aarts, E. H. L. (2010). Simulated Annealing: Theory and Applications (Mathematics and Its Applications Book 37) (Softcover reprint of hardcover 1st ed. 1987 ed.). Springer Netherlands.
- [22] J. Y. Yen., An algorithm for finding shortest routes from all source nodes to a given destination in general networks. Quarterly of Applied Mathematics 27:526-530, 1970.
- [23] M. Papaefthymiou and J. Rodriguez, Implementing parallel shortest-paths algorithms, DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, pp. 59-68, 1994.
- [24] Hernández Zamora, Pablo. (2022, jul. 2). Arbitrage-Finder-algorithm. GitHub. Retrieved from **[Código informático completo del programa]**
- [25] Do, B., and R. Faff. 2012. "Are Pairs Trading Profits Robust to Trading Costs?" Journal of Financial Research 35 (2): 261–287. doi: 10.1111/jfir.2012.35.issue-2. **[Google Scholar]**



6 ANEXOS

6.1 Pseudocódigo Bellman-Ford

```
1. Bellman-Ford (G,s)
2.
3. Inicializar
4.   for cada v perteneciente a V[G]
5.     do d[v] = infinito
6.       p[v] = nulo
7.   p[s] = 0
8.
9. for i=1 to V[G]-1
10.  do for cada arco (u,v) perteneciente a A[G]
11.    Relajación
12.    if d[v] > d[u] + w(u,v) then
13.      d[v] = d[u] + w(u,v)
14.      p(v) = u
15.
16. for cada arco (u,v) chequea lazo de peso negativo
17.  do if d[v] > d[u] + w(u,v) then
18.    return FALSO 'el algoritmo no converge
19. return VERDADERO
```

Este pseudocódigo se utiliza para una mayor comprensión del algoritmo y que sea fácilmente interpretado para poder transcribirse al lenguaje en el que más cómodo nos sintamos.

En nuestro caso, este lenguaje es Python, donde hemos aplicado un tipo de programación denominada programación orientada a objetos (POO), esto quiere decir que todo el programa crea dependencias entre muchas variables, encapsulando estas mismas dentro de una estructura conocida como clase, para poder compartir entre funciones, los valores necesarios.



6.2 Código modificado para aplicación del algoritmo Bellman-Ford

Como es imposible plasmar el código entero, ya que este cuenta con más de 2.000 líneas de código, algunas subfunciones utilizadas para desempeñar el algoritmo no serán explicadas para conseguir una mayor comprensión del código base del algoritmo.

```
1.     def bellman_ford(self):
2.         """
3.         Algoritmo de Bellman-Ford para detectar ciclos negativos.
4.         :param src: starting currency
5.         :param starting_amount: starting amount in currency
6.         :returns: void
7.         """
8.         if not sp.Pmonedas:
9.             sp.Pmonedas = self._digraph.scrapers.monedas
10.        max = len(self._digraph.graph)-1
11.        for _ in range(max):
12.            for w in self._digraph.weights:
13.                c +=1
14.                # w tuple en el formato (u, v)
15.                u, v = w
16.                temp = np.inf
17.                if self._digraph._distances[u] != np.inf and self._digraph.w
18.                   eights[w] != '-' :
19.                    temp = self._digraph._distances[u] + self._digraph.weight
20.                   s[w] # distance(u) + weight(u, v)
21.                    if self._digraph._distances[v] > temp:#minimo encontrado
22.                        self._digraph._distances[v] = temp
23.                        self._digraph.predecesora[v] = u
24.                        if v == self._currency:
25.                            return *self.get_arbitraje(), c
26.
27.        # negative cycle detection
28.        for w in self._digraph.weights:
29.            u, v = w
30.            if self._digraph.weights[w] != '-':
31.                temp =self._digraph._distances[u] + self._digraph.weights[w]
32.                if v == self._src:  currency
33.                    if temp < self._digraph._distances[v]:
34.                        return self.get_arbitraje()
35.        return None # Si la función llega a este punto no hay arbitraje
```



6.3 Función que almacena todos los datos de la red

Esta función es indispensable para poder trabajar correctamente, ya que se encarga de capturar los 25.921 datos de donde extraigamos los caminos.

```
1. def get_rates(self, tipo , filtro):
2.     '''
3.     Metodo para extraer los valores de la API
4.     'https://v6.exchangerate-api.com/v6/{moneda}/latest/{DE}'
5.     '''
6.     def get_values(url, clave = None):
7.         data = requests.get(url,timeout=10)
8.         if data.status_code != 200:
9.             self._password = KG.get_key_api()
10.            url = lambda password= None, DE= None:
11.                f'https://v6.exchangerate-api.com/v6/{password}/latest/{DE}'
12.            return get_values(url(self._password,DE), 'conversion_rat
13.            es')
14.            if clave == None:
15.                return data.json()
16.            else:
17.                return data.json()[clave]
18.
19.        def values_by_API():
20.            '''
21.            Devuelve un self._data con todas las posibles combinaciones
22.            entre distintas monedas
23.            A parte se encarga de rellenar la variable
24.            self._matrix_exchanges
25.            '''
26.            def multihilo(API_data):
27.                '''
28.                Ordena los datos obtenidos de la API
29.                args API_data:  lista de diccionarios
30.                [dict(),dict23(),dict3()]
31.                '''
32.                n = self._key
33.                matrix_total = np.zeros((n,n))          #Array de ceros
34.                np.zeros(rows,columns)
35.                for row in API_data:                    #Se
36.                    #trata de una lista ordenada
37.                    for x, val in list(row.items()):
38.                        matrix_total[self._strs[list(row)[0]]][self._str
39.                        s[x]] = val
40.                return matrix_total
41.
42.            def get_API_lenta(x):
43.                rates = get_values(url(self._password,x), 'conversion_rat
44.                es')
45.                with concurrent.futures.ThreadPoolExecutor() as executor:
46.                    futures = []
47.                    for moneda in self._strs:
48.                        futures.append(executor.submit(get_values, url = url
49.                        (self._password,moneda), clave = 'conversion_rates'))
50.                    #lista de cada extraccion sacada de la API
51.                    extraccion = [ future.result() for future in
52.                    concurrent.futures.as_completed(futures)]
53.                    matrix_total = multihilo(extraccion)
54.                    self._matrix_exchanges = matrix_total
55.
56.            #CREAMOS Dataframe
```



```
46.         df = pd.DataFrame(matrix_total, columns = self._strs, index=
self._strs)
47.         df.to_csv(self._ruta)
48.
49.         #Si no existe copia de seguridad se crea
50.         fecha_larga = datetime.today().strftime('%m.%d.%Y')
51.         fecha_corta = fecha_larga[:-4] + fecha_larga[-2:]
52.         name = fecha_corta + '.csv'
53.         new_path = os.path.join(os.getcwd(), 'arbitrage', 'exchangerat
e')
54.         if name not in set(os.listdir(new_path)):
55.             shutil.copyfile(self._ruta, os.path.join(new_path, name)
)
56.         return df
57.
58.         if tipo.lower() == 'csv':
59.             self._data = values_by_csv()
60.
61.         elif tipo.lower() == 'api':
62.             DE = 'AED'
63.             url = lambda
password =self._password,DE = None: f'https://v6.exchangerate-
api.com/v6/{password}/latest/{DE}'
64.
65.             dict_values = get_values(url(self._password,DE), 'conversion_
rates') #dict {"MONEDA": VALOR,...}
66.             self._keys = {pos: palabra for pos, palabra in
enumerate(tuple([x for x in dict_values.keys()]))}
67.             self._strs = {llave: num for num, llave in self._keys.items()}
68.             self._key = len(self._keys)
69.             self._monedas = set(self._keys.values())
70.
71.             self._data = values_by_API()
72.
73.         elif tipo == 'xlsx':
74.             self._data = values_by_excel()
75.         else:
76.             raise errorTipo
77.         if tipo != 'api':
78.             self._keys = {pos: palabra for pos, palabra in
enumerate(tuple([x for x in self._data.columns]))}
79.             self._strs = {llave: num for num, llave in self._keys.items()}
80.             self._key = len(self._keys)
81.             self._monedas = set(self._keys.values())
82.         return self._data.to_numpy()
```

