

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Aplicación de Control Predictivo en Mercados

Autor: Sebastián Conde Caro

Tutor: José María Maestre Torreblanca

Paula Chanfreut Palacio

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Aplicación de Control Predictivo en Mercados

Autor:

Sebastián Conde Caro

Tutor:

José María Maestre Torreblanca

Profesor titular

Paula Chanfreut Palacio

Predoctoral PIF FPU Ministerio

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Grado: Aplicación de Control Predictivo en Mercados

Autor: Sebastián Conde Caro

Tutor: José María Maestre Torreblanca
Paula Chanfreut Palacio

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

*A quienes siempre confiaron en
mí*

*A quienes me apoyaron en los
malos momentos*

Agradecimientos

Este proyecto surge de la idea de mi tutor José María Maestre Torreblanca. Cuando me sugirió este proyecto no necesité apenas pensar en aceptarlo debido a que siempre he tenido interés en conocer un poco más acerca del funcionamiento del mercado financiero. Por tanto, es la primera persona a la que le quiero agradecer su confianza en mí para desarrollar el proyecto y su apoyo cuando lo necesitaba. También me gustaría agradecer a Paula Chanfreut Palacio, quien ha sido parte fundamental del proyecto y me ha ofrecido su ayuda siempre que lo he necesitado.

Tampoco quiero dejar pasar por alto el apoyo recibido, no solo durante la realización de este proyecto, sino durante toda mi vida educativa y personal a todas las personas que me han acompañado en este camino. Gracias a mi padres, a mi hermana, a mis abuelos y abuelas, a mi familia, a mis amigos y a mis compañeros.

Por último, me gustaría agradecer también a aquellas personas que siempre han estado ahí para apoyarme y ayudarme y nunca perdieron la confianza en mí.

Sebastián Conde Caro

Sevilla, 2020

Resumen

Este proyecto de fin de grado se ha dedicado a basar las decisiones de compra y venta de acciones del mercado de valores en un método de control predictivo. En primer lugar, se realizará una recopilación de literatura de diferentes métodos que se han tenido en cuenta para realizar este proyecto y, además, se realizará un análisis del origen y el funcionamiento del mercado.

A continuación, se llevará a cabo una breve introducción teórica del método a resolver. Este método se basa en los valores históricos de las diferentes empresas para intentar predecir cuál será su valor en el futuro. Dependiendo del valor que se ha predicho, se tomará una decisión de compra o venta de acciones para obtener el máximo beneficio posible.

Después, se indicarán los pasos a seguir tanto para obtener una base de datos fiable como para resolver el problema y se mostrarán los resultados obtenidos a partir de diversas simulaciones. Para acabar, se redactarán unas conclusiones del proyecto y se propondrán diferentes líneas de investigación.

Abstract

This final degree project has been dedicated to base purchasing and selling decisions of the market shares on a predictive control method. Firstly, we provide a revision of the literature that has inspired this project and, also, describe the origin and functioning of the market.

Next, a brief theoretical introduction of the method proposed in this work is provided. This method uses the historical values of the different companies to predict what their value will be in the future. Depending on these predictions, a decision to buy or sell shares will be made to maximize profits.

After that, the steps to follow to obtain a secure database and to solve the problem are indicated. Also, we provide numerical results for various simulation scenarios to illustrate the performance of the proposed method. Finally, some conclusions of the project will be written, and different research lines will be proposed.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Introducción	1
1.1. <i>Recopilación de otros métodos usados</i>	2
2 Funcionamiento del Mercado	5
2.1. <i>Origen de la bolsa</i>	5
2.2. <i>Funcionamiento del IBEX35</i>	7
2.3. <i>Factores que influyen en el mercado</i>	8
3 Planteamiento del problema	11
4 Solución propuesta	15
4.1 <i>Definición y elementos del MPC</i>	15
4.2 <i>Estrategia utilizada</i>	15
4.3 <i>Origen del MPC</i>	16
4.4 <i>Ventajas e inconvenientes</i>	17
5 Resolución del Problema	19
5.1 <i>Base de datos</i>	19
5.2 <i>Control MPC</i>	22
5.3 <i>Prueba realizada sin utilizar la base de datos</i>	26
5.4 <i>Métodos desarrollados</i>	27
5.4.1 <i>Método 1: Bola de cristal</i>	27
5.4.2 <i>Método 2: Tendencia</i>	28
5.4.3 <i>Método 3: Polinomio</i>	28
6 Resultados Obtenidos	31
6.1 <i>Prueba realizada sin utilizar la base de datos</i>	31
6.1.1 <i>Caso 1</i>	31
6.1.2 <i>Caso 2</i>	32
6.1.3 <i>Caso 3</i>	33
6.1.4 <i>Caso 4</i>	34
6.2 <i>Método 1: Bola de cristal</i>	35

6.2.1	Caso 1	35
6.2.2	Caso 2	37
6.3	<i>Método 2: Tendencia</i>	40
6.3.1	Caso 1	40
6.3.2	Caso 2	42
6.4	<i>Método 3: Polinomio</i>	45
6.4.1	Caso 1	45
6.4.2	Caso 2	50
6.4.3	Caso 3	57
6.5	<i>Comparación entre los tres métodos</i>	63
6.5.1	Caso 1	63
6.5.2	Caso 2	64
6.5.3	Caso 3	65
7	Conclusiones del Proyecto	67
7.1	<i>Posibles líneas de ampliación</i>	67
Anexo 1:	Código	69
Referencias		81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6–1. Resultados obtenidos de la empresa 1 en la simulación realizada en el apartado 6.1.1	31
Tabla 6–2. Resultados obtenidos de la empresa 2 en la simulación realizada en el apartado 6.1.1	32
Tabla 6–3. Resultados obtenidos de la empresa 1 en la simulación realizada en el apartado 6.1.2	32
Tabla 6–4. Resultados obtenidos de la empresa 2 en la simulación realizada en el apartado 6.1.2	33
Tabla 6–5. Resultados obtenidos de la empresa 1 en la simulación realizada en el apartado 6.1.3	33
Tabla 6–6. Resultados obtenidos de la empresa 2 en la simulación realizada en el apartado 6.1.3	34
Tabla 6–7. Resultados obtenidos de la empresa 1 en la simulación realizada en el apartado 6.1.4	34
Tabla 6–8. Resultados obtenidos de la empresa 2 en la simulación realizada en el apartado 6.1.4	35
Tabla 6–9. Comparación de resultados según el horizonte de predicción	57
Tabla 6–10. Comparación de resultados de los distintos métodos en la simulación del apartado 6.5.1	64
Tabla 6–11. Comparación de resultados de los distintos métodos en la simulación del apartado 6.5.2	65
Tabla 6–12. Comparación de resultados de los distintos métodos en la simulación del apartado 6.5.3	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Perceptron multicapa	3
Figura 2-1. Escudo de Van Der Beurse	5
Figura 2-2. Portada del periódico London Herald del día 25 de octubre de 1929	6
Figura 4-1. Representación de la señal de control	16
Figura 5-1. Captura de la tabla obtenida de la empresa ACS en formato XLSX	21
Figura 5-2. Captura de la tabla obtenida de la empresa ACS en formato Matlab	22
Figura 6-1. Resultados obtenidos de la empresa ACS en la simulación realizada en el apartado 6.2.1	36
Figura 6-2. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.2.1	36
Figura 6-3. Resultados obtenidos de la empresa Acciona en la simulación realizada en el apartado 6.2.2	37
Figura 6-4. Resultados obtenidos de la empresa Acerinox en la simulación realizada en el apartado 6.2.2	38
Figura 6-5. Resultados obtenidos de la empresa ACS en la simulación realizada en el apartado 6.2.2	38
Figura 6-6. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.2.2	39
Figura 6-7. Resultados obtenidos de la empresa Endesa en la simulación realizada en el apartado 6.3.1	40
Figura 6-8. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.3.1	41
Figura 6-9. Resultados obtenidos de la empresa Endesa en la simulación realizada en el apartado 6.3.2	42
Figura 6-10. Resultados obtenidos de la empresa Ferrovial en la simulación realizada en el apartado 6.3.2	43
Figura 6-11. Resultados obtenidos de la empresa Grifols en la simulación realizada en el apartado 6.3.2	43
Figura 6-12. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.3.2	44
Figura 6-13. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.1.1	45
Figura 6-14. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.4.1.1	46
Figura 6-15. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.1.2	47
Figura 6-16. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.4.1.2	48
Figura 6-17. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.1.3	49
Figura 6-18. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.4.1.3	50
Figura 6-19. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.2.1	51
Figura 6-20. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.4.2.1	52
Figura 6-21. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.2.2	53
Figura 6-22. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.4.2.2	54
Figura 6-23. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.2.3	55

Figura 6-24. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.4.2.3	56
Figura 6-25. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.1	58
Figura 6-26. Resultados obtenidos de la empresa Banco Santander en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.1	59
Figura 6-27. Resultados obtenidos de la empresa Bankia en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.1	59
Figura 6-28. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.1	60
Figura 6-29. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.2	61
Figura 6-30. Resultados obtenidos de la empresa Banco Santander en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.2	62
Figura 6-31. Resultados obtenidos de la empresa Bankia en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.2	62
Figura 6-32. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.2	63

1 INTRODUCCIÓN

Desde la inauguración de los primeros mercados bursátiles, se ha producido un movimiento cada vez mayor de personas que se han empezado a interesar por la bolsa de valores para poder obtener algún beneficio económico mediante la especulación con la compra y venta de acciones. Esto ha provocado la creación de nuevas empresas dedicadas exclusivamente a captar capital para poder invertir en determinados mercados y así generar beneficios. Además de esto, en los últimos años, se ha desarrollado también una tendencia de creación de bots (programas informáticos que ejercen funciones que podrían realizar las personas) que intentan imitar el trabajo que realizan los brokers. Tienen la capacidad de indicar los momentos más adecuados de compra o venta de acciones e incluso de realizar ellos mismos esas operaciones con la previa aprobación de las personas u organismos correspondientes, eliminando así el componente emocional fruto de lo humano, el cual nunca es beneficioso.

Sin embargo, la volatilidad del mercado provoca que no siempre sea positivo el balance de inversiones realizadas en comparación con los resultados obtenidos. De ahí surge la idea de afrontar este problema desde un punto de vista menos común al utilizado mayoritariamente, el de la Automática. La mayoría de los análisis que se pueden encontrar sobre este tema se basan en conceptos teóricos económicos, basados en situaciones financieras, políticas y sociales, o geométricos, como podrían ser picos en las gráficas de valores, líneas de tendencia, etc. También se han utilizado métodos basados en diferentes tipos de controladores. De este último enfoque se hablará más adelante haciendo una recopilación de algunos de los métodos usados para estudiar esta cuestión que consten de un punto de vista parecido al que se va a establecer en este problema.

Para comenzar a trabajar en este proyecto, primero es necesario conocer cómo funciona el mercado financiero. Sin embargo, para entender su situación actual es conveniente adentrarse un poco en sus orígenes y en cómo surge todo. Se concretará un poco sobre cuáles son las pautas que marcan los valores de las acciones de cada empresa y se estudiará la dificultad del análisis del mercado debido a la cantidad de pequeños y grandes factores que pueden influir en él. Como se ha dicho antes, la volatilidad de los valores se debe a esta gran cantidad de factores, lo que hace imposible su predicción. Este análisis se llevará a cabo en el Capítulo 2.

Para poder realizar un análisis perfecto del mercado bursátil, es necesario tener en cuenta muchísimos factores, no sólo aquellos que están relacionados con la situación económica, sino también con el ámbito social y político del país y del resto del mundo, entre otras muchas cosas. Algún acuerdo alcanzado entre países, un conflicto entre ellos o simplemente, unas elecciones políticas condicionan los valores del mercado debido a que influyen en las decisiones de las personas u organismos que compran y venden acciones, generando situaciones en las que estos valores varían constantemente. También habría que tener en cuenta muchos factores imposibles de controlar y predecir, como las decisiones tomadas por los inversores o por las mismas empresas. Todos estos factores están influenciados, a su vez, por el propio mercado. El estado del mercado marca la positividad o negatividad de los inversores a la hora de realizar operaciones bursátiles. También influye en el ámbito político, social, etc., del lugar, por lo que se podría decir que el mercado está influenciado por él mismo.

Por tanto, se parte de la base de que se es conscientes de que en este terreno nada es predecible. Sin embargo, esto no quita que se vaya a intentar obtener los mejores resultados posibles partiendo de unas limitaciones para facilitar el problema y unas condiciones iniciales impuestas que se irán analizando durante el Capítulo 3.

Para analizar el problema, se realizará un método de control predictivo partiendo de los resultados históricos del mercado a estudiar durante los últimos años. Es evidente e importante tener en cuenta que ningún estudio ha encontrado la fórmula perfecta que conozca los futuros avances del mercado debido a la variedad de parámetros que condicionan sus valores. A pesar de todo esto y de muchos más factores que no se pueden controlar, se realizará un control predictivo con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con el recorrido real del mercado. En el Capítulo 4 se profundizará más en este método objetivo, hablando de su origen, las ideas en las que se basa su funcionamiento y la forma en la cual este proyecto se va a servir de este método para intentar conseguir el mayor acercamiento posible a la vida real con la predicción de los valores de las acciones de las distintas empresas del mercado a estudiar.

En el Capítulo 5 se explicará detalladamente todos los pasos que se han seguido a lo largo de la resolución del problema, empezando por la búsqueda e importación de los valores históricos necesarios de las acciones del mercado a estudiar y acabando con nuestro modelo final del método de control predictivo. En relación con esto, se añadirá un anexo que contendrá todo el código desarrollado para poder obtener el modelo que se va a desarrollar y los resultados de las simulaciones realizadas.

Durante el Capítulo 6 se mostrarán los resultados obtenidos al realizar las simulaciones adecuadas mediante el modelo explicado en el capítulo anterior. Para confirmar estos resultados se mostrarán todas las representaciones necesarias que se vean oportunas y que sirvan para comprobar y valorar la exactitud de nuestro modelo. También se evaluará la fiabilidad de estos resultados al realizar distintas simulaciones y el rendimiento económico que se podría obtener si este modelo se llegara a utilizar en la vida real.

Finalmente, se dedicarán algunas páginas para resumir las conclusiones que se obtendrán tras realizar el proyecto contrastadas con todo el material expuesto en el capítulo anterior. También se propondrán algunas líneas futuras de ampliación surgidas tanto por las limitaciones impuestas por el propio modelo como por las limitaciones decretadas para simplificar la resolución del problema. A estas se añadirán algunas surgidas durante todo el proceso de búsqueda de la solución. Todo esto conformará el Capítulo 7.

Un vez se ha comentado la estructura que se va a llevar a cabo para resolver el problema, se va a comenzar por, tal y como se ha dicho, una recopilación de literatura sobre diferentes métodos de afrontar un problema similar al elegido.

1.1. Recopilación de otros métodos usados

Aunque, como se ha dicho explicado anteriormente, este tipo de problemas suelen desarrollarse desde la posición de los conceptos económicos, también se pueden encontrar casos en los que el estudio del mercado se realiza teniendo en cuenta el desarrollo histórico del mismo mediante la predicción de sus valores desde un punto de vista más ingenieril. A continuación, se hará un recopilatorio de varios proyectos que se han resuelto con un método perteneciente a nuestra rama de estudio. Se obviarán, por tanto, todos los análisis del mercado basados en situaciones políticas y sociales, acontecimientos y/o conceptos económicos, teorías geométricas, etc.

Dentro de ese ámbito, hay algunos proyectos que han dedicado sus fuerzas solamente a intentar predecir el mercado sin tener en cuenta la idea de un sistema de inversión, lo cual es precisamente el objetivo de este proyecto. Sin embargo, resulta conveniente hacer un análisis de algunos de ellos, sin tener en cuenta si su objetivo es exactamente el mismo que el propuesto en este problema. Esto se debe a que, para conseguir nuestro objetivo principal, primero se ha de predecir los futuros valores de las acciones de cada empresa para posteriormente decidir si se tomará alguna decisión de compra o de venta. Por ello, esta diferencia de objetivos no será impedimento para que no se tenga en cuenta a la hora de realizar la recopilación de los distintos métodos que se han usado para intentar predecir el mercado.

El primer proyecto que se va a introducir en esta recopilación de literatura tiene como objetivo predecir los valores del mercado y analizar sus tendencias a través de algoritmos de clasificación. Para ello, en primer lugar, crea una base de datos donde contiene todos los registros de las empresas que han formado parte del IBEX35 en algún momento. Este proyecto está basado en la optimización convexa (minimizar una función convexa teniendo en cuenta unas restricciones también convexas), de la cual surgen dos aplicaciones las cuales serán claves a la hora de resolver el proyecto: la clasificación lineal (cuyo objetivo es predecir si un valor determinado subirá o bajará en el futuro) y la regularización de sistemas lineales (mejora la precisión de los cálculos). No se va a profundizar más en este proyecto ya que eso requeriría explicar demasiados conceptos teóricos. [1]

También se ha realizado un estudio del mercado a través de la predicción neuronal mediante el uso del Perceptron multicapa, el cual permite predecir la evolución futura del mercado e identificar las variables que actuarán como entrada para describir la situación actual del mismo. El método de trabajo del Perceptron multicapa consiste en minimizar los posibles errores en la predicción comparando la salida del sistema con los datos reales y retocando los valores de las variables de entrada y su proporción en cuanto a importancia en el resultado final.

Se estudiarán varios modelos matemáticos para ver cómo actúan ante la predicción de series temporales, los cuales serán el modelo de regresión lineal (las estimaciones constan de un término de perturbación), modelos no lineales GARCH-M (caracterizada por el hecho de que la varianza de la perturbación influye directamente en la salida), modelos de aproximación polinómica (centrándose en el uso de polinomios ortogonales) y, finalmente, el modelo de redes neuronales. La singularidad de las redes neuronales consiste en la presencia de capas ocultas que transforman las variables de entrada mediante unas funciones llamadas funciones de activación.

Una de estas redes neuronales la conforma el Perceptron multicapa, el cual es considerado como uno de los mejores modelos matemáticos para aproximar relaciones no lineales. Consta de tres tipos distintos de capas (capas de entrada, capas ocultas y capas de salida) las cuales están compuestas por neuronas, que están conectadas entre ellas dentro de una capa, además de estar conectadas con las neuronas de la capa siguiente. Cuando una neurona recibe información, provoca una respuesta que se difunde a las neuronas de la siguiente capa y así sucesivamente, hasta llegar a la última capa y obtener la respuesta del modelo en conjunto. [2]

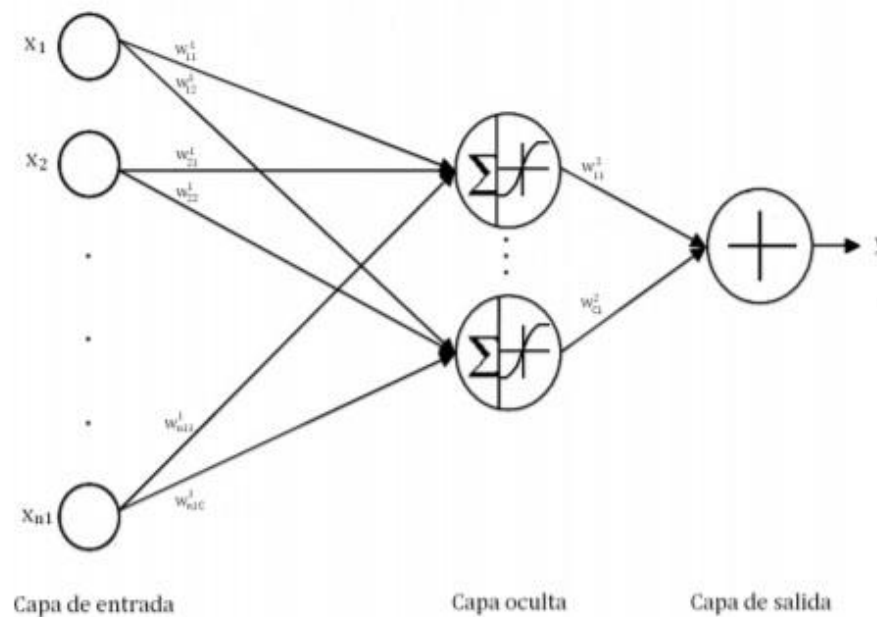


Figura 1-1. Perceptron multicapa [2]

Otro método que se ha empleado para resolver este problema consiste en utilizar el Statistics Toolbox de Matlab y el paquete estadístico SPSS© para comprobar los resultados obtenidos. Este método, aunque tenga un objetivo similar al nuestro, se basa sobre todo en conceptos del campo de la Estadística, por lo que no se entrará a realizar un análisis profundo del mismo. Sin embargo, se hace referencia a otros Toolbox de Matlab que resultan interesantes de nombrar, que son Financial Toolbox y Financial Derivative Toolbox, los cuales sí son usados para estimar el precio de algunas empresas, entre otras funciones. La ventaja principal del uso de estas herramientas radica en su versatilidad y su polivalencia. [3]

Financial Toolbox y Financial Derivative Toolbox contienen multitud de funciones para el análisis de datos y el desarrollo de modelos financieros. Permite el preprocesamiento de datos financieros y su análisis mediante indicadores técnicos y gráficos y evaluaciones del rendimiento de la inversión. También se pueden crear, optimizar y estudiar diferentes carteras que tengan condiciones y objetivos distintos, obteniendo sus limitaciones y su función de eficiencia. [4]

El último método que se va a describir consiste en la aplicación de algoritmos de aprendizaje mediante las máquinas de vectores simples. Este método se basará en opciones binarias (el valor sube, el valor baja) para intentar obtener el máximo beneficio posible. Se caracteriza por tener un riesgo fijo y predeterminado, un beneficio potencial y un riesgo máximo conocido. Su objetivo es analizar intervalos pequeños de tiempo para conocer el comportamiento de los valores intentando eliminar el efecto de los posibles acontecimientos económicos externos.

Las máquinas de soporte vectorial se basan en modelos simples mediante los cuales establecen fronteras de decisión no lineal en el espacio origen. Construirá un clasificador binario no probabilístico para clasificar los nuevos datos en base a los datos originales. Clasificará los valores ordenándolos mediante hiperplanos, pero para ello será necesario transformar dichos datos mediante unas funciones denominadas Kermel, que pueden ser polinómica, gaussianas y sigmoides, entre otras. De las nombradas anteriormente, la función Kermel polinómica es la función con la que se obtiene mayor rendimiento, cuyo grado dependerá del caso concreto. [5]

Esta recopilación de literatura es útil en cuanto a conocer las diferentes líneas de estudio que se han llevado a cabo con mayor o menor asiduidad. También servirá para sentar las bases del proyecto y empezar a conocer cuál va a ser el camino que se tiene que seguir para poder lograr la solución al problema que se ha propuesto. Tampoco está mal conocer la visión que se ha dado a problemas parecidos, lo cual puede ser de ayuda para abrir distintos horizontes de investigación.

2 FUNCIONAMIENTO DEL MERCADO

Este capítulo se va a centrar en realizar una exposición teórica acerca del mercado financiero que abarque desde su origen hasta su funcionamiento en la actualidad.

2.1. Origen de la bolsa

El mercado tal y como es conocido hoy en día es una evolución de siglos y siglos desde que surgieron y se realizaron los primeros negocios y compraventas de mercancías en las lonjas sobre el siglo XII en Europa, aunque anteriormente en la época griega y romana ya se llevaron a cabo los primeros intercambios entre mercaderes siguiendo unas normas que estaban establecidas en aquellos momentos. Sin embargo, el origen de la palabra “Bolsa” data en torno al año 1360, cuando se celebraron unas ferias en la ciudad de Brujas, que por ese entonces era uno de los grandes centros financieros de Europa. Esas ferias se celebraban frente a la mansión del Caballero de las bolsas, nombre por el cual era conocido un gran hombre de negocios de aquella época debido a que el escudo de la fachada de su edificio contaba con tres bolsas esculpidas.



Figura 2-1. Escudo de Van Der Beurse [6]

Sin embargo, hasta 1602 no se fundó la primera Bolsa de Valores de Ámsterdam. Considerada la más antigua del mundo, se creó para poder conseguir financiación con el objetivo de realizar viajes a las indias vendiendo parte del beneficio que obtendrían en dichos viajes. Además, fue la primera en la que se realizaron operaciones con intercambios con bonos y acciones. Debido a la gran especulación que provocó todo esto, entre 1630 y 1637 se produjo la primera gran crisis financiera conocida como la crisis de los tulipanes.

Los problemas que trajo la especulación y las violentas negociaciones que se daban en París provocó que en 1724 se creara la primera Ley de Bolsas, considerado como la “partida de nacimiento de las Bolsas modernas”.

Relacionado con esto, en 1801 se funda la Bolsa de Londres, llamada Stock Exchange, convirtiéndose en la bolsa más importante en detrimento de la Bolsa de Ámsterdam. No obstante, la bolsa más importante del mundo se fundó en 1865. La Bolsa de Nueva York (Dow Jones Industrial Average) fue fundada debido al rápido crecimiento del país, lo cual llamó la atención de inversores internacionales. [7]

El hecho más importante se produjo en 1929 en la bolsa de EEUU. Tras la década de 1920 en la que la economía se basaba en la especulación, el jueves 24 de octubre de 1929 (“Jueves Negro”) se produjo el llamado “Crack del 29”. Ese día la bolsa de EEUU se desplomó brutalmente provocando la mayor crisis financiera de la historia. motivada por el pánico de los inversores. A este hecho le siguió la “Gran Depresión”, unos años en los que no se consiguió mejorar la situación económica. Para salir de esta situación se impulsó el “New Deal” (1933-1937), que fue una política económica basada en una economía mixta con la intervención del estado. [8]



Figura 2-2. Portada del periódico London Herald del día 25 de octubre de 1929 [9]

En España, la Bolsa de Madrid no se creó hasta 1831, comenzando solamente con seis valores. En la actualidad, existen cuatro bolsas en España: además de la ya nombrada, están la Bolsa de Barcelona (1915), la Bolsa de Bilbao (1890) y la Bolsa de Valencia (1980). [10]

2.2. Funcionamiento del IBEX35

El IBEX35 es el principal índice bursátil español. Está compuesto por las 35 empresas que cuentan con mayor atracción entre los accionistas. Todas estas empresas cotizan en el Sistema de Interconexión Bursátil Español (SIBE) en las cuatro bolsas españolas ya nombradas. Además, destacan sobre el resto de las empresas españolas en cuanto a su capacidad de liquidez, capitalización y volumen negociado, por lo que no tienen por qué ser las empresas más importantes o de mayor tamaño del país, pero sí son aquellas que mejor promedio tienen basándonos en estos tres indicadores. No influye para nada el sector al cual esté dedicado el funcionamiento de cada empresa.

El concepto de liquidez es fundamental en este ámbito. Se trata de la capacidad de una empresa de convertir sus acciones en dinero en el menor tiempo posible. Visto de otra forma, son las empresas que poseen mayor protagonismo en las operaciones bursátiles, ya sean de compra o de venta de acciones, por lo que son las empresas que más interesan a inversores.

El IBEX35 es un buen indicador del estado y la tendencia de la bolsa y de la economía española. Sin embargo, no todas las empresas del IBEX35 tienen la misma relevancia. A mayor capitalización, más afectará su estado a la situación de este índice creado el 14 de enero de 1992.

El Comité Asesor Técnico (CAT) es el encargado de establecer las empresas que forman parte del IBEX35. Se reúnen dos veces al año para valorar la importancia de las empresas en el mercado teniendo en cuenta muchos factores, entre los que destacan, además de los nombrados anteriormente, el precio unitario por acción y la evolución de esa empresa en el mercado. Dependiendo de estos valores, pueden tomar decisiones que hagan que algunas empresas que no formaban parte del IBEX35 entren en él o, por el contrario, sacar de él a empresas que forman parte de este índice.

El valor del IBEX35 se obtiene a partir de los valores de capitalización de las diferentes empresas que lo componen, que se calculan a partir del producto de la cantidad de acciones de una empresa (depende de su capital flotante) por su precio (al que se haya realizado la última transacción) en el día en el que se está calculando. También interviene un coeficiente de ajuste para asegurar la continuidad del índice evitando que algunas operaciones financieras tengan efecto y alteren su valor.

El valor del índice IBEX35 viene dado por la siguiente ecuación:

$$I(t) = I(t - 1) \cdot \frac{\sum_{i=1}^{35} Cap_i(t)}{\left[\sum_{i=1}^{35} Cap_i(t - 1) \pm J \right]} \quad (2-1)$$

Siendo:

t el momento del cálculo del índice.

i las distintas sociedades según su índice

Cap_i(t) la capitalización de la sociedad con índice i en el momento t

Cap_i(t-1) la capitalización de la sociedad con índice i en el momento t-1

J el coeficiente de ajuste utilizado debido a ampliaciones de capital, reducciones, etc.

I(t-1) el valor del índice en el momento t-1

I(t) el valor del índice en el momento

Como se puede observar en la fórmula anterior, no todas las empresas tienen la misma influencia en el valor de este índice. Como es lógico, las empresas con mayor capitalización influirán más que el resto. Relacionado con esto, se obtiene un dato bastante curioso: las cinco empresas con mayor capitalización representan el 65% del índice. Estas empresas son Telefónica, Banco Santander, BBVA, Iberdrola y Repsol. Debido a esto, el IBEX35 tampoco es un índice que represente perfectamente la situación económica española. [11] [12] [13]

2.3. Factores que influyen en el mercado

La cantidad de factores que influyen en el mercado es muy extensa, lo cual provoca que resulte prácticamente imposible poder predecir sus valores exactos en todo momento. Todos y cada uno de los pequeños detalles relacionados con la vida financiera de un país, continente o incluso del mundo, pueden influenciar, en mayor o menor escala, los valores de las acciones de cualquier empresa. También pueden intervenir otros factores que no tengan una relación directa con la economía, como podría ser algún hecho político o alguna decisión de una gran empresa. Por tanto, otra de las particularidades que caracterizan a estos factores es su gran variedad y diversidad.

A continuación se va a realizar una enumeración de algunos de los factores más importantes que puedan influir en el valor de las acciones de las diferentes empresas del mercado financiero:

- Acontecimientos económicos nacionales e internacionales. Se basan en la influencia de las decisiones que se toman en los mercados más importantes del mundo. También se podrían contabilizar en este apartado las inversiones realizadas por los países más poderosos económica y financieramente y las que se llevan a cabo en ellos, ya que la situación de estos mercados son una importante influencia para los mercados del resto del mundo. Como ejemplo se podría nombrar el Mercado Financiero de Estados Unidos, debido a que este país es fundamental en las operaciones de divisas. A su vez, este mercado, junto a los demás, pueden verse afectados por hechos acontecidos en mercados con menos potencial.
- Acontecimientos sociales y/o políticos nacionales e internacionales. En este apartado también se agrupan sucesos muy variados, como podrían ser cambios en los gobiernos o las presidencias de los países, incluso de comunidades autónomas nacionales, de los diferentes organismos europeos, etc. También abarca posibles conflictos entre países o dentro de un mismo país, guerras o acontecimientos violentos e incluso cambios en la estructura del sistema de gobierno de un país. La relación entre países también es destacable, ya que posibles acuerdos comerciales o económicos entre los mismos podrían tener un efecto en el mercado. En este apartado, se podría incluir también los fenómenos naturales, que provocarán que las empresas dedicadas a la construcción tengan mayor demanda de acciones. Como se ha dicho anteriormente, si este suceso se produce en su país de residencia o en algún país con gran potencial económico, tendrá mayor influencia que si se produjera en otro país más secundario en este aspecto, aunque esto también podría tener relevancia.
- Factores económicos. Los factores económicos más importantes son los siguientes:
 - PIB (Producto Interior Bruto). Un PIB en crecimiento ayudará al desarrollo del mercado y promoverá las inversiones. Por el contrario, un PIB en decrecimiento tendrá un efecto negativo ya que refleja una mala situación de la economía del país.
 - Empleo. Constituye uno de los factores más importantes, provocando que una alta tasa de paro afecte de forma negativa a las inversiones en el mercado.
 - Inflación. Una inflación moderada es síntoma de estabilidad económica. Una situación de deflación provocará efectos negativos en la economía ya que supone un retroceso de ésta. Por el contrario, una gran inflación dará lugar a una subida de precios, ocasionando la pérdida de poder adquisitivo por parte de los inversores y una posible reacción negativa por parte del mercado a esta situación.
 - Cambio de divisas. Es la relación de valor que tienen las distintas divisas entre ellas. La moneda principal con la que se realizan las transacciones en el comercio internacional es el dólar norteamericano. Una variación del precio del dólar afecta a todas las divisas debido a esta relación, revalorizándolas o devaluándolas según la situación que se produzca.

- Bonos y tasas de interés. Otra opción en la que invertir, aparte de la bolsa de valores, son los bonos de estado, cuyo valor depende de las tasas de interés. Si estas tasas son elevadas, el precio del bono desciende, mientras que si las tasas descienden el precio del bono aumenta, ya que funcionan a descuento. En este sentido, unas buenas tasas de interés pueden provocar que algunos inversores dejen a un lado el mercado de la bolsa para centrarse en los bonos del estado. [14]
- Oferta y demanda. La ley de la oferta y la demanda define el valor de cada uno de los distintos elementos del mercado. Una situación equilibrada entre estos dos términos origina una situación de mercado estable. Una mayor demanda provocará un aumento de los precios del mercado, provocando una pérdida del equilibrio del mercado.
- Acontecimientos en el seno de alguna empresa que forme parte de ese mercado. Agrupa todas las decisiones que se toman desde la dirección de una empresa que puedan estar relacionados o no con el mercado financiero, como el reparto de dividendos. Abarca acuerdos llegados con empresas del mismo sector o adquisiciones, despidos de personal, variación en la línea de productos o servicios que se ofrecen, etc.
- Información y difusión. Está basado fundamentalmente en la información que se propaga a través de los medios de comunicación y de la propia empresa sobre la misma y su mercado. Consta tanto de noticias relativas a la economía de la empresa, como puedan ser sus cuentas anuales o acuerdos con otras empresas, como de la publicidad que se da a la misma a través de todos los medios de comunicación y redes sociales. Este factor tiene una influencia fundamental en algunos de los expuestos anteriormente, ya que una mayor difusión provocara que aumente el efecto de estos factores en el precio de las acciones. Una difusión positiva de una empresa generará una subida de la demanda de sus acciones.
- Expectativas. Este factor se fundamenta en los distintos estudios que se realizan sobre una empresa para prever sus resultados en el futuro. En estos estudios influyen tanto la evolución de resultados de los últimos años como los futuros acuerdos de la empresa y la evolución del mercado. Se realiza una previsión de la tendencia futura de las acciones que podrá o no cumplirse. La demanda de acciones subirá si las expectativas son positivas.
- Sentimiento. El factor más complicado de calcular de todos. Depende fundamentalmente de la confianza (o falta de ella) que el inversor tiene en las acciones que se plantea comprar o vender. No se trata de un dato cuantitativo y depende a su vez de muchas variables imposibles de controlar, entre ellos las expectativas propias de los inversores. Normalmente hay un sentimiento de confianza hacia el mercado financiero por parte de los inversores debido a su normativa. Sin embargo, una confianza excesiva puede llegar a ser perjudicial ya que provocaría una gran especulación que podría acabar arruinando a muchos inversores al explotarse la burbuja. Por otro lado, cualquier suceso negativo puede provocar miedo en los inversores, lo cual se verá reflejado en una caída del precio de las acciones al disminuir su flujo de compra o aumentar el de su venta.

La mayoría de estos factores no son apenas controlables ni deducibles, lo cual da lugar a unos valores de las acciones del mercado que son muy difíciles de predecir con exactitud. [15] [16]

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo vamos a plantear las condiciones iniciales de nuestro problema y las limitaciones que tomaremos con respecto al mercado en la vida real. Partiendo de la base de todo lo anterior, el parámetro que intentaremos maximizar será nuestro presupuesto. Partiremos de una cifra inicial, la cual intentaremos incrementar lo máximo posible mediante la compra y la venta de las acciones que se estimen adecuadas. Por tanto, nuestro presupuesto estará conformado, por un lado, por el dinero en efectivo del que dispongamos, el cual utilizaremos para obtener nuevas acciones mediante su compra. Sin embargo, también tendrá que formar parte del presupuesto el dinero que tengamos invertido en acciones, el cual se calculará mediante el producto del número de acciones que tengamos por el precio de esa acción en el momento del cálculo. Para obtener el valor del presupuesto total no se tendrá en cuenta el precio al cual obtuvimos las acciones, sino el precio actual.

Con todo esto, se procede a presentar el modelo que se va a tomar de referencia. Las ecuaciones han sido redactadas mediante el software MathType en su extensión para Office.

El presupuesto total de nuestro modelo se define como:

$$P(k) = E(k) + x_0(k) \quad (3-1)$$

Siendo:

P el valor de nuestro presupuesto en el momento k

E el valor del dinero en efectivo en el momento k

x_0 el valor del dinero total que tenemos invertido en el mercado en el momento k

A su vez, x_0 se define como:

$$x_0(k+1) = p_1 \cdot x_1(k) + p_2 \cdot x_2(k) + \dots = \sum_{i=1}^n p_i \cdot x_i(k) \quad (3-2)$$

Siendo:

p_i el precio de la acción de la empresa i en el momento k (se omite la dependencia de k en la notación p_i por simplicidad)

x_i la cantidad de acciones que tenemos de la empresa i en el momento k

n el número total de empresas del cual tenemos acciones

Definimos, además, el valor de x_i :

$$x_1(k+1) = x_1(k) + u_1(k) - w_1(k) \quad (3-3)$$

$$x_2(k+1) = x_2(k) + u_2(k) - w_2(k) \quad (3-4)$$

$$x_3(k+1) = x_3(k) + u_3(k) - w_3(k) \quad (3-5)$$

$$\dots$$

$$x_i(k + 1) = x_i(k) + u_i(k) - w_i(k) \quad (3-6)$$

$$\dots$$

$$x_n(k + 1) = x_n(k) + u_n(k) - w_n(k) \quad (3-7)$$

Siendo:

$x_i(k + 1)$ la cantidad de acciones que tenemos de la empresa i en el momento $k+1$

$x_i(k)$ la cantidad de acciones que tenemos de la empresa i en el momento k

$u_i(k)$ la cantidad de acciones que compramos o vendemos de la empresa i en el momento k

$w_i(k)$ el efecto provocado por el mercado en las acciones de la empresa i en el momento k

n el número total de empresas del cual se tienen o se han tenido acciones

Por último, faltaría por definir el valor del dinero en efectivo del que disponemos:

$$E(k + 1) = E(k) - \sum_{i=1}^n p_i \cdot u_i(k) \quad (3-8)$$

El dinero en efectivo en el siguiente momento sería el dinero en efectivo que tenemos en el momento actual más el dinero que recibamos de las acciones vendidas en ese momento menos el dinero que invirtamos comprando acciones en ese momento. Obviamente, este dinero en efectivo nunca podrá ser negativo, ya que no vamos a tener en cuenta posibles préstamos o incremento del efectivo por otro método que no sea la venta de acciones.

En cuanto a nuestra relación con el mercado, supondremos que se tratará de un particular con un presupuesto inicial no excesivamente elevado, por lo que sus operaciones de compra y venta no tendrían apenas influencia en el mercado. Para simplificar el problema, asumiremos que el valor de las acciones no estará influenciado en ningún grado por nuestras operaciones ni por nuestro presupuesto.

Debido a que nos consideramos como un particular, tampoco entraremos en el juego de las comisiones a terceros debido a las operaciones realizadas o a los beneficios obtenidos. Dentro de este apartado incluiremos tanto brokers como empresas dedicadas al estudio del mercado o a realizar este tipo de operaciones.

Tampoco tendremos en cuenta ni dispondremos de la opción de programar operaciones cuando las acciones correspondientes llegaran a un valor. Esto abarca tanto la compra de acciones cuando éstas alcancen un valor determinado como su venta al obtener el beneficio fijado. También se podrían programar operaciones de venta de las acciones disponibles si se produce una tendencia bajista o si éstas alcanzaran un valor menor del señalado. Sin embargo, como ya hemos dicho, no consideraremos ninguno de estos casos.

Además de esto, todas y cada una de las operaciones que se lleven a cabo se realizarán de manera instantánea, es decir, no se tendrán en cuenta tiempos de espera entre la confirmación de realizar una operación y su ejecución. Por tanto, si se llegara a realizar una compra o venta de acciones en el instante t , los nuevos valores aparecerán ya actualizados justo antes de realizar las comprobaciones correspondientes para el instante $t+1$.

Al tratarse de una simulación, no se tendrá en cuenta ningún tipo de impuesto al Estado, lo cual abarca todos aquellos en los que interviene Hacienda. Tampoco se contarán con posibles comisiones y/o impuestos con el mercado por el simple hecho de realizar una operación bursátil, ya sea de compra o venta de acciones. Para acabar con las limitaciones, tampoco nos adentraremos en las posibles ganancias debido a los dividendos repartidos por las distintas empresas de las cuales seamos accionistas.

En conclusión, nosotros partiremos de un presupuesto inicial que se intentará incrementar mediante la compra y venta de acciones instantáneas sin tener en cuenta ningún tipo de comisiones ni impuestos. Para intentar predecir el mercado, nos basaremos en datos históricos recientes de la bolsa que vamos a estudiar, la cual va a ser el IBEX35, la principal referencia en el mercado español. Diseñaremos una base de datos que contenga cinco años de valores de las distintas empresas que forman parte de esta bolsa. En principio, partimos de la base de que no se va a preferir unas empresas a otras, sino que las únicas referencias que tenemos de ellas son sus valores históricos. Las empresas que forman parte del IBEX35 y, por tanto, las empresas que se van a tener en cuenta para realizar las distintas pruebas son las siguientes:

- Acciona, S.A.
- Acerinox, S.A.
- ACS, Actividades de Construcción y Servicios, S.A.
- Aena S.M.E., S.A.
- Amadeus IT Group, S.A.
- ArcelorMittal
- Banco de Sabadell, S.A.
- Banco Santander, S.A.
- Bankia, S.A.
- Bankinter, S.A.
- Banco Bilbao Vizcaya Argentaria, S.A.
- CaixaBank, S.A.
- Cellnex Telecom, S.A.
- CIE Automotive, S.A.
- Enagás, S.A.
- ENCE Energía Y Celulosa, S.A.
- Endesa, Sociedad Anonima
- Ferrovial, S.A.
- Grifols, S.A.
- International Consolidated Airlines Group, S.A.
- Iberdrola, S.A.
- Industria de Diseño Textil, S.A.
- Indra Sistemas, S.A.
- Inmobiliaria Colonial, SOCIMI, S.A.
- Mapfre, S.A.
- Mediaset España Comunicación, S.A.
- Meliá Hotels International, S.A.
- MERLIN Properties SOCIMI, S.A.
- Naturgy Energy Group, S.A.
- Red Eléctrica Corporación, S.A.
- Repsol, S.A.

- Siemens Gamesa Renewable Energy, S.A.
- Técnicas Reunidas, S.A.
- Telefónica, S.A.
- Viscofan, S.A.

Por último, no se tendrá en cuenta nada que no sea exclusivamente lo nombrado anteriormente, por lo que obviaremos todo lo relativo a la situación social, política y económica del país en ese momento concreto. A partir de estos datos históricos intentaremos predecir cuál es la mejor forma de invertir nuestro dinero para obtener el mayor beneficio posible.

4 SOLUCIÓN PROPUESTA

El modelo de control predictivo surge a finales de los años setenta y ha estado evolucionando desde su origen. Este método no se compone de una estrategia de control concreta, sino que contiene distintos métodos de control que usan un modelo de proceso para obtener la señal de control con unas restricciones marcadas por una función objetivo. Debido a esto, son muy variados.

4.1 Definición y elementos del MPC

El modelo de control predictivo (MPC) es una forma de desarrollar un control avanzado mediante computadora utilizando un modelo matemático cuyo objetivo es predecir la evolución del sistema y obtener sus entradas óptimas cumpliendo una función de coste durante un horizonte de predicción de N pasos.

Cualquier modelo de control predictivo está basado en los siguientes elementos:

- **Modelo de predicción:** modelo matemático, ya sea lineal o no lineal, basado en variables de estado o de salida y en tiempo discreto o continuo, cuyo objetivo es definir el comportamiento que se espera del sistema. Este modelo se calcula a partir de los datos de los valores pasados y presentes de las variables controladas y de los valores presentes de las variables manipuladas del proceso. Es la pieza clave del controlador y debe predecir de forma precisa los resultados futuros gracias a una buena captación de la dinámica del proceso a analizar. El espacio temporal en el cual este modelo realiza las distintas predicciones para definir la señal de control se denomina el horizonte de predicción.
- **Función de coste:** función matemática que define las pautas que debe seguir el modelo de predicción para llegar a una solución óptima, teniendo en cuenta el error de seguimiento futuro. Este criterio, junto con las restricciones impuestas en el problema, harán posible la resolución del problema de optimización.
- **Restricciones:** incluye todas las limitaciones que deben cumplir las acciones de control. Un ejemplo podría ser el valor máximo y mínimo del cual no se puede exceder la señal de control.
- **Estrategia de horizonte deslizante:** estrategia usada en este tipo de problemas que consiste en ir desplazando en cada instante el horizonte hacia el futuro. En cada instante t , se utilizará el primer valor de la señal de control obtenida, ya que éste contendrá, además de este valor, el de varios instantes posteriores. Así, para cada instante, se repetirán todos los cálculos, obteniéndose una respuesta más exacta al utilizar en cada predicción unos datos más precisos y actualizados. Esta estrategia definiría una solución del problema en bucle abierto en cada instante t en los cuales se aplica en bucle cerrado.

Los distintos algoritmos del MPC se diferencian tanto en el modelo de predicción como en la función de coste. [17]

4.2 Estrategia utilizada

La estrategia que llevan a cabo los controladores que usan el método de control predictivo consiste en:

1. Para cada instante t , se realizan las predicciones de las salidas futuras para un horizonte de predicción N usando el modelo a partir de los valores de las entradas y salidas pasadas conocidas hasta ese instante y de las señales de control futuras, que se enviarán al sistema.
2. Este conjunto de señales enviadas se obtiene optimizando con el objetivo de minimizar (optimización convexa) la distancia de la salida con la referencia. Estas acciones de control se calculan teniendo en cuenta tanto las restricciones del problema como la función de coste descrita anteriormente.
3. El proceso recibe la señal de control $u(t | t)$. Las siguientes señales se rechazan, ya que en el instante $t+1$ se repite el proceso con los valores actualizados. En este nuevo instante $t+1$, se calculará la señal de control $u(t+1 | t+1)$, cuyo valor podría variar del cálculo que se realizó en el instante t de la señal $u(t+1 | t)$ por los nuevos datos disponibles. Este nuevo cálculo se realiza desplazando el horizonte. [18]

[19]

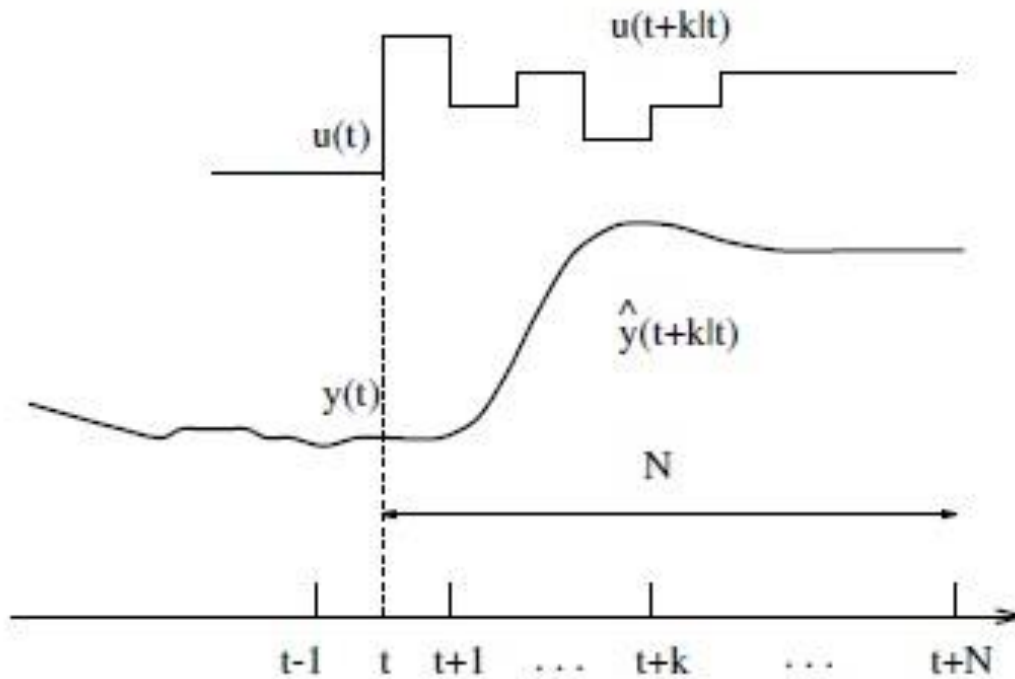


Figura 4-1. Representación de la señal de control [18]

4.3 Origen del MPC

Los primeros modelos de procesos dinámicos que predecían acciones de control surgieron a finales de la década de 1970 gracias a Jacques Richalet y su Control Heurístico Predictivo de Modelo (MPHC), el cual intentaba solucionar los problemas que no llegaba a resolver el PID basándose en conceptos intuitivos, y a Cutler y Ramakter y su Control Matricial Dinámico (DMC), en el cual en cada periodo se obtenían las salidas minimizando el error teniendo en cuenta determinadas restricciones, lo que permitió reducir las variaciones en las señales de entrada y obtener respuestas más estables. En la siguiente década, estos métodos se mejoran obteniendo el Control Matricial Dinámico Cuadrático (QDMC), que permitía establecer restricciones. Gracias a esto, se obtuvieron soluciones estables en las zonas de las restricciones y una mayor rentabilidad mediante la optimización en línea.

En 1963, surge el principio de retroceso del horizonte, aspecto fundamental de los MPC, gracias a Propoi, el cual fue desarrollado en la década posterior. Gracias a su simplicidad y al uso del modelo de respuesta de impulso o paso (muy intuitivo y sencillo aunque con muchos parámetros), el MPC se convirtió pronto en un método muy aplicado, sobre todo en sistemas multivariables. Sin embargo, no se podían obtener resultados sólidos y estables, ya que no existían teorías formales sobre estas formulaciones.

Por otro lado, se desarrollaron modelos de entrada-salida para los procesos monovariables, como el control de autoajuste basado en predictores de Peterka (minimizar el valor esperado de un criterio cuadrático para los valores pronosticados más recientes), el Control Adaptativo de Horizonte Extendido (EHAC) de Ydstie (mantener la salida futura cerca de la referencia después del retraso del proceso durante un periodo de tiempo), el Control Autoadaptativo de Predicción Extendida (EPSAC) de De Keyser y Van Cuawenberghe (señal de control constante desde el momento actual con predictor subóptimo) y el Control Predictivo Generalizado (CPG) de Clarke (el más conocido, basado en la variación mínima generalizada).[18] [20]

4.4 Ventajas e inconvenientes

Este método de control es muy utilizado en el mundo de la industria y tienes unas aplicaciones muy diversas. Tiene muy buena fama debido a su buen funcionamiento y eficiencia a lo largo del tiempo y al escaso mantenimiento que necesita. Sin embargo, como el resto de los métodos, también tiene una serie de inconvenientes.

Las principales ventajas de este tipo de métodos son las siguientes:

- No es necesario tener grandes conocimientos sobre control para poder desarrollar este tipo de modelos debido a la sencillez de sus conceptos.
- Son muy versátiles: pueden aplicarse en procesos lineales o no lineales, de fase no mínima, con retardos grandes, procesos que sean inestables en bucle abierto, etc.
- Pueden ser desarrollados con sistemas multivariables con facilidad y sin grandes variaciones.
- Los resultados obtenidos son fácilmente implementables y requieren poco cálculo.
- No requiere de compensadores para neutralizar los retardos de forma óptima y natural.
- Este tipo de modelos son capaces de compensar las perturbaciones medibles de manera natural.
- A la hora de diseñar el modelo, se pueden tener en cuenta restricciones, tanto en las entradas como en las salidas.
- Permite el tratamiento de retrasos, incertidumbres, perturbaciones, etc.
- Se adapta muy bien a los problemas en los cuales se conocen las referencias futuras.
- Está totalmente abierto a innovaciones y modificaciones futuras.
- Gracias a su adaptabilidad, tiene muchas aplicaciones posibles.

Por otro lado, el método de control predictivo presenta varios inconvenientes:

- Es necesario que el modelo dinámico sea apropiado y bastante preciso, ya que el control depende fundamentalmente del mismo. Las diferencias entre el modelo que se lleva a cabo y el proceso real influyen en los beneficios obtenidos, debido a que, aunque el diseño del modelo a seguir se basa en el proceso, ambos son independientes.
 - Este método requiere una gran carga de cálculo, a diferencia de las técnicas de control habituales, que reside en la resolución mediante métodos numéricos de los problemas de optimización a la hora de realizar la derivación, ya que los cálculos se realizan en cada momento de muestreo si la dinámica del proceso va cambiando. Esto se complica aún más con la inclusión de restricciones.
 - Es un método con mucha incertidumbre, lo cual es muy complejo de analizar de forma estable. El horizonte de predicción finito de estos métodos es un factor fundamental de este último inconveniente.
- [17]

5 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

A continuación se explicará todo el proceso que se ha llevado a cabo para resolver el problema. Para comenzar, tendremos que implementar los datos de los valores históricos a nuestra herramienta de trabajo, por lo que haremos un estudio de los diferentes métodos que encontremos y escogeremos el más adecuado. Se continuará con la implementación del controlador y de sus parámetros iniciales junto con la deducción del modelo de optimización a desarrollar. Se diseñará un programa de prueba para comprobar el correcto funcionamiento del controlador en el cual no se tendrá en cuenta aún la base de datos para facilitar el objetivo. Por último, se diseñarán tres métodos distintos en los cuales se simularán (ya con la base de datos implementada) distintas situaciones dentro del mercado financiero de la bolsa de valores.

5.1 Base de datos

Antes de todo esto, se tendrá que decidir la herramienta de trabajo que se va a utilizar para llevar a cabo la resolución del problema. Desde un primer momento, se vio adecuado que esta herramienta fuera Matlab debido a su facilidad de manejo, su gran utilidad y su compatibilidad con otras herramientas de trabajo. Otro factor importante consiste en que Matlab se trata de una herramienta muy común entre estudiantes universitarios, por lo que no necesitamos un periodo de adaptación para conocer las distintas funcionalidades de este software. Matlab consta de un lenguaje científico de muy alto nivel para investigaciones relacionadas con el mundo de la ciencia y la ingeniería. Además cuenta con diversas aplicaciones y toolboxes que aumentan aún más el rango de operaciones que engloba. El lenguaje de programación que vamos a utilizar es C++, aunque Matlab posee distintas interfaces mediante las cuales puedes acceder a otros lenguajes. [21]

A continuación, tendremos que elegir entre las distintas opciones de las que disponemos para implementar los valores de los datos históricos del IBEX35 en Matlab. Para facilitar esto, haremos una pequeña recopilación de métodos o páginas web a partir de los cuales podemos obtener la información buscada.

Los diferentes métodos de implementación de datos históricos que se han valorado y descartado son los siguientes:

- Implementación de los datos mediante bases de datos que contenga la información buscada. Esta opción fue descartada rápidamente al observar que no teníamos licencia para acceder a éstas después de comprobarlo en distintas páginas web de bases de datos.
- Uso de páginas webs de carácter financiero para descargar los datos históricos en tiempo real. Este método consiste en implementar algoritmos que accedan a la página web indicada (en este caso, se usa Yahoo Finanzas) y descargue todos los datos que aparezcan de las empresas indicadas hasta la actualidad. Se dice que es en tiempo real ya que, cada vez que se actualice la base de datos creada, se introducirán los datos más recientes que no aparecieran antes en la página web utilizada. Para ello, se debe introducir manualmente bastante información relativa a cada empresa, como su nombre, su símbolo, el mercado en el que se encuentra, la fecha en la que apareció, si sigue actualmente en la bolsa, etc. La principal ventaja de este método es la exhaustividad de los datos, ya que permite incluso incluir empresas que formaron parte de alguna bolsa. Por la dificultad de implementar el código que permita conseguir todos estos datos y debido a que no es necesario para resolver el problema planteado contar con datos en tiempo real, se ha descartado esta opción. [1]
- Uso de plataformas dedicadas a trading, como puede ser por ejemplo MetaTrader. MetaTrader es una plataforma de trading que dispone de una base de datos de cotizaciones históricas. También permite realizar análisis técnicos, operaciones comerciales e incluso copiárselas a los mejores traders, asegurando así mayores posibilidades para obtener un beneficio superior. Sin embargo, descartamos esta opción ya que consta de multitud de funcionalidades que no se necesitan para resolver el problema planteado. Además de esto, sólo se podría acceder a una versión demo. [5] [22]
- Uso de páginas web que permiten descargar datos históricos e insertarlos en Matlab. Dan la opción de

elegir cuál es la empresa cuyos datos quieres descargar, la frecuencia de los valores, la fecha de inicio y fin de los datos, etc. Hay multitud de páginas web disponibles que cumplen este requisito, como pueden ser <https://es.investing.com/>, <https://es.yahoo.com/> y <https://www.eleconomista.es/>, entre otras.

Finalmente, nos decantaremos por la última opción. Sin embargo, aún queda por elegir cuál de todas esas páginas web se usará para obtener los datos históricos. Debido a su facilidad de manejo y de insertar los datos descargados, su claridad y la información bastante completa de la que dispone, se elegirá la segunda página web de las nombradas en esta última opción.

Para acceder a los datos históricos, entramos en la página web <https://es.yahoo.com/>. Entramos en el apartado de finanzas y buscamos entre todos los mercados que aparecen el IBEX35. Una vez dentro, pulsamos en “Componentes”. De todos los componentes aparece su símbolo, el nombre de la empresa, su último precio, el cambio en valor y en porcentaje y el volumen. Para acceder a cualquiera de ellos basta con clicar en su símbolo. Observamos que sólo aparecen los 30 componentes principales de este mercado, por lo que tendremos que usar el buscador para acceder a los cinco restantes.

Una vez dentro de una empresa, accedemos a la pestaña de datos históricos y seleccionamos el intervalo de fechas que va desde el 1 de enero de 2014 hasta el 31 de diciembre de 2018, para así poder tener en cuenta los últimos cinco años calendarios. Como observaremos más adelante, hay algunas empresas de las cuales el registro de datos no llega a tal antigüedad, por lo que de esas empresas seleccionaremos todos los datos históricos de los que disponga esta página web. También seleccionamos la opción de mostrar cotizaciones históricas y a una frecuencia diaria. Seleccionamos aplicar para obtener los valores en las condiciones deseadas y a continuación pulsamos en “Descargar datos”.

De esta descarga obtenemos un archivo con extensión CSV, lo cual corresponde a un archivo de valores separados por comas de Microsoft Excel. Para poder implementarlo en una hoja de Microsoft Excel, abrimos el programa con un archivo nuevo con las hojas en blanco. En la pestaña “Datos” seleccionamos “Desde el texto” y buscamos el archivo que nos acabamos de descargar. Configuramos que el delimitador sea la coma y que la detección del tipo de dato esté basada en todo el conjunto de datos. Seleccionamos la opción de cargar y una vez haya acabado este proceso, guardamos el archivo con el nombre de la abreviatura o símbolo de la empresa cuyo valores hemos cargado. Se observa que se obtiene un archivo de extensión XLSX, la cual se trata de la extensión típica de las hojas de cálculo de Microsoft Excel.

Si examinamos la información cargada, se percibe que se trata de una tabla que consta de un elevado número de filas (una por cada día del cual la web usada disponga el valor) y de siete columnas, las cuales indican la fecha, el valor de apertura, el valor máximo y mínimo durante esa jornada, el valor de cierre y de cierre ajustado (este último tiene en cuenta los dividendos) y el volumen. Aunque nuestro archivo XLSX constará de todas estas columnas, no se usarán todas ellas, sino las que se consideren importantes en el problema a resolver.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Date	Open	High	Low	Close	Adj Close	Volume
2	02/01/2014	25150000	25260000	24799999	25014999	20201641	792351
3	03/01/2014	25020000	25174999	24875000	24985001	20177414	472734
4	06/01/2014	24950001	25245001	24559999	25139999	20302591	537374
5	07/01/2014	25260000	25924999	25030001	25924999	20936543	1232603
6	08/01/2014	25930000	26065001	25620001	25940001	20948656	2878938
7	09/01/2014	26000000	26650000	25840000	26344999	21275724	1310683
8	10/01/2014	26469999	26730000	26305000	26549999	21441280	759506
9	13/01/2014	26600000	26950001	26459999	26855000	21687593	786840
10	14/01/2014	26719999	27165001	26570000	27070000	21861225	967462
11	15/01/2014	27200001	27750000	27139999	27750000	22410376	1175991
12	16/01/2014	27795000	27920000	27360001	27780001	22434610	1073247
13	17/01/2014	27875000	28240000	27450001	28030001	22636499	1234605
14	20/01/2014	28020000	28165001	27600000	27700001	22370001	1072322
15	21/01/2014	27740000	27865000	27100000	27254999	22010624	2909542
16	22/01/2014	27400000	27590000	27235001	27500000	22208483	1930466
17	23/01/2014	27510000	27625000	27325001	27480000	22192329	919223
18	24/01/2014	27555000	27610001	26360001	26400000	21320143	1181661
19	27/01/2014	26500000	26815001	25920000	26215000	21170738	2790096
20	28/01/2014	26365000	26799999	26219999	26745001	21598759	913997

Figura 5-1. Captura de la tabla obtenida de la empresa ACS en formato XLSX

Para introducir los datos de estos archivos en Matlab se usa la función `xlsread`, a la cual se le asigna como argumento las siglas de las empresas seguido de `' .xlsx'`. Hay que tener en cuenta que es necesario dividir los valores entre 1.000.000 para ajustar las unidades. Este proceso se repite para todas las empresas.

La función `xlsread` nos permite leer los datos de los distintos archivos XLSX que hemos obtenido anteriormente e implementarlos en nuestro software. Sin embargo, la tabla obtenida en Matlab es algo distinta, ya que ahora no aparece la columna de la fecha ni tampoco se indica qué representa cada columna. Esto último se indicará a continuación:

1. Valor de apertura de la jornada
2. Valor máximo de la jornada
3. Valor mínimo de la jornada
4. Valor de cierre de la jornada
5. Valor de cierre ajustado de la jornada
6. Volumen

	1	2	3	4	5	6
1	25150000	25260000	24799999	25014999	20201641	792351
2	25020000	25174999	24875000	24985001	20177414	472734
3	24950001	25245001	24559999	25139999	20302591	537374
4	25260000	25924999	25030001	25924999	20936543	1232603
5	25930000	26065001	25620001	25940001	20948656	2878938
6	26000000	26650000	25840000	26344999	21275724	1310683
7	26469999	26730000	26305000	26549999	21441280	759506
8	26600000	26950001	26459999	26855000	21687593	786840
9	26719999	27165001	26570000	27070000	21861225	967462
10	27200001	27750000	27139999	27750000	22410376	1175991
11	27795000	27920000	27360001	27780001	22434610	1073247
12	27875000	28240000	27450001	28030001	22636499	1234605
13	28020000	28165001	27600000	27700001	22370001	1072322
14	27740000	27865000	27100000	27254999	22010624	2909542
15	27400000	27590000	27235001	27500000	22208483	1930466
16	27510000	27625000	27325001	27480000	22192329	919223
17	27555000	27610001	26360001	26400000	21320143	1181661
18	26500000	26815001	25920000	26215000	21170738	2790096
19	26365000	26799999	26219999	26745001	21598759	913997
20	26995001	27165001	26125000	26650000	21522034	1010564

Figura 5-2. Captura de la tabla obtenida de la empresa ACS en formato Matlab

Sin embargo, no se usarán todas las columnas de la tabla en nuestra resolución del problema, sino que solamente se utilizará el valor de apertura de la jornada, ya que se considera que durante la misma jornada la acción no cambió su valor. Este cambio de valor se produce al pasar de un día al siguiente, es decir, al pasar a la siguiente fila en la tabla.

La manera elegida para almacenar todos estos datos será una estructura, la cual dispondrá de tres campos distintos: Nombre, Abreviatura y Valores. En el campo Nombre se almacenarán los nombres completos de las 35 empresas que conforman el IBEX35, en el campo Abreviatura estarán las abreviaturas o símbolos correspondientes a cada empresa seguidos de ‘.MC’, y el campo Valores constará de una tabla similar a la mostrada anteriormente que almacenará todos los valores ya citados ya que, aunque solo se utilizará una columna, se considera oportuno recopilar la mayor cantidad de información posible para futuras ampliaciones. La estructura tendrá 35 componentes, uno por cada empresa estudiada, y será almacenada en el archivo ‘datos.mat’ para así no tener que esperar a la creación de la estructura cada vez que se retome el problema.

5.2 Control MPC

El objetivo que se busca en este apartado es, a partir de la definición de unos parámetros iniciales, obtener el control U del sistema, el cual representa el número de acciones de cada una de las empresas estudiadas que se deben comprar o vender ese día para conseguir beneficio económico.

El modelo del sistema (llamado modelo en espacio de estados) es el siguiente:

$$x(k+1) = A \cdot x(k) + B \cdot u(k) + D \cdot w(k) \quad (5-1)$$

Siendo:

$x(k+1)$ el vector de estados en el instante $k+1$

A la matriz que relaciona el estado próximo con el actual

$x(k)$ el vector de estados en el instante k

B la matriz que relaciona el estado próximo con la entrada

$u(k)$ el vector de control en el instante k

D la matriz que relaciona el estado próximo con la perturbación

$w(k)$ el vector de perturbación en el instante k

Como en este problema no se va a considerar perturbación alguna, eliminaremos ese componente en las próximas ecuaciones.

$$x(k + 1) = A \cdot x(k) + B \cdot u(k) \tag{5-2}$$

En el capítulo 3 ya se presentaba una ecuación parecida a esta, en la cual $x(k)$ es un vector que contiene la cantidad de acciones que se poseen de cada empresa, el valor del dinero en efectivo y el del presupuesto inicial y $u(k)$ es un vector que contiene la cantidad de acciones que se compran o se venden de cada empresa en el instante k .

Los estados futuros son predichos a partir de la siguiente ecuación:

$$X = G_x \cdot x(0) + G_u \cdot U \tag{5-3}$$

La cual también se puede expresar de forma matricial:

$$X = \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ A^3 \\ \vdots \\ A^N \end{bmatrix} \cdot x(0) + \begin{bmatrix} B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ AB & B & 0 & 0 & 0 \\ A^2B & AB & B & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ A^{N-1}B & A^{N-2}B & \dots & AB & B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u(0) \\ u(1) \\ u(2) \\ \vdots \\ u(N-2) \\ u(N-1) \end{bmatrix} \tag{5-4}$$

A partir de las matrices de modelo A y B se construyen las matrices que aparecen en la ecuación anterior.

Este controlador es el encargado de minimizar la siguiente función de coste lineal, lo cual llevará a un problema de optimización convexa que se puede resolver de forma eficiente. Sin embargo, debido al valor negativo de la matriz Q que se verá más adelante, esta optimización provoca un efecto de maximización del presupuesto del problema.

$$V = \sum_{k=0}^{N-1} (Q \cdot x(k + 1)) \tag{5-5}$$

En notación matricial:

$$V = \hat{Q} \cdot X \quad (5-6)$$

Sustituyendo en esta ecuación la expresión de los estados futuros se obtiene:

$$V = \hat{Q} \cdot (G_x \cdot X + G_u \cdot U) \quad (5-7)$$

Despreciando el término del estado actual X se obtiene el modelo a optimizar:

$$V = \hat{Q} \cdot G_u \cdot U \quad (5-8)$$

A continuación se define la matriz F:

$$F = \hat{Q} \cdot G_u \quad (5-9)$$

Por lo que nuestra función a optimizar resultante es:

$$F \cdot U \quad (5-10)$$

Por otro lado, se definen las restricciones a cumplir por nuestro sistema:

$$u_{min} \leq u(k) \leq u_{max} \quad \forall k \quad (5-11)$$

$$x_{min} \leq x(k) \leq x_{max} \quad \forall k > 0 \quad (5-12)$$

Escritas en forma matricial:

$$A_u \cdot u(k) \leq b_u \quad \forall k \in [0, N - 1] \quad (5-13)$$

$$\begin{bmatrix} A_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_u \end{bmatrix} U \leq \begin{bmatrix} b_u \\ \vdots \\ b_u \\ b_u \end{bmatrix} \rightarrow \hat{A}_u U \leq \hat{b}_u \quad (5-14)$$

$$A_x \cdot x(k) \leq b_x \quad \forall k \in [1, N] \quad (5-15)$$

$$\begin{bmatrix} A_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_x \end{bmatrix} \cdot X \leq \begin{bmatrix} b_x \\ \vdots \\ b_x \\ b_x \end{bmatrix} \rightarrow \hat{A}_x \cdot X \leq \hat{b}_x \rightarrow \hat{A}_x \cdot (G_x \cdot x(0) + G_u \cdot U) \leq \hat{b}_x \quad (5-16)$$

$$\hat{A}_x \cdot G_u \cdot U \leq \hat{b}_x - \hat{A}_x \cdot G_x \cdot x(0) \quad (5-17)$$

Las inecuaciones se expresan en función de U y X y, sustituyendo la ecuación del modelo del sistema y agrupando, obtenemos la siguiente desigualdad:

$$\begin{bmatrix} \hat{A}_x \cdot G_u \\ \hat{A}_u \end{bmatrix} \cdot U \leq \begin{bmatrix} \hat{b}_x - \hat{A}_x \cdot G_x \cdot x(0) \\ \hat{b}_u \end{bmatrix} \quad (5-18)$$

$$\hat{A} \cdot U \leq \hat{b} \quad (5-19)$$

Finalmente, nuestro sistema a optimizar es el siguiente:

$$\min F \cdot U \quad (5-20)$$

$$F = \hat{Q} \cdot G_u \quad (5-21)$$

$$s. t. \hat{A}_u \cdot U \leq \hat{b}_u \quad (5-22)$$

En Matlab, se usa el comando linprog para resolver el problema de programación lineal, es decir, encontrar el mínimo (en este caso sería máximo) del problema. Los argumentos proporcionados al comando son F, \hat{A}_u y \hat{b}_u y devuelve U. Todo esto está implementado en la función basicmpcTVS, que recibe como argumentos de entrada todos los parámetros necesarios para definir el controlador (A, B, D, Ax, bx, Au, bu, Q, R, N, W, x) y devuelve como argumento de salida la señal de control U.

A continuación, se establecen los parámetros necesarios para definir un controlador MPC:

- El horizonte de predicción N

$$N = 5 \quad (5-23)$$

- Las matrices de modelo A y B. Para el caso en el que sólo estudiáramos dos empresas, estas serían las matrices:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ p_1 & p_2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5-24)$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -p_1 & -p_2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5-25)$$

Siendo:

p_1 el precio que tiene la acción de la empresa 1 el día que se esté estudiando

p_2 el precio que tiene la acción de la empresa 2 el día que se esté estudiando

Estas matrices tienen tres dimensiones: el tamaño de la tercera dimensión es el valor del horizonte de predicción. En estas submatrices se almacenarán los precios de los valores predichos.

Es importante destacar que estas matrices se van actualizando cada vez que pasa un día de simulación, lo cual se realiza dentro del horizonte de predicción para considerar la evolución de los valores de las acciones de las empresas.

- Las matrices de restricciones A_x y b_x (estados), A_u y b_u (control) definidas anteriormente en (5-13) y (5-15)

$$A_x \cdot x \leq b_x \rightarrow \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot x \leq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5-26)$$

$$A_u \cdot u \leq b_u \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot u \leq \begin{pmatrix} 100 \\ 100 \\ 100 \\ 100 \end{pmatrix} \quad (5-27)$$

La primera inecuación establece que no es posible tener un valor negativo de acciones, de efectivo o de presupuesto. Por otro lado, la segunda inecuación define que cada día se pueden comprar o vender como máximo 100 acciones de la misma empresa.

- La matriz Q necesaria para expresar la función de coste.

$$Q = (0 \quad 0 \quad 0 \quad -1) \quad (5-28)$$

El valor negativo de la matriz Q provoca que el objetivo del problema sea maximizar el presupuesto.

- El estado inicial x . Se trata de un vector que contiene el número de acciones que se tienen de cada empresa, el valor del efectivo restante y el valor del presupuesto total. [19] [23]

5.3 Prueba realizada sin utilizar la base de datos

Una vez definido el sistema, se decide realizar una función de prueba llamada `ControlPredictivoPrueba.m` para verificar el correcto funcionamiento del controlador. Para facilitar esta comprobación no se incluirá en esta función la base de datos, sino que se implementarán unos valores de precios sencillos de dos empresas distintas para comprobar que no hay error.

Esta función tendrá como parámetro de entrada el vector inicial x , que tendrá cuatro componentes (acciones de la empresa 1, acciones de la empresa 2, dinero en efectivo y presupuesto total). Los valores inventados de las acciones de ambas empresas se implementarán mediante dos vectores (uno para cada empresa) cuyas longitudes serán el valor del horizonte de predicción. En este caso, suponemos cinco como valor apropiado para el horizonte de predicción. Una vez definidos todos los parámetros necesarios para el controlador anteriormente explicados, se llama a la función `basicmpcTVS` para obtener la señal de control resultante, que consistirá en un vector de diez componentes (producto del valor del horizonte de predicción por el número de empresas a estudiar) que contendrá el número de acciones de cada empresa a comprar o vender cada uno de los días en los que se realiza el control.

5.4 Métodos desarrollados

Una vez se ha comprobado que el controlador funciona correctamente, se diseñan tres métodos distintos para verificar la exactitud con la que pueden llegar a predecir el mercado.

- Método 1: Bola de cristal. El controlador tiene acceso a los valores reales futuros de las acciones de todas las empresas, por lo que el beneficio obtenido con este método será máximo.
- Método 2: Tendencia. En este método, el controlador considerará que, si las acciones subieron o bajaron de precio entre el día anterior y el día del estudio, la tendencia continuará también al día siguiente.
- Método 3: Polinomio. A partir de los valores de días pasados, se diseñarán polinomios de varios grados distintos para predecir el valor del precio de las acciones en el futuro.

5.4.1 Método 1: Bola de cristal

El primero de los métodos que se van a estudiar es el método “perfecto”, ya que no realiza predicción alguna, sino que directamente usa los valores de los precios de las acciones en el futuro para decidir si debe comprar o vender. Como la base de datos contiene elementos de varios años, este controlador se servirá de los datos de los días posteriores al estudiado. Por tanto, el beneficio que se obtenga con este método es el máximo que se puede conseguir teniendo en cuenta las restricciones que se han impuesto a la hora de resolver este problema. Esto nos servirá para tener una medida del beneficio máximo obtenible para poder comparar estos resultados con los de otros métodos que sí realizan predicciones.

Para simular este método es necesario ejecutar el archivo `res_MPC.m`. Inicialmente se definen el horizonte temporal, el número de días durante los cuales se va a realizar la simulación, el día de comienzo de la simulación y las empresas que van a formar parte de ella (a partir de un vector que almacena el índice de cada empresa). El programa pedirá al usuario que introduzca un valor para el presupuesto inicial total y la cantidad de acciones de cada una de las empresas que se poseen inicialmente. Con estos datos, se calculará el efectivo resultante, ya que el presupuesto total agrupa tanto el dinero invertido en acciones como el efectivo disponible. Si el valor calculado es negativo, devolverá error. Esta primera parte se repetirá en los tres métodos.

A continuación, se ejecuta la función `ControlPredictivo.m`. Las entradas de esta función son un vector cuyos componentes serán los índices de las empresas que queremos que participen en el control, un entero que contiene el índice de la fecha según la estructura creada, el valor del horizonte de predicción, el estado inicial x y la estructura de la base de datos con toda la información. Esta función es igual a `ControlPredictivoPrueba.m`, con la diferencia de que en este caso los valores de los precios de las acciones asignados a las matrices son reales y se han obtenido de la base de datos diseñada anteriormente. Esta función también ejecuta el controlador `basicmpcTVS.m`.

Una vez se ha obtenido la señal de control, se realizarán primero las operaciones de venta de las acciones y después las operaciones de compra. Se llevan a cabo en este orden para así poder contar con mayor cantidad de efectivo para afrontar la compra de las acciones. Formarán parte de las operaciones de venta aquellas empresas cuya señal de control sea negativa. Este valor se redondeará (no se puede comprar una parte decimal de una acción) y se calculará el nuevo efectivo disponible, así como la nueva cantidad de acciones que se disponen de esa empresa tras realizarse la venta y el valor de todas las acciones de esa empresa que aún se

conservan. En cuanto a las operaciones de compra, tras redondear la señal de control y obtener la cantidad de acciones a comprar, se van realizando estas operaciones de una acción en una comprobando que en ningún momento el efectivo resultante es negativo. Tras realizarse todas las operaciones de compra, al igual que con las de venta, se calculan el efectivo disponible, las acciones que se tienen de esa empresa en total y el valor de todas ellas. Este proceso se repetirá tantas veces como el número de días que se hayan indicado al principio que va a durar la simulación.

Finalmente, se calcula el valor del presupuesto total sumándole al efectivo el valor de todas las acciones que se poseen. Se imprime por pantalla tanto la señal de control como el valor del presupuesto total. Por último, se llama a la función `grafica.m` la cual, a partir de unos argumentos de entrada (base de datos, índice de las empresas que intervienen en la simulación, fecha de inicio de la simulación y señal de control, efectivo y presupuesto durante todos los días), realiza una serie de gráficas en las cuales se representan la variación temporal del presupuesto y del efectivo y el valor de las acciones de las empresas que intervengan con las operaciones de compra y venta que se hayan realizado. Estas gráficas se podrán observar en el capítulo siguiente.

5.4.2 Método 2: Tendencia

Este segundo método apuesta por la confianza en la continuación de la tendencia que siga el precio de las acciones. Si una acción sube de precio entre el día que se esté realizando la simulación y el día anterior, se considera entonces que el valor al día siguiente será aún mayor. En este caso, se compra una cantidad de acciones definida inicialmente, siempre que sea posible en cuanto a mantener el dinero en efectivo en un valor no nulo. Si, por el contrario, el precio de la acción disminuye, se estima que seguirá disminuyendo al día siguiente y se realizará una operación de venta de una cantidad de acciones definidas o, en caso de que no se tengan tantas acciones, del resto de acciones de esa empresa que se posean. Por tanto, este método no utiliza la función `basicmpcTVS.m`, sino que la señal de control (número de acciones a comprar o vender) se obtiene de la forma explicada.

La simulación de este método se obtiene a partir de la ejecución del programa `res_simple.m`. Al igual que en el método anterior, se definen los mismos parámetros iniciales, además de definir la cantidad de acciones que se compren o se vendan como máximo en cada operación. No se cumplirá este máximo cuando no haya suficiente efectivo (en el caso de las operaciones de compra) o cuando no se dispongan de tantas acciones (en el caso de las ventas). También se pedirá al usuario que introduzca el valor del presupuesto inicial y la cantidad de acciones que se poseen de cada empresa. Se realizará el cálculo del efectivo y devolverá error en caso de que éste sea negativo.

A continuación, para cada empresa estudiada, se comprueba la tendencia de los precios de sus acciones y se define la señal de control (cantidad de acciones a comprar o vender) mediante la función `sube_o_baja.m`. Tras realizar las operaciones de compra y venta de acciones teniendo en cuenta las características ya explicadas de este método, se actualizan tanto la cantidad de acciones que se disponen de cada empresa como el valor del efectivo y del presupuesto total, repitiéndose este proceso tantas veces como días se hayan definido que dure la simulación.

En este método se imprime por pantalla el valor del presupuesto cada uno de los días simulados y se representan (gracias a la función `grafica.m`) las mismas gráficas que en el método anterior.

5.4.3 Método 3: Polinomio

En este método los valores futuros de las acciones se predicen mediante una recta de regresión lineal o un polinomio. A partir del precio que tienen las acciones los días anteriores al que se esté realizando la simulación, se obtendrá una recta o un polinomio de regresión a través del cual se calcularán sus futuros valores. Este método es más parecido al primero en cuanto a que se vuelve a utilizar el controlador `basicmpcTVS.m` con la diferencia de que los valores de los precios de las acciones son los valores calculados por la recta o el polinomio nombrados.

Se comienza con la ejecución del archivo `res_lineal.m`. Al igual que en los otros métodos, se comienza con la

definición de los elementos necesarios para desarrollarlo. Es este caso, hay una variable que no aparecía en el resto de los métodos que representa el número de días pasados que se evalúan para conseguir la recta o el polinomio de regresión. A partir de esos valores, se diseña una recta o un polinomio en función del tiempo mediante el cual podemos calcular los valores de las acciones en el futuro. Tal y como ocurría en los métodos anteriores, se pedirá introducir tanto el presupuesto inicial como la cantidad de acciones de cada empresa estudiada y se realizará el cálculo del efectivo disponible, que deberá ser positivo.

El siguiente paso consistirá en calcular la recta o el polinomio de regresión. Esto se lleva a cabo en la función `lineal.m`, cuyos argumentos de entrada son el vector que contiene los índices de las empresas que intervienen en la simulación, el valor del día que se realiza la simulación, la cantidad de días anteriores a éste que se tienen en cuenta para obtener la recta o el polinomio, el horizonte de predicción y la estructura de la base de datos. Una vez obtenido la recta o el polinomio de regresión (el cual se puede representar en una gráfica), la función devuelve un vector que contiene los valores de los precios de las acciones de los días posteriores al de la simulación obtenidos al sustituir estos valores en el polinomio obtenido.

Todos estos valores de todas las empresas que intervienen en la simulación se introducen en una matriz y se utilizan en el controlador a través de la función `ControlPredictivolineal.m`. Es muy parecida a `ControlPredictivo.m`, con la única diferencia de que los valores de los precios de las acciones se obtienen con la recta o el polinomio de regresión en vez de directamente utilizar los valores del futuro de la base de datos. Sus argumentos de entrada son los mismos menos la base de datos y el entero que contiene la fecha, ya que en ese caso se utilizaban para obtener el valor. En este método esos dos argumentos son sustituidos por la matriz que contiene los valores de los precios de las acciones calculados.

Una vez se obtiene la señal de control, se siguen exactamente los mismos pasos que en el método 1: se llevan a cabo las operaciones de venta y compra de acciones y se calculan el dinero en efectivo, la cantidad de acciones que se poseen de cada empresa y el presupuesto total. Todo esto se repetirá tantos días como se haya indicado al principio. Finalmente, se imprime por pantalla la señal de control y el valor del presupuesto total cada día de simulación. Gracias a la función `grafica.m`, se representarán la variación a lo largo de los días de simulación del presupuesto y del efectivo y el valor de las acciones de las empresas cada día con las operaciones de compra o venta realizadas.

6 RESULTADOS OBTENIDOS

En este capítulo se representarán los resultados tanto de la prueba realizada para comprobar que el funcionamiento era correcto como de los otros tres métodos ya explicados. Se realizarán comparaciones dentro de cada método dependiendo de los parámetros que influyen en cada uno de ellos. También se llevarán a cabo simulaciones en las cuales se comparen los métodos entre ellos de forma general.

6.1 Prueba realizada sin utilizar la base de datos

En primer lugar, las simulaciones se empiezan con ControlPredictivoPrueba.m para comprobar que el control se está realizando de forma correcta. Se llevarán a cabo cuatro simulaciones distintas para comprobar varios aspectos del programa y poder comparar los resultados entre ellos para así obtener conclusiones.

6.1.1 Caso 1

La primera simulación se llevará a cabo asignando un presupuesto inicial de 1.000 euros. Las acciones de la empresa 1 aumentarán de valor al pasar al tercer día y el resto de los días permanecerá constante, mientras que el valor de las acciones de la empresa 2 permanecerán constantes todos los días excepto el cuarto, en el cual descenderá.

Los resultados obtenidos en esta simulación son los siguientes:

Empresa 1	Valor acciones	Señal control U	Acciones compradas	Acciones vendidas	Acciones totales
Día 1	1	100.0000	100	0	100
Día 2	1	100.0000	100	0	200
Día 3	2	36.4150	36	0	236
Día 4	2	19.6224	20	0	256
Día 5	2	8.9760	9	0	265

Tabla 6-1. Resultados obtenidos de la empresa 1 en la simulación realizada en el apartado 6.1.1

Empresa 2	Valor acciones	Señal control U	Acciones compradas	Acciones vendidas	Acciones totales
Día 1	2	50.7463	51	0	51
Día 2	2	-11.8038	0	12	39
Día 3	2	-38.9424	0	39	0
Día 4	1	65.7024	66	0	66
Día 5	1	37.4102	37	0	103

Tabla 6-2. Resultados obtenidos de la empresa 2 en la simulación realizada en el apartado 6.1.1

La señal de control expuesta en la tabla corresponde al primer valor del vector U obtenido en cada día de simulación para cada empresa. Así, aunque para cada día de simulación el controlador genera un vector que recoge datos de U para varios días posteriores, sólo se usarán los resultados referidos al primer día, ya que al día siguiente se repetirá todo este proceso.

En cuanto a la empresa 1, los dos primeros días se compran el máximo de acciones posibles para así tener el mayor beneficio cuando las acciones suben de valor, lo cual es correcto. En cuanto a la empresa 2, aunque se llegan a comprar acciones el primer día, todas llegan a ser vendidas antes de que su valor baje, siendo el día 3 el número de acciones totales 0, por lo que el presupuesto total no llega a bajar de valor. El resto de los días posteriores a los cambios de valores de ambas empresas se compran algunas acciones de ambas, aunque esto no se puede llegar evaluar al no disponer de más datos en esta simulación. Para valorar la corrección de estos últimos resultados sería necesario tanto conocer el valor del precio de las acciones los días posteriores al final de la simulación como que el simulador los tenga en cuenta para poder obtener el máximo beneficio posible.

6.1.2 Caso 2

Este caso es muy similar al anterior, con la única variación de que el presupuesto inicial es de 10.000 euros. Se valorará así su influencia en la compra de acciones.

Los resultados obtenidos en esta simulación son los siguientes:

Empresa 1	Valor acciones	Señal control U	Acciones compradas	Acciones vendidas	Acciones totales
Día 1	1	100.0000	100	0	100
Día 2	1	100.0000	100	0	200
Día 3	2	24.3137	24	0	224
Día 4	2	-44.3105	0	44	180
Día 5	2	-37.9124	0	38	142

Tabla 6-3. Resultados obtenidos de la empresa 1 en la simulación realizada en el apartado 6.1.2

Empresa 2	Valor acciones	Señal control U	Acciones compradas	Acciones vendidas	Acciones totales
Día 1	2	40.3817	40	0	40
Día 2	2	14.4499	14	0	54
Día 3	2	-54.8316	0	55	0
Día 4	1	44.8183	45	0	45
Día 5	1	16.3750	16	0	61

Tabla 6-4. Resultados obtenidos de la empresa 2 en la simulación realizada en el apartado 6.1.2

Al igual que en el caso anterior, con las acciones de la empresa 1 se obtiene el beneficio máximo y con las de la empresa 2 no se obtienen pérdidas, cumpliéndose el objetivo. Sin embargo, se aprecian un par de diferencias:

- El comportamiento de la señal de control después de la variación del valor de las señales es distinto, aunque esto, como ya se ha dicho, no se puede evaluar al no disponer de más datos.
- El tercer día la señal de control indica que se deben vender 55 acciones y sólo se disponen de 54. Obviamente, no se pueden vender acciones que no se poseen. Esto se debe al redondeo de la señal de control, ya que tampoco se puede comprar una parte decimal de una acción. Si sumamos el valor del control de los tres primeros días es cero, por lo que la señal simplemente indica que se deben vender todas las acciones compradas.

Por tanto, se considera que la variación del presupuesto inicial no ha provocado grandes modificaciones en los resultados, así que las simulaciones restantes de esta función se realizarán con un solo presupuesto.

6.1.3 Caso 3

En este tercer caso se parte de un presupuesto inicial de 1.000 euros, aunque ya se ha visto que este dato no es relevante en estos casos. El valor de las acciones de la empresa 1 subirán hasta el tercer día y a partir de ese día bajarán hasta obtener el valor inicial. Las acciones de la empresa 2 harán lo contrario, bajarán y a partir del día 3 subirán. Para obtener el mayor beneficio se deberán comprar acciones antes de que vayan a subir y venderlas cuando se dispongan a bajar.

Los resultados obtenidos en esta simulación son los siguientes:

Empresa 1	Valor acciones	Señal control U	Acciones compradas	Acciones vendidas	Acciones totales
Día 1	1	100.0000	100	0	100
Día 2	3	100.0000	100	0	200
Día 3	5	-100.0000	0	100	100
Día 4	3	-100.0000	0	100	0
Día 5	1	59.3942	59	0	59

Tabla 6-5. Resultados obtenidos de la empresa 1 en la simulación realizada en el apartado 6.1.3

Empresa 2	Valor acciones	Señal control U	Acciones compradas	Acciones vendidas	Acciones totales
Día 1	5	0	0	0	0
Día 2	3	0	0	0	0
Día 3	1	100.0000	100	0	100
Día 4	3	100.0000	100	0	200
Día 5	5	15.5761	16	0	216

Tabla 6-6. Resultados obtenidos de la empresa 2 en la simulación realizada en el apartado 6.1.3

La señal de control de la empresa 1 indica que se deben comprar las máximas acciones posibles los dos primeros días (cuando el valor de las acciones sube) y que se deben vender a partir del tercer día (cuando baja), por lo que se consigue el beneficio máximo. El dato del quinto día no se puede evaluar por el mismo motivo que en los casos anteriores. En cuanto a la empresa 2, los dos primeros días, aunque las acciones bajen de valor, la señal de control es nula, ya que no se dispone de acciones para poder venderlas. Los dos días siguientes se compran 100 acciones cada uno, consiguiendo así maximizar el presupuesto.

6.1.4 Caso 4

Partiendo de un presupuesto de 1.000 euros, en este caso se va a evaluar, al igual que en el caso anterior, si el controlador responde de forma correcta a la subida y bajada del precio de las acciones de una misma empresa. Sin embargo, en este caso se ha llevado al extremo, ya que el valor de las acciones está continuamente cambiando de tendencia: si un día su precio sube, al día siguiente baja y viceversa.

Los resultados obtenidos en esta simulación son los siguientes:

Empresa 1	Valor acciones	Señal control U	Acciones compradas	Acciones vendidas	Acciones totales
Día 1	1	100.0000	100	0	100
Día 2	3	-100.0000	0	100	0
Día 3	1	100.0000	100	0	100
Día 4	3	-100.0000	0	100	0
Día 5	1	59.8882	60	0	60

Tabla 6-7. Resultados obtenidos de la empresa 1 en la simulación realizada en el apartado 6.1.4

Empresa 2	Valor acciones	Señal control U	Acciones compradas	Acciones vendidas	Acciones totales
Día 1	3	0	0	0	0
Día 2	1	100.0000	100	0	100
Día 3	3	-100.0000	0	100	0
Día 4	1	100.0000	100	0	100
Día 5	3	35.9762	36	0	136

Tabla 6-8. Resultados obtenidos de la empresa 2 en la simulación realizada en el apartado 6.1.4

Se puede observar en ambos casos como se compran la máxima cantidad de acciones posibles cuando su valor es 1 y se venden cuando su valor es 3 (siempre y cuando se hayan comprado acciones de esa empresa antes). La señal de control del quinto día no es evaluable.

Como conclusión de estos dos últimos casos, se observa que el controlador responde bien a los cambios de tendencia dentro del valor de las acciones de una misma empresa.

6.2 Método 1: Bola de cristal

A continuación se van a exponer simulaciones de los tres métodos que se han estudiado por separado y después, se realizarán ejemplos comunes a los tres métodos para obtener las similitudes y diferencias entre ellos.

Con el método de la bola de cristal se obtendrá siempre el beneficio máximo posible. Se mostrarán un par de simulaciones para observar su funcionamiento, una de ellas con la intervención únicamente de una empresa, para mayor claridad, y la segunda con varias empresas.

6.2.1 Caso 1

- Fecha de inicio: día 10 de la base de datos
- Duración: 10 días
- Empresas que intervienen: empresa 3 (ACS)
- Horizonte de predicción: 5
- Presupuesto inicial: 1000 euros

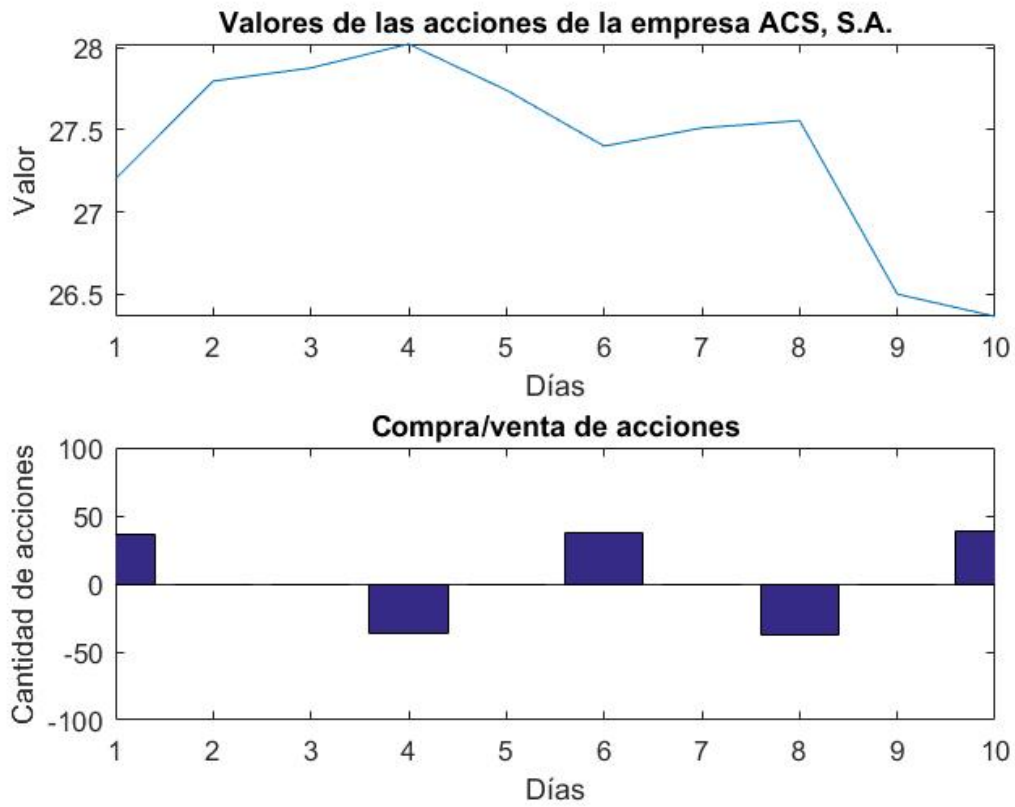


Figura 6-1. Resultados obtenidos de la empresa ACS en la simulación realizada en el apartado 6.2.1

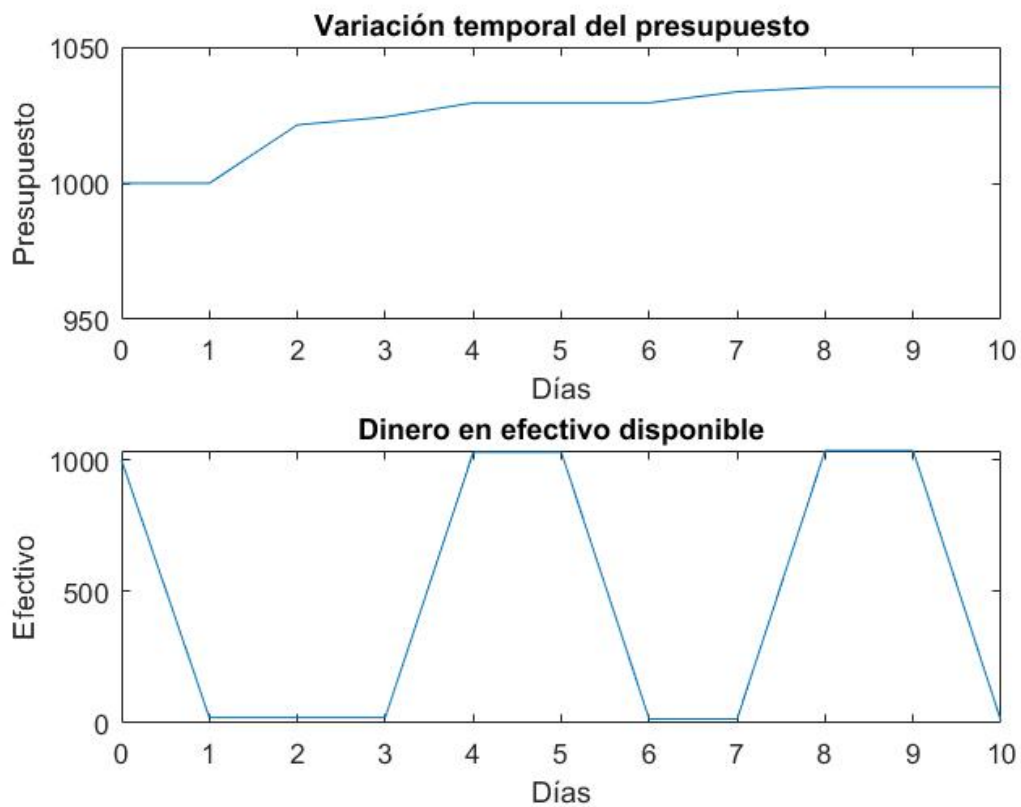


Figura 6-2. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.2.1

El día cero (aún no ha empezado la simulación) se tiene un presupuesto inicial de 1000 euros, todo en efectivo. El día 1 se produce la compra del número máximo de acciones posibles, ya que el valor está subiendo, y el día 4 se venden todas, ya que va a empezar a bajar. Cuando el valor de las acciones llega a un mínimo local, se compran el número máximo de acciones posibles y, al llegar a un máximo local, se venden todas. En esta simulación, por tanto, el presupuesto nunca baja su valor, ya que cuando las acciones van a empezar a bajar, se venden todas y no se compran hasta que no vayan a empezar a subir. El dinero en efectivo va alternando entre el presupuesto máximo y un valor cercano a cero (no llega a cero porque la cantidad que le falta para llegar no es suficiente como para comprar una nueva acción), situándose en este último los días en los que el valor de las acciones al día siguiente es superior al de hoy, obteniendo así beneficio. Se observa también como el presupuesto total nunca desciende de un día para otro: o bien sube (efectivo cercano a cero, las acciones incrementan su valor) o bien se mantiene constante (el efectivo es igual al presupuesto total, las acciones disminuyen su valor y resulta más conveniente no tener acciones).

6.2.2 Caso 2

- Fecha de inicio: día 50 de la base de datos
- Duración: 10 días
- Empresas que intervienen: empresa 1 (Acciona), empresa 2 (Acerinox) y empresa 3 (ACS)
- Horizonte de predicción: 5
- Presupuesto inicial: 1000 euros

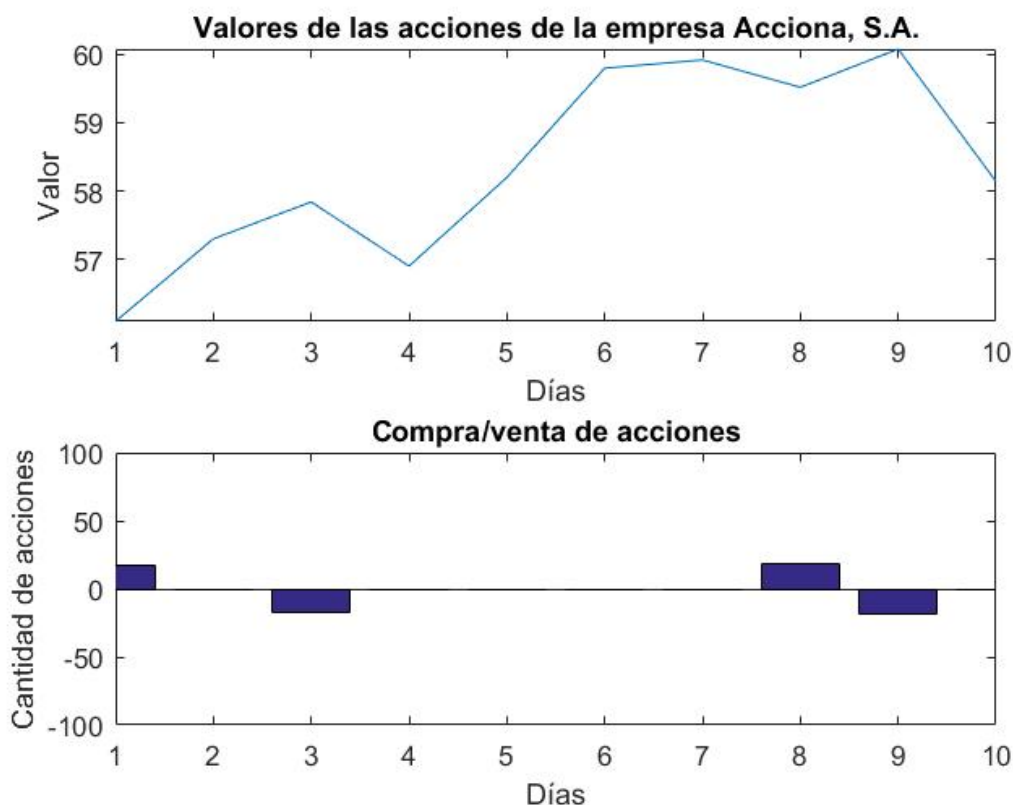


Figura 6-3. Resultados obtenidos de la empresa Acciona en la simulación realizada en el apartado 6.2.2

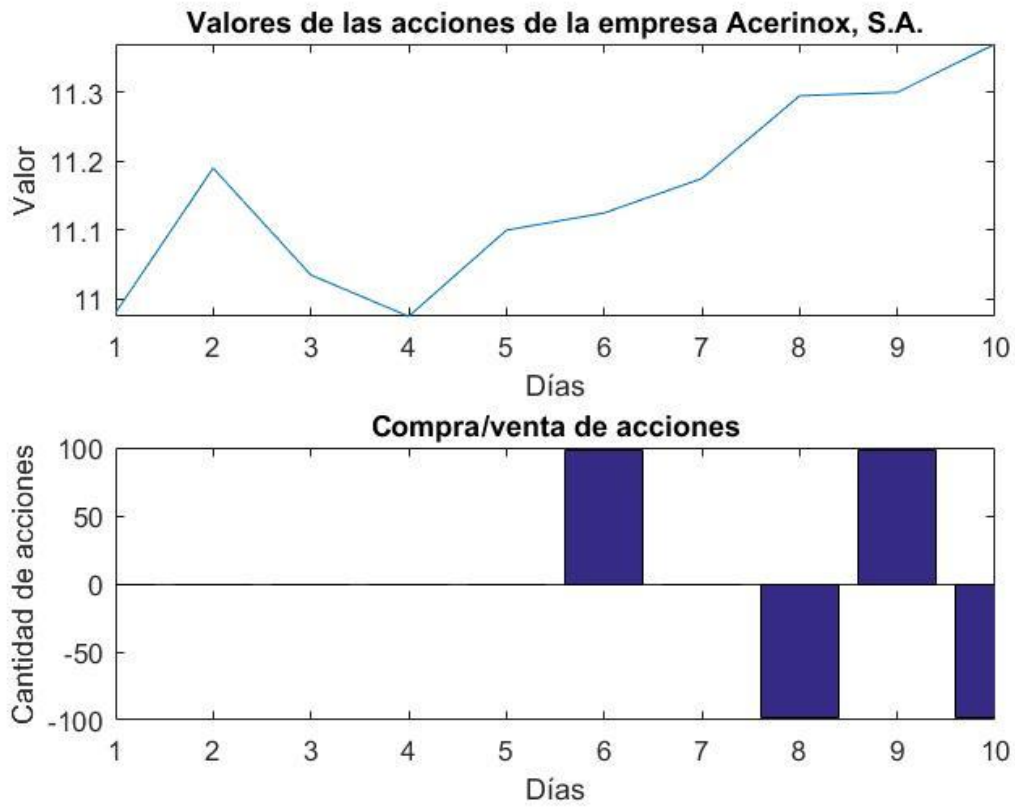


Figura 6-4. Resultados obtenidos de la empresa Acerinox en la simulación realizada en el apartado 6.2.2

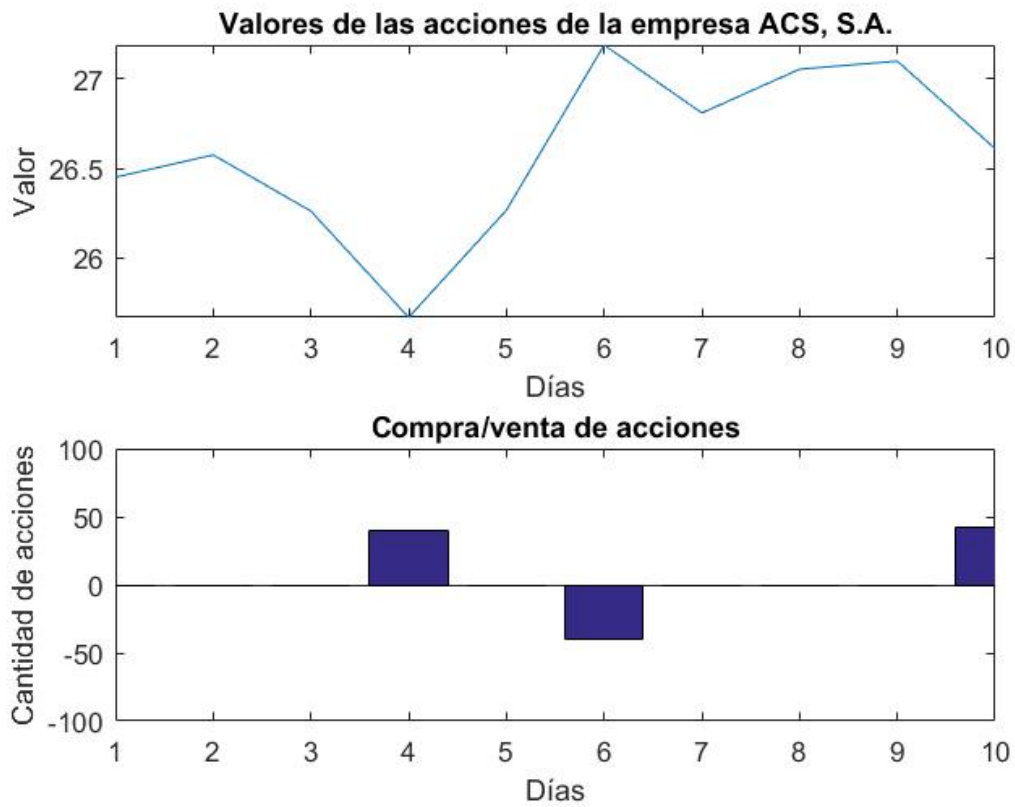


Figura 6-5. Resultados obtenidos de la empresa ACS en la simulación realizada en el apartado 6.2.2

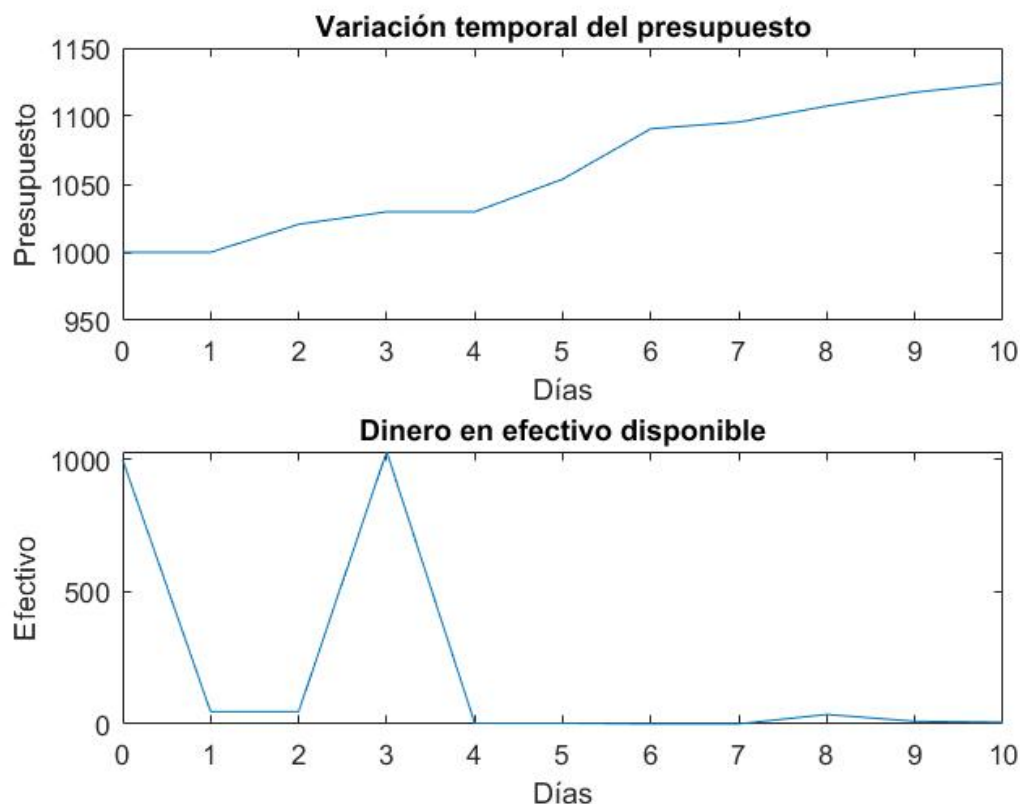


Figura 6-6. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.2.2

En este caso se busca tener todo el dinero invertido en la empresa que genere mayor beneficio entre el día de simulación y el día siguiente. El día uno se invierte todo el dinero en Acciona, ya que el valor de sus acciones es el que más sube. El segundo día el valor de las acciones de esta empresa se mantiene en crecimiento, mientras que el de las otras dos disminuye, por lo que no se realiza ninguna operación. Al día siguiente, todas las empresas estudiadas bajan su valor, por lo que se venden todas las acciones y el dinero en efectivo es igual al presupuesto total.

El día cuatro, pese a que la empresa que más aumenta su valor es Acciona, no se compra ninguna acción de esta compañía, sino que se compran de ACS. Esto se debe a que, aunque el beneficio por acción es menor, el valor de las acciones de Acciona es mayor que el doble del valor de las de ACS. Al comprar acciones de ACS, el número de acciones compradas será mucho mayor que si compráramos acciones de Acciona, por lo que, aunque se consiga menor beneficio por acción, el beneficio total es mayor.

El hecho de que con este método nunca se tenga acciones de varias empresas a la vez significa que siempre se busca la empresa con la cual se consigue mayor beneficio ese día y se invierte todo el dinero posible en ella. Sin embargo, habría una situación en la que podría darse este caso. Esta consistiría en comprar todas las acciones posibles de una empresa cuyo precio por acción sea muy superior a otra. El dinero en efectivo que sobra de comprar acciones de la primera empresa podría ser suficiente para adquirir acciones de la segunda empresa. Para que esto suceda, ambas empresas deben asegurar beneficio, siendo superior el beneficio obtenido por euro invertido en la empresa cuyas acciones tienen un valor superior.

Un factor para tener en cuenta en estas simulaciones es que variar el horizonte temporal no provoca cambio alguno debido a que este método se sirve directamente de los valores futuros reales de las acciones para maximizar el presupuesto. Por otro lado, el aumento del presupuesto inicial o de la duración de la simulación supondría un aumento del beneficio obtenido, ya sea por poder hacer operaciones con una mayor cantidad de acciones o por realizar operaciones durante más días.

6.3 Método 2: Tendencia

En principio, se supone que este método es el menos exacto de los tres que se van a plantear al no realizarse una predicción de los valores de las acciones en el futuro, sino que directamente pronostica la operación a realizar, ya que el número de acciones a comprar o vender es una constante definida. Al igual que en el método anterior, se realizarán un par de simulaciones, la segunda de ellas con varias empresas.

6.3.1 Caso 1

- Fecha de inicio: día 10 de la base de datos
- Duración: 10 días
- Empresas que intervienen: empresa 17 (Endesa)
- Número de acciones en las operaciones: 20
- Presupuesto inicial: 1000 euros

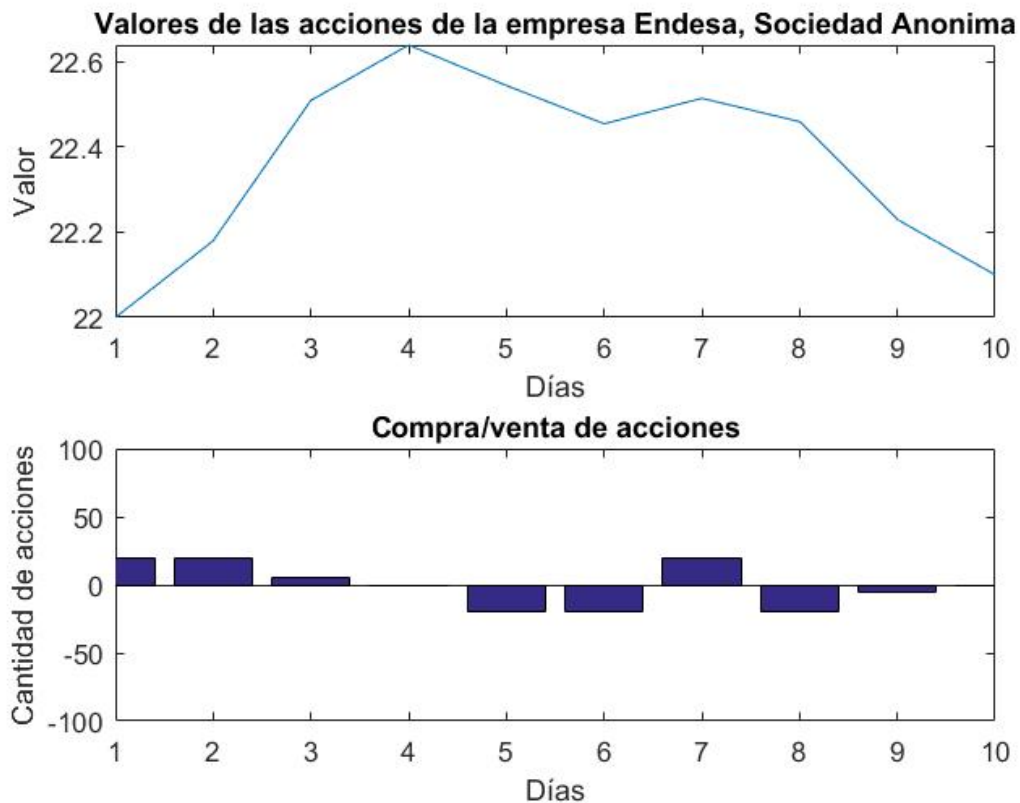


Figura 6-7. Resultados obtenidos de la empresa Endesa en la simulación realizada en el apartado 6.3.1

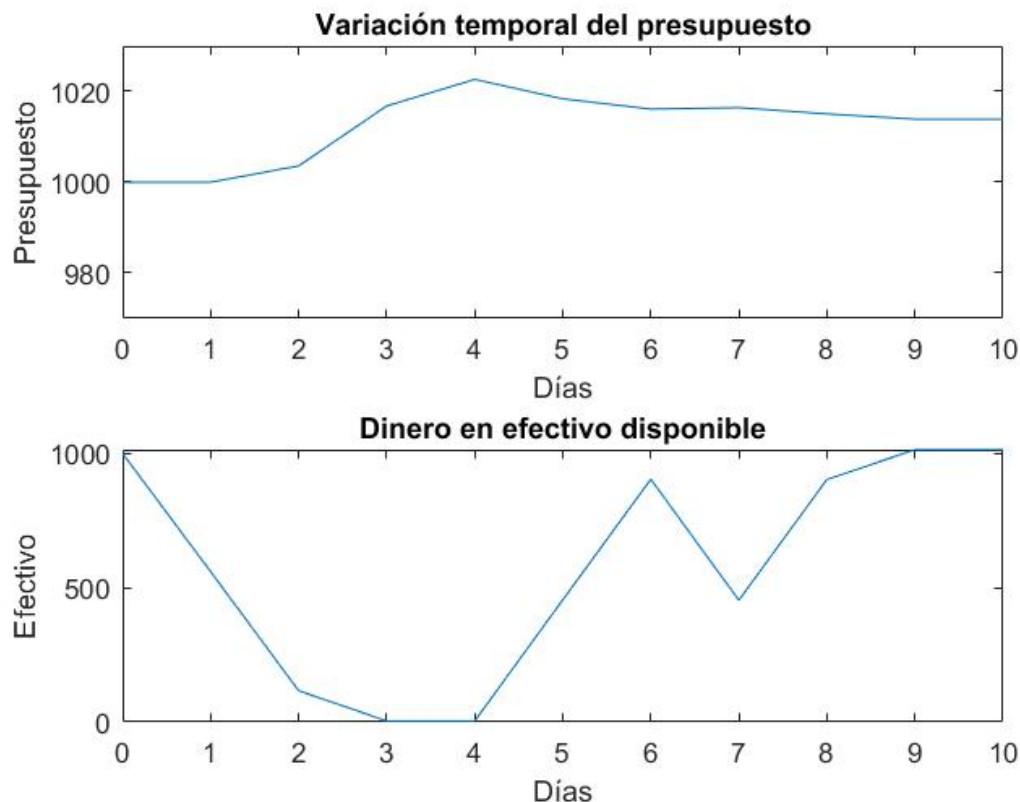


Figura 6-8. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.3.1

Los dos primeros días de la simulación, se compran 20 acciones cada uno, ya que su valor está subiendo. El tercer día se compran menos porque no se dispone de efectivo suficiente como para adquirir tantas acciones como la cantidad que se define al principio del programa. Al llegar al cuarto día, a pesar de que el valor va a empezar a bajar, no se realiza ninguna operación, ya que el valor de las acciones aumentó del día anterior a ese día. Es más, el programa pide comprar acciones, aunque esta operación no llega a realizarse por falta de efectivo.

Cuando se llega al quinto día, el valor de las acciones desciende y, por tanto, el presupuesto también. Este método no está capacitado para averiguar el día que cambia la tendencia y, por eso, nunca se va a llegar a obtener el beneficio máximo posible ese día. Después del primer día de descenso del valor de las acciones, se realiza una operación de venta. Como el precio de las acciones también desciende al llegar el sexto día, se volverá a efectuar otra operación de venta ese día, provocando que tampoco se vaya a obtener un beneficio máximo al día siguiente, ya que se vuelve a producir otro cambio de tendencia. Esta situación se repetirá a lo largo de la simulación. Pese a todo esto, se obtiene un presupuesto final de 1013.9 euros.

Por tanto, se deduce que este método obtiene el beneficio máximo posible en periodos de tendencia constante. Sin embargo, debido a sus limitaciones, el día en el cual la tendencia cambia, puede que no se pierda dinero, pero lo que es seguro es que las ganancias que se produzcan ese día no serán las máximas posibles.

6.3.2 Caso 2

- Fecha de inicio: día 40 de la base de datos
- Duración: 10 días
- Empresas que intervienen: empresa 17 (Endesa), empresa 18 (Ferrovial) y empresa 19 (Grifols)
- Número de acciones en las operaciones: 20
- Presupuesto inicial: 1000 euros

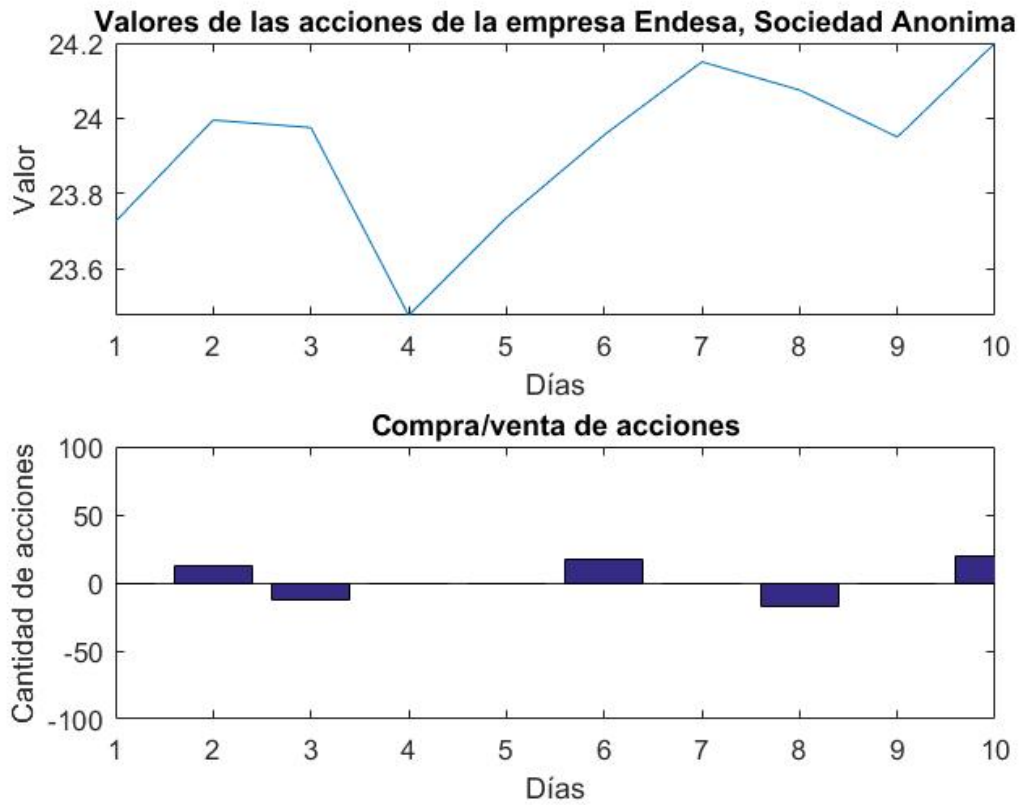


Figura 6-9. Resultados obtenidos de la empresa Endesa en la simulación realizada en el apartado 6.3.2

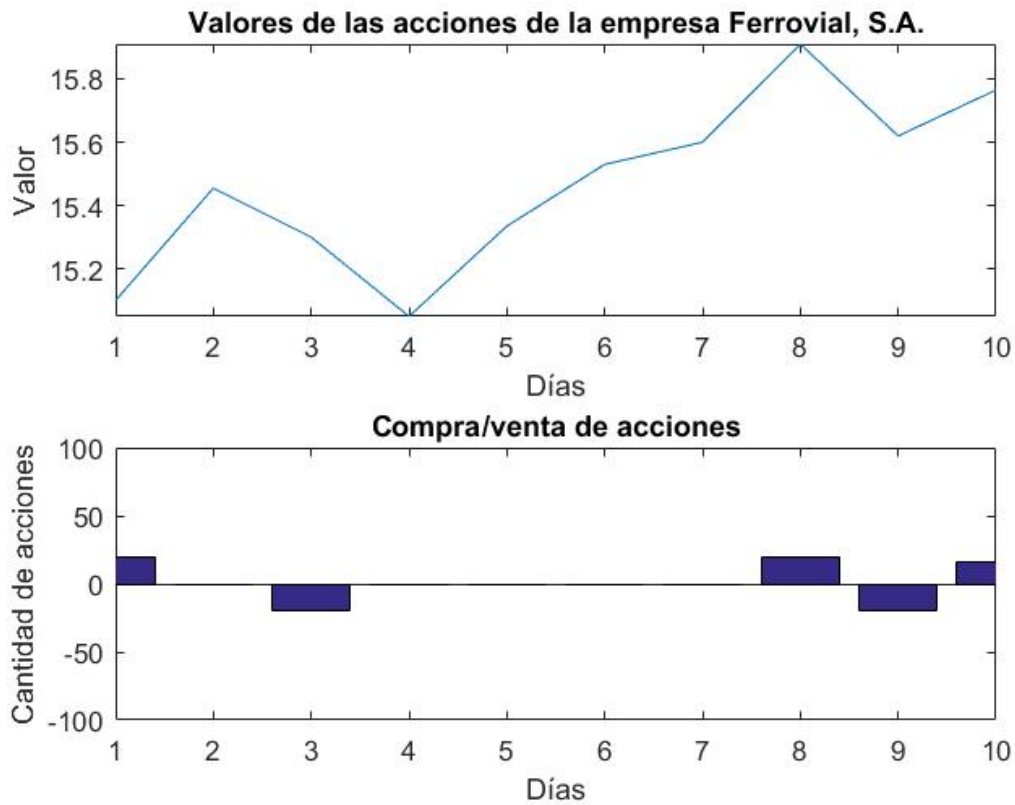


Figura 6-10. Resultados obtenidos de la empresa Ferrovial en la simulación realizada en el apartado 6.3.2

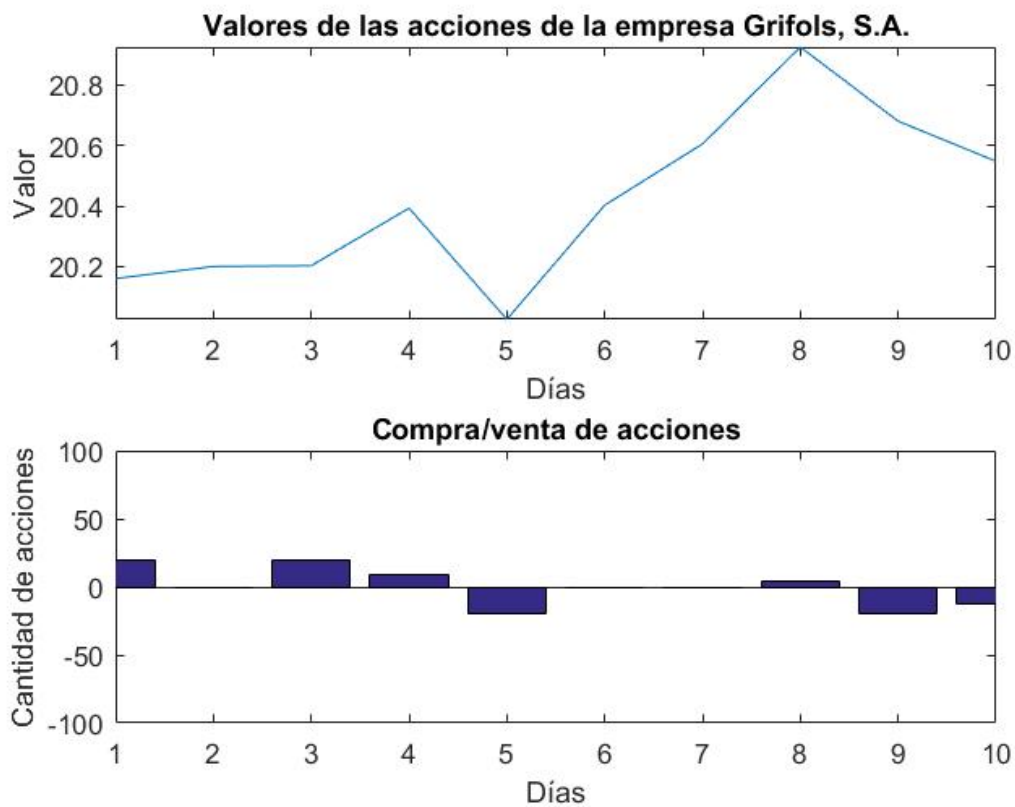


Figura 6-11. Resultados obtenidos de la empresa Grifols en la simulación realizada en el apartado 6.3.2

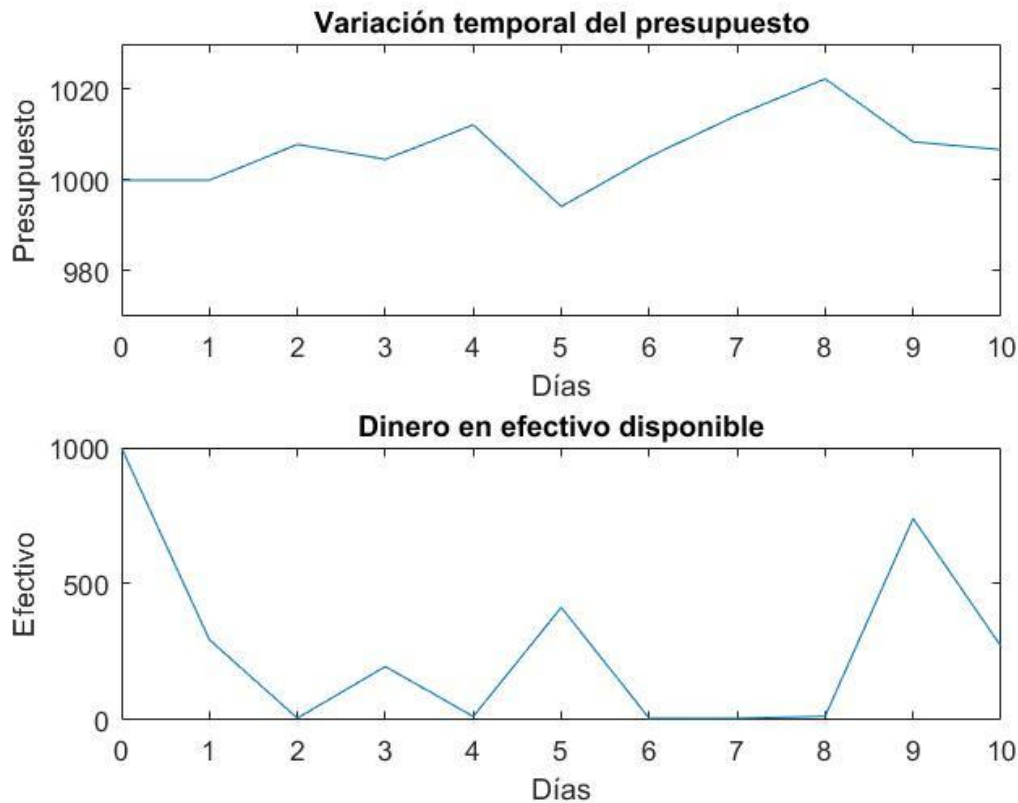


Figura 6-12. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.3.2

La gráfica del presupuesto total consta de varios máximos y mínimos locales, por lo que, al igual que ha habido días en los que el presupuesto ha aumentado, también ha habido en los que ha descendido. En cuanto a este último caso, resulta destacable la situación que ocurre entre el cuarto y el quinto día. El día cuatro sólo se tienen acciones de la empresa Grifols (debido a que los valores de las otras dos empresas están descendiendo) y, además, se realiza una operación de compra en acciones de esta compañía hasta agotar el dinero en efectivo, ya que su tendencia era positiva. Sin embargo, ese día las acciones de esta empresa bajan su valor lo cual provoca, además de una venta al día siguiente, que se produzca el mayor descenso del presupuesto en esta simulación. Se puede observar además que todas las operaciones de venta de las acciones se producen al día siguiente de que su valor empiece a descender, independientemente de su tendencia en el futuro.

Pese a todo esto, se obtiene un presupuesto final de 1006.74 euros ya que, en los tramos constantes, el programa busca obtener el mayor beneficio repartiendo las acciones entre las empresas. Este método es más realista que el anterior ya que en la vida real no se conoce el valor futuro de las acciones y que el efectivo no se dedica únicamente a una empresa, lo cual no deja de ser una limitación al establecer una cantidad fija de acciones que intervienen en las operaciones sin la cual se podría obtener un beneficio mayor dependiendo de las tendencias.

A diferencia del método anterior, aumentar la duración de la simulación no tiene por qué suponer un aumento del presupuesto final, ya que esto dependerá, entre otras cosas, de la cantidad de cambios de tendencia del valor de las acciones que se den a lo largo de la misma. Si esta cantidad fuera muy pequeña en relación con los días en los que se aumenta la duración, sí se debería obtener un presupuesto final mayor, aunque en el caso de que tuvieran lugar muchos cambios de tendencia en los nuevos días de simulación, el presupuesto final puede verse reducido con respecto a un periodo menor de tiempo.

Algo muy parecido ocurriría si se aumentase el presupuesto inicial o la cantidad de acciones que intervengan en cada operación. Si en los días de simulación se producen pocos cambios de tendencia, estos aumentos serán positivos de cara a incrementar el presupuesto inicial. En caso contrario, se produciría un descenso de éste y no resultaría muy extraño que se diera una situación con estas condiciones en la que el presupuesto final sea inferior al inicial.

En conclusión, con este método se obtienen los resultados más inestables debido a que la cantidad de acciones a comprar o vender es una constante definida por el usuario (se cumple siempre que se puede, excepto cuando el efectivo no alcanza a comprar todas las acciones) y a que la decisión entre comprar o vender depende solo de dos valores de la base de datos (el valor de las acciones el día de la simulación y el del día anterior).

6.4 Método 3: Polinomio

En este método se usarán tanto recta como polinomios de distintos grados para predecir los valores que tendrán las acciones en el futuro. Se simularán dos casos distintos en el que participe una sola empresa variando el número de días de los cuales se cogen los datos para calcular la recta o el polinomio de regresión. Se hará un estudio del efecto que tiene la variación del horizonte de predicción en estas dos simulaciones y se añadirá otro ejemplo, esta vez con varias empresas.

6.4.1 Caso 1

- Fecha de inicio: día 20 de la base de datos
- Duración: 10 días
- Empresas que intervienen: empresa 7 (Banco de Sabadell)
- Horizonte de predicción: 5
- Días usados para calcular la recta o el polinomio: 5 días
- Presupuesto inicial: 1000 euros

6.4.1.1 Recta

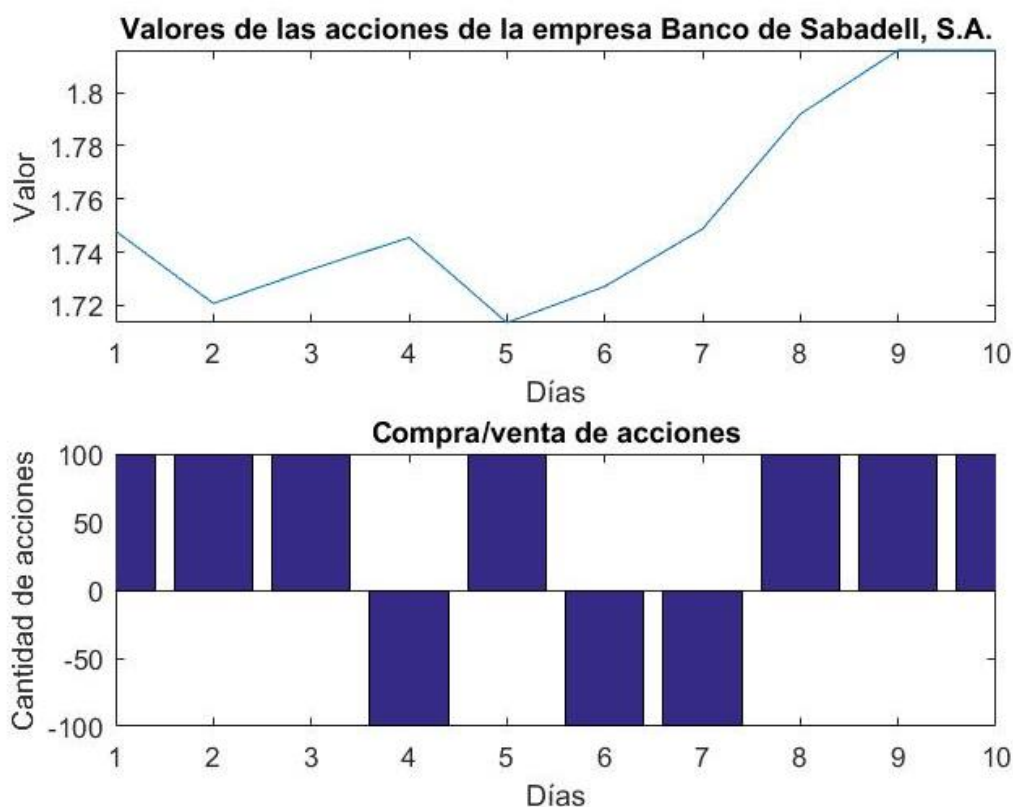


Figura 6-13. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.1.1

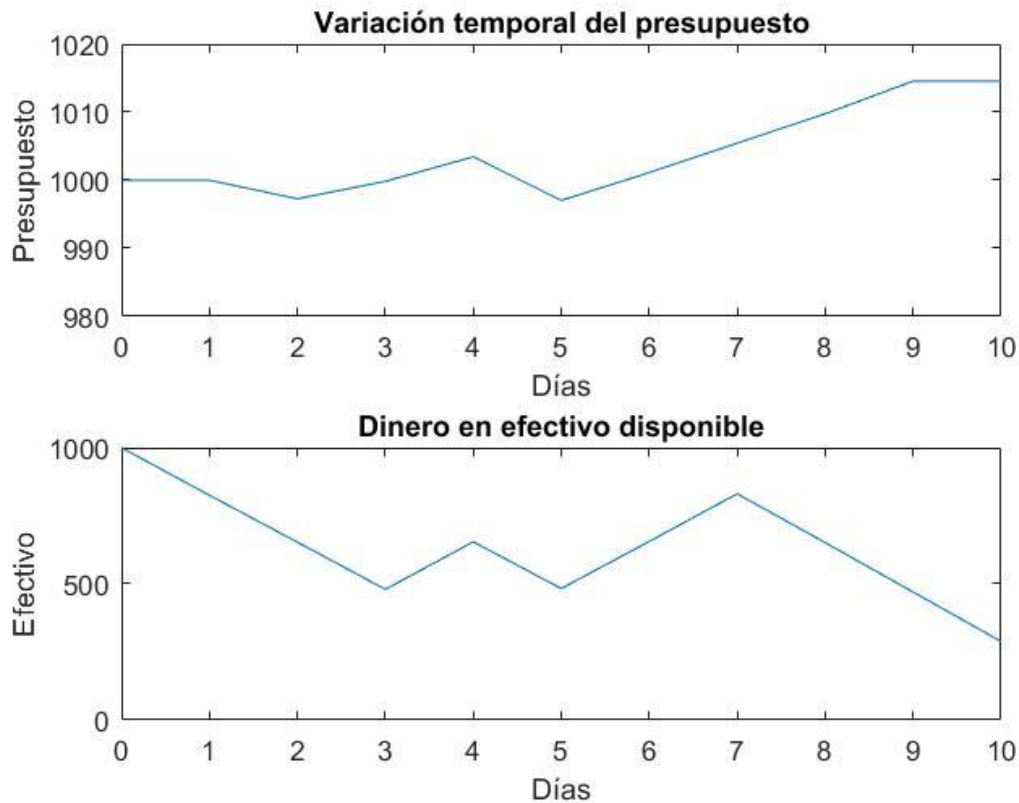


Figura 6-14. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.4.1.1

En los primeros días de la simulación se realizan operaciones de compra, lo cual se debe a que los valores de las acciones de Banco de Sabadell anteriores a los que aparecen en la gráfica provocan que la recta de regresión lineal sea ascendente. En cuanto a las operaciones de venta que se producen en los días intermedios de la simulación, los datos que se utilizan para diseñar la recta ya aparecen en la gráfica, pues son los datos de los primeros días de simulación. Se observa que la tendencia general de estos días es bajista, justificando así el tipo de operación efectuada. Sin embargo, el precio de las acciones en los últimos días se dispara, lo cual provoca que la recta de regresión sea ascendente y que las operaciones que se llevan a cabo sean de compra.

De esto se deduce que, al igual que el método anterior dependía de los cambios de tendencia en cada punto, este método se basa en la tendencia general de los valores. No es importante el número de cambios de tendencia o la cantidad de máximos o mínimos locales, sino que la tendencia general de los puntos anteriores al día de estudio marcará el crecimiento o decrecimiento de la recta de regresión lineal y, por tanto, el tipo de operación que se va a realizar.

Por otro lado, el hecho de que no se haya penalizado los cambios bruscos en la compra y venta de acciones provoca que en las operaciones realizadas intervengan el máximo de acciones posibles, favoreciendo así la búsqueda del beneficio máximo.

6.4.1.2 Polinomio de grado 3

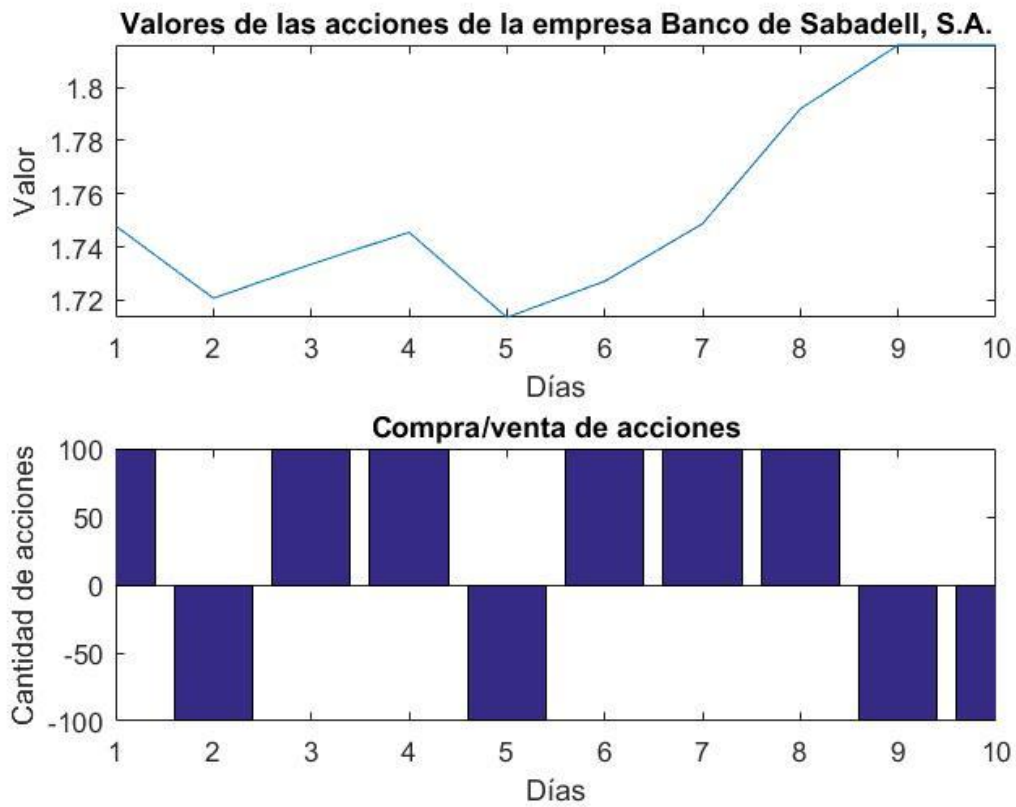


Figura 6-15. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.1.2

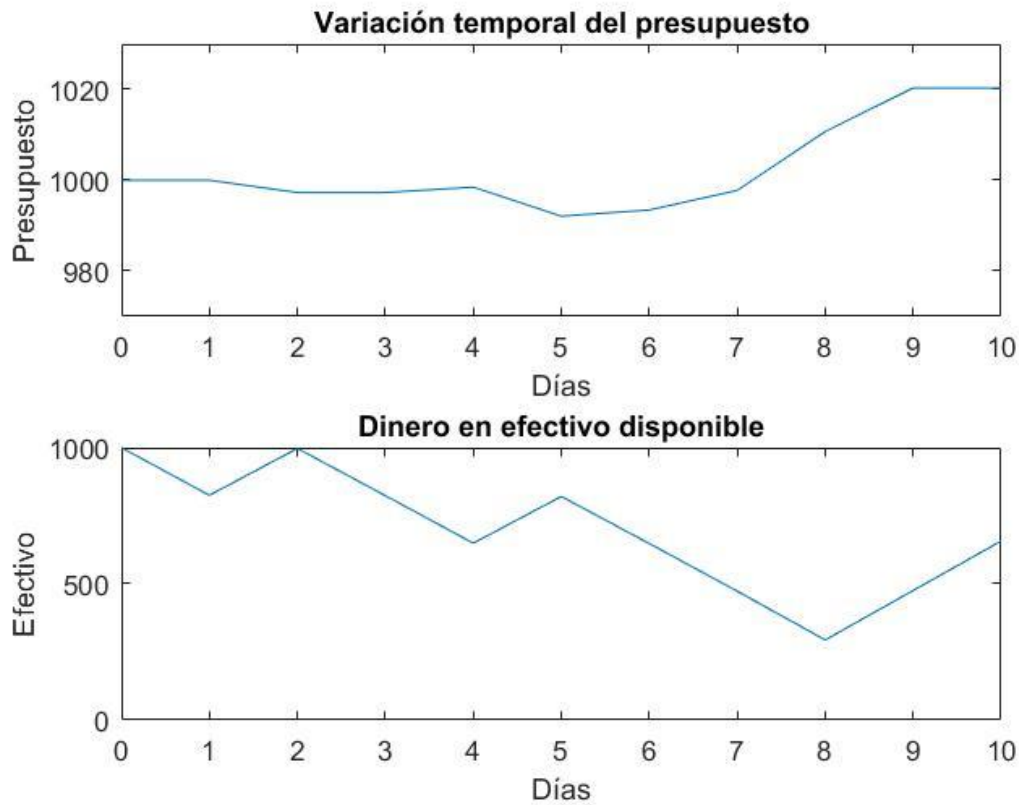


Figura 6-16. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.4.1.2

En los primeros días de simulación, se observa que existe un periodo de duda en el que se encadenan varias operaciones de compra y venta prácticamente consecutivas. Sin embargo, este método detecta de forma correcta la gran subida del valor de las acciones que se produce entre los días seis y nueve. Gracias a esto, con el polinomio de grado 3 (1020.32 euros) se obtiene un beneficio mayor al conseguido con la recta de regresión (1014.56 euros).

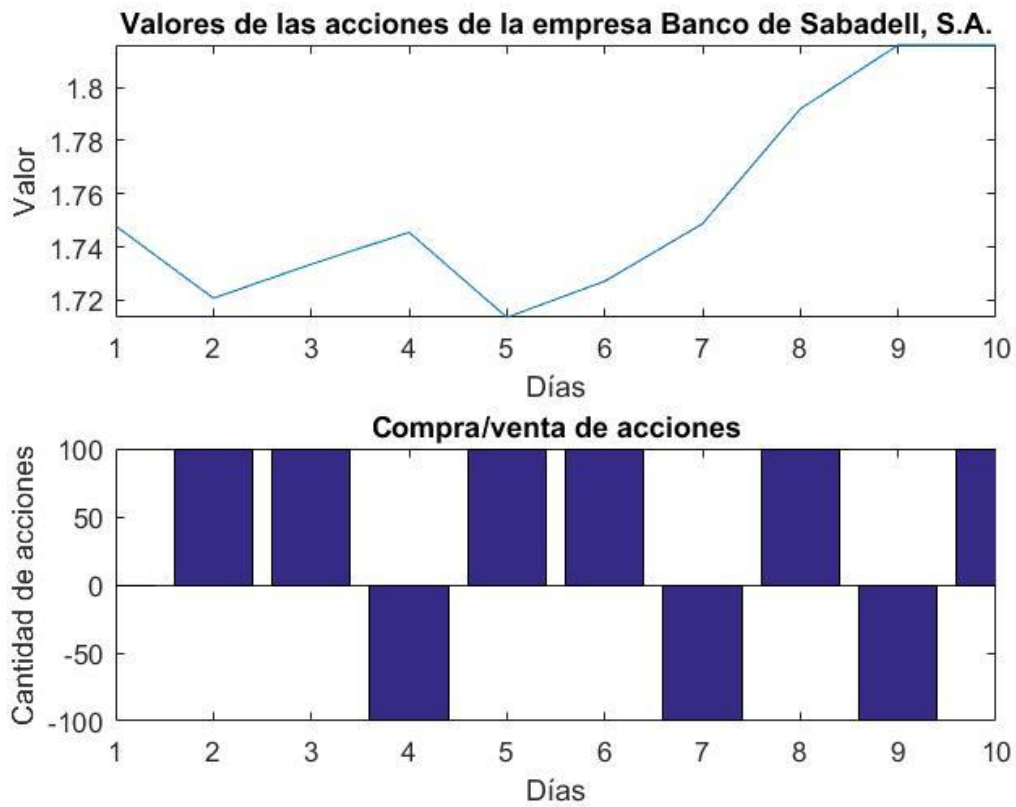
6.4.1.3 Polinomio de grado 5

Figura 6-17. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.1.3

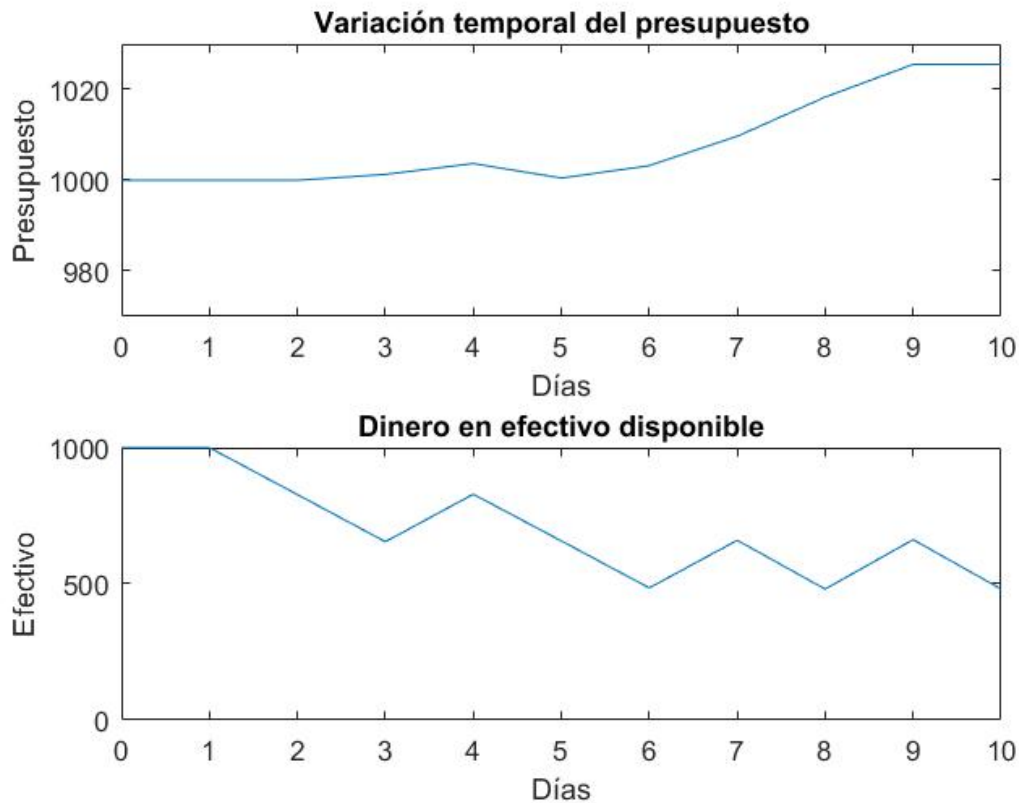


Figura 6-18. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.4.1.3

Se puede observar que el polinomio de grado 5 es el que está más acertado en este caso. Es capaz de adivinar si el valor de las acciones va a subir o bajar todos los días excepto el día siete, justo después del cual se produce la mayor subida. Pese a este día, el beneficio obtenido con este polinomio es el mayor de los tres casos estudiados para esta simulación: 1025.52 euros.

A continuación se volverá a realizar esta misma simulación cambiando la cantidad de días que se evalúan para conseguir la recta o el polinomio de regresión con el objetivo de analizar la importancia de este factor en los resultados obtenidos.

6.4.2 Caso 2

- Fecha de inicio: día 20 de la base de datos
- Duración: 10 días
- Empresas que intervienen: empresa 7 (Banco de Sabadell)
- Horizonte de predicción: 5
- Días usados para calcular la recta o el polinomio: 10 días
- Presupuesto inicial: 1000 euros

6.4.2.1 Recta

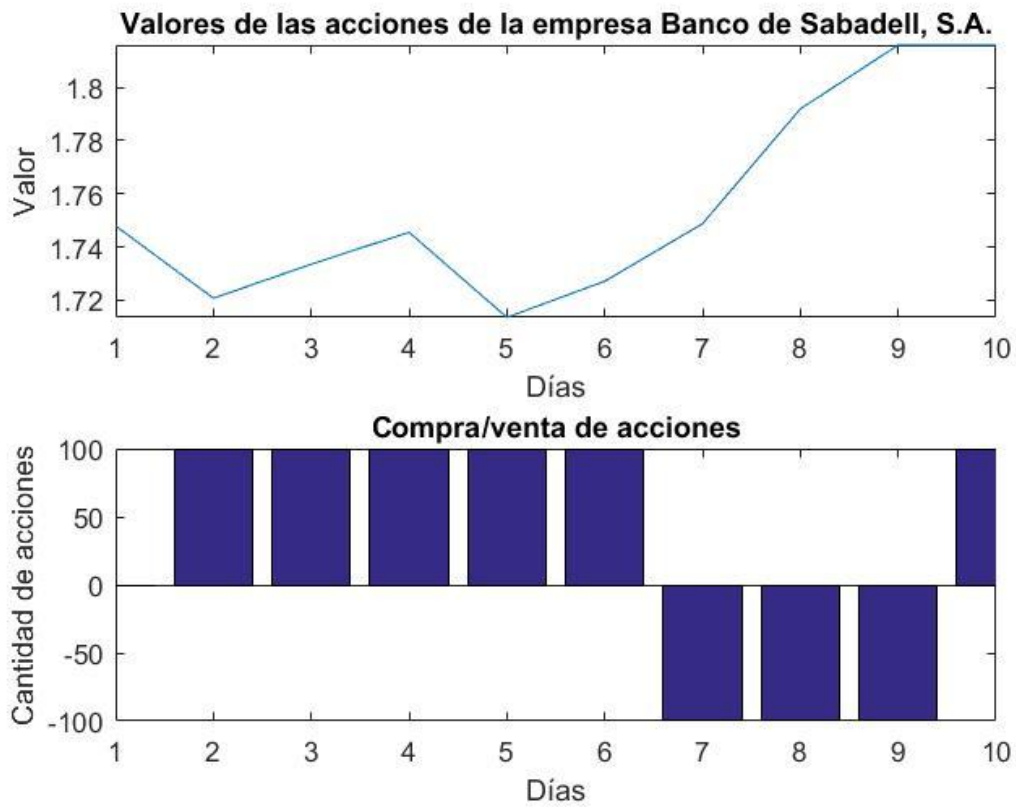


Figura 6-19. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.2.1

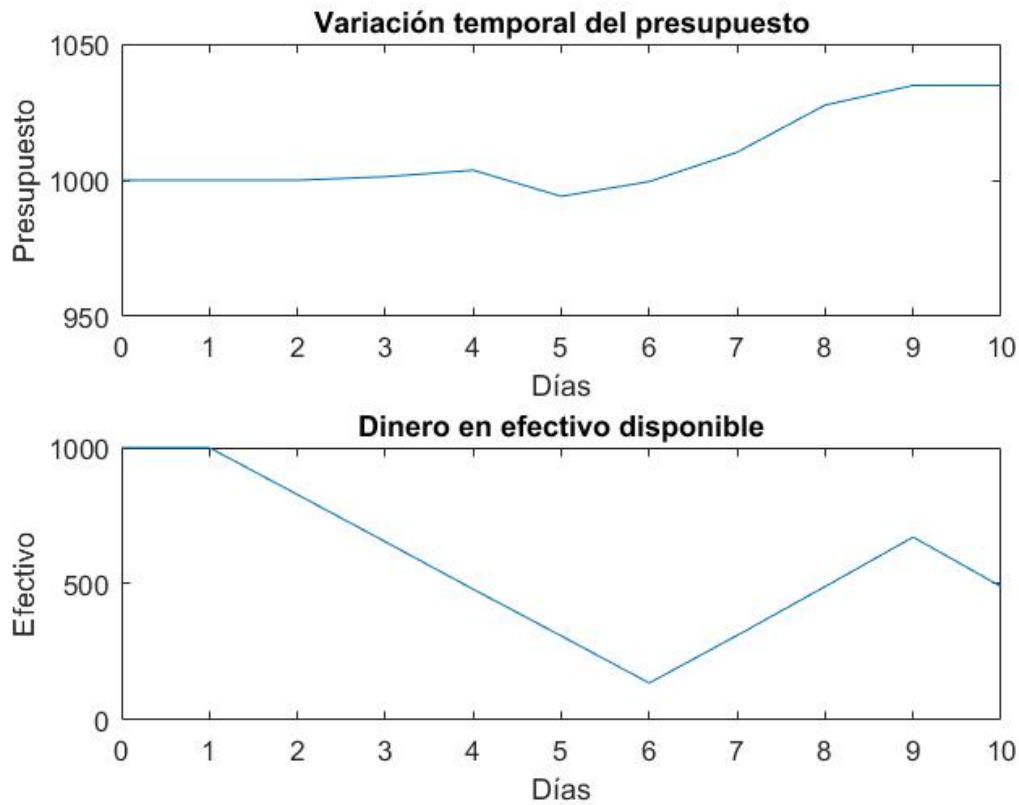


Figura 6-20. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado

Al depender la tendencia de la recta de más valores, es menos probable que se realice un cambio de signo en su pendiente al pasar de un día a otro. En este caso, la recta cambia de pendiente dos veces, mientras que en el caso anterior, usando menos valores para calcularla, se producían el doble de cambios. Sin embargo, esto permite tener una mayor cantidad de acciones cuando su valor se dispara, obteniéndose así un beneficio mayor (1034.80 euros por 1014.56 euros del caso anterior).

6.4.2.2 Polinomio de grado 3

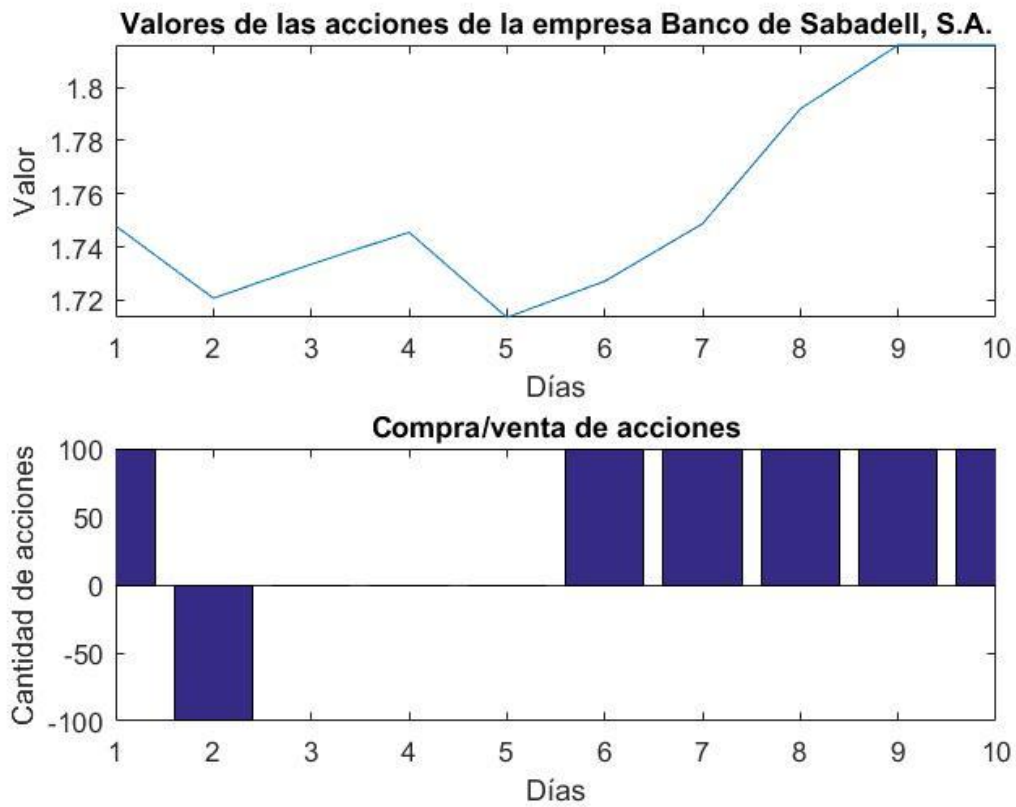


Figura 6-21. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.2.2

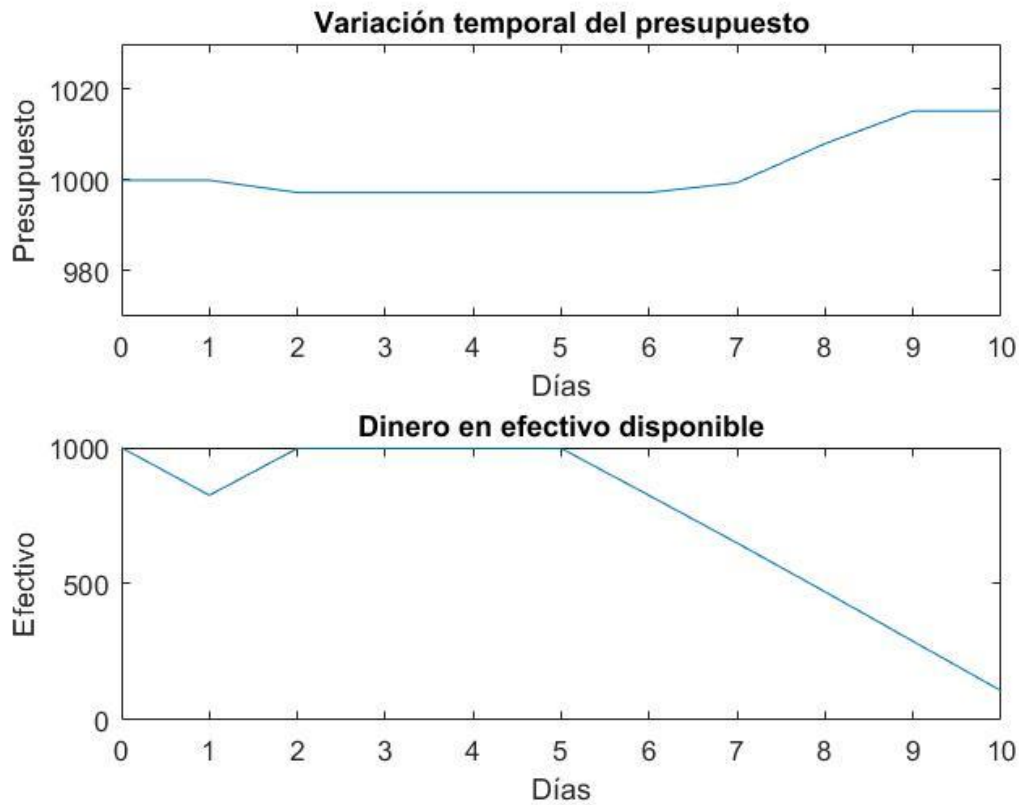


Figura 6-22. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.4.2.2

Al igual que el polinomio de grado 3 del caso anterior, los dos detectan la subida final y obtienen el máximo beneficio en ese tramo. La principal diferencia entre ambos radica en que, cuando se usan más valores para el cálculo del polinomio de regresión, se desaprovecha la primera parte de la simulación al no detectar las pequeñas subidas que se producen, por lo que en este tramo no se obtiene beneficio, lo cual provoca que el presupuesto final sea mayor en la situación anterior (1020.32 euros a 1015.28 euros).

6.4.2.3 Polinomio de grado 5

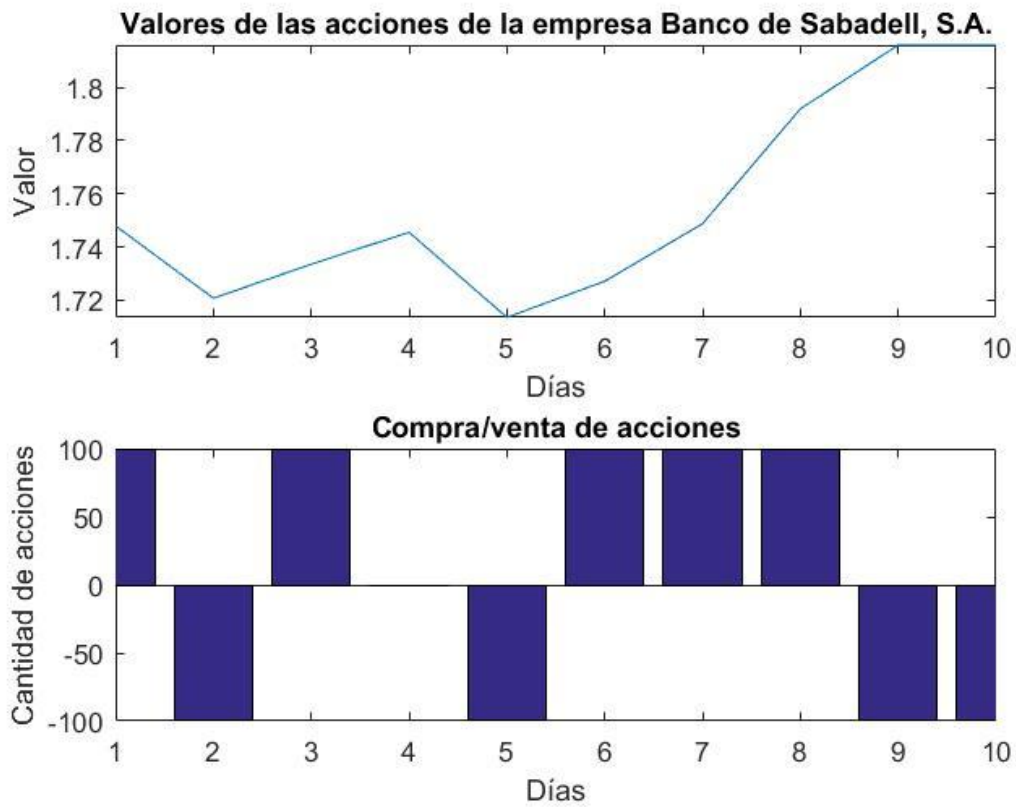


Figura 6-23. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.2.3

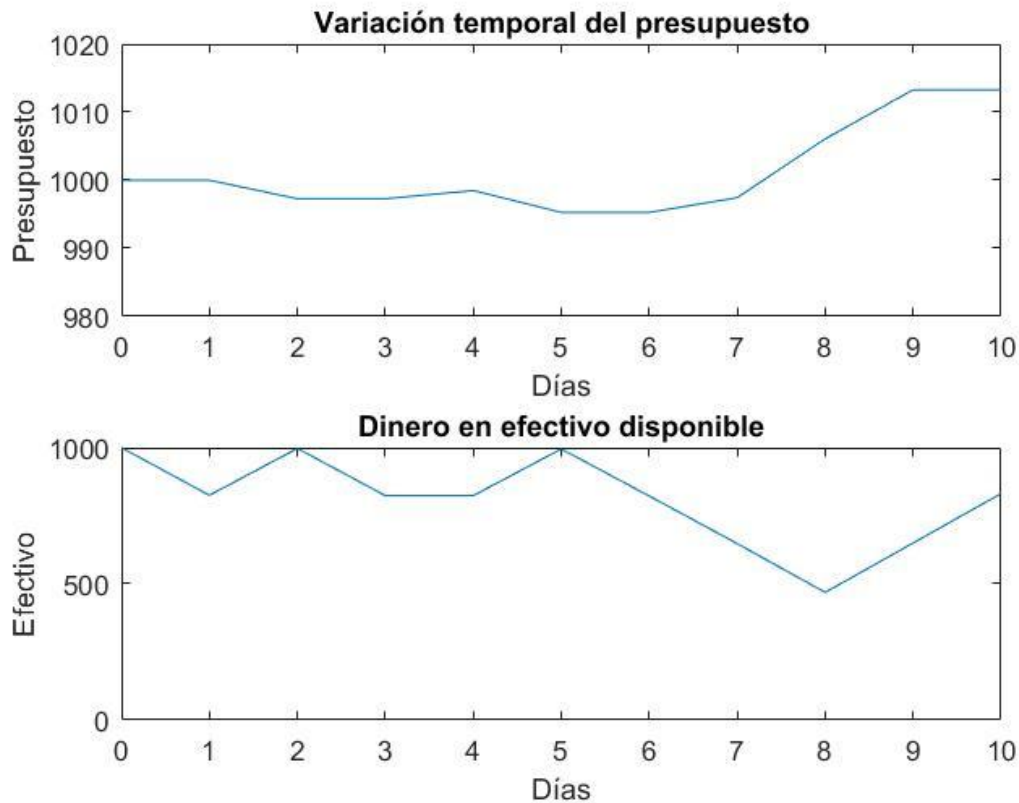


Figura 6-24. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.4.2.3

Por último, se encuentra el polinomio de grado cinco. Resultaba difícil superar el caso anterior ya que adivinaba si subía o bajaba el precio de las acciones todos los días menos uno. Aunque en esta ocasión se acierta ese día, el beneficio total, pese a ser positivo, es inferior al conseguido anteriormente (1025.52 euros a 1013.28 euros).

Como conclusión, se puede observar que aumentar la cantidad de datos utilizados para obtener la recta o el polinomio de regresión no siempre tiene por qué ser satisfactorio. Esto se debe a que se usan datos del pasado para predecir los valores del futuro, lo cual puede ocasionar que se desvirtúe el cálculo de la recta o el polinomio si los datos utilizados están muy alejados en el tiempo a los que se pretenden predecir.

6.4.2.4 Estudio del horizonte de predicción

A continuación, se van a volver a realizar todas las simulaciones de este método variando el valor del horizonte de predicción de 5 a 10. Los resultados están expuestos en la tabla que se muestra a continuación:

Presupuesto final	Horizonte de predicción: 5		Horizonte de predicción:10	
Días para cálculos	5	10	5	10
Recta	1014.56	1034.80	1004.32	1034.80
Polinomio grado 3	1020.32	1015.28	1020.32	1015.28
Polinomio grado 5	1025.52	1013.28	1025.52	1018.56

Tabla 6-9. Comparación de resultados según el horizonte de predicción

Como se puede observar, en muchos casos el presupuesto final es el mismo. En el resto de los casos, hay situaciones en las que este valor aumenta y otras en las que disminuye. Esto se debe a que el incremento o decremento del horizonte de predicción no va ligado al aumento o no del presupuesto final, sino que además intervienen muchos más parámetros. El hecho de aumentar este valor provoca que, a la hora de predecir los valores futuros de las acciones, éstos se pronostiquen para una mayor cantidad de días. Como únicamente se usa el primero de estos valores debido a la repetición de este cálculo al inicio de cada día, el efecto que provoca su modificación no produce un cambio radical en el beneficio obtenido.

6.4.3 Caso 3

- Fecha de inicio: día 100 de la base de datos
- Duración: 10 días
- Empresas que intervienen: empresa 7 (Banco de Sabadell), empresa 8 (Banco Santander) y empresa 9 (Bankia)
- Horizonte de predicción: 5
- Días usados para calcular la recta o el polinomio: 5 días
- Presupuesto inicial: 1000 euros

6.4.3.1 Recta

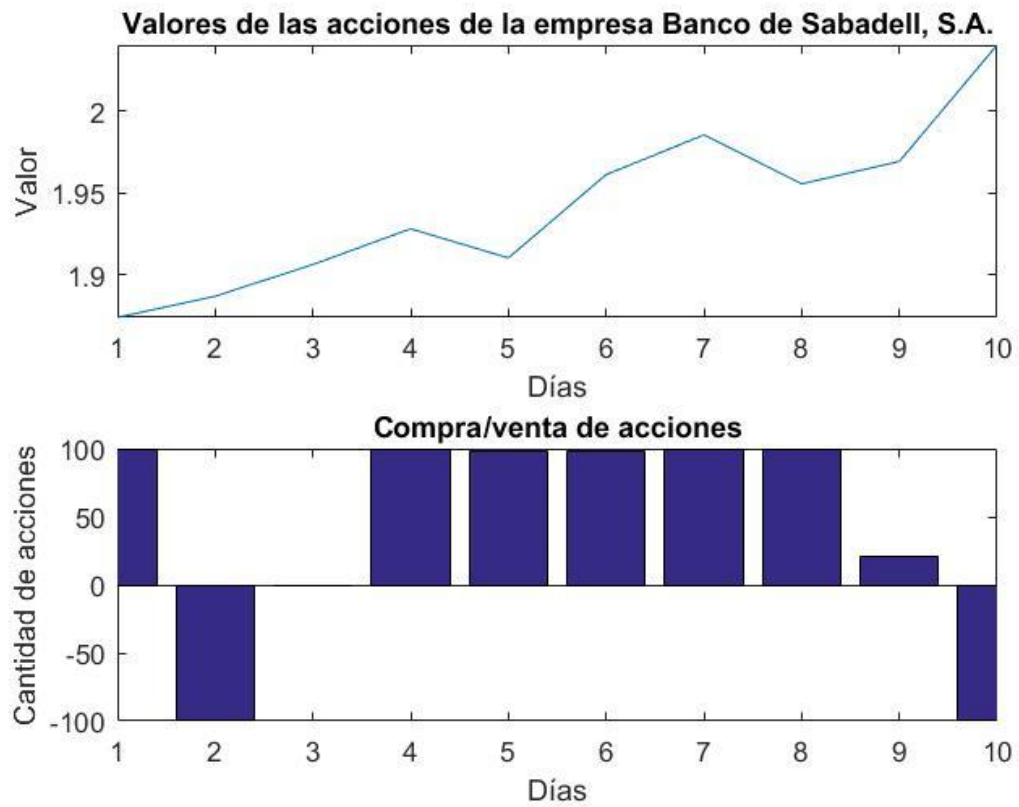


Figura 6-25. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.1

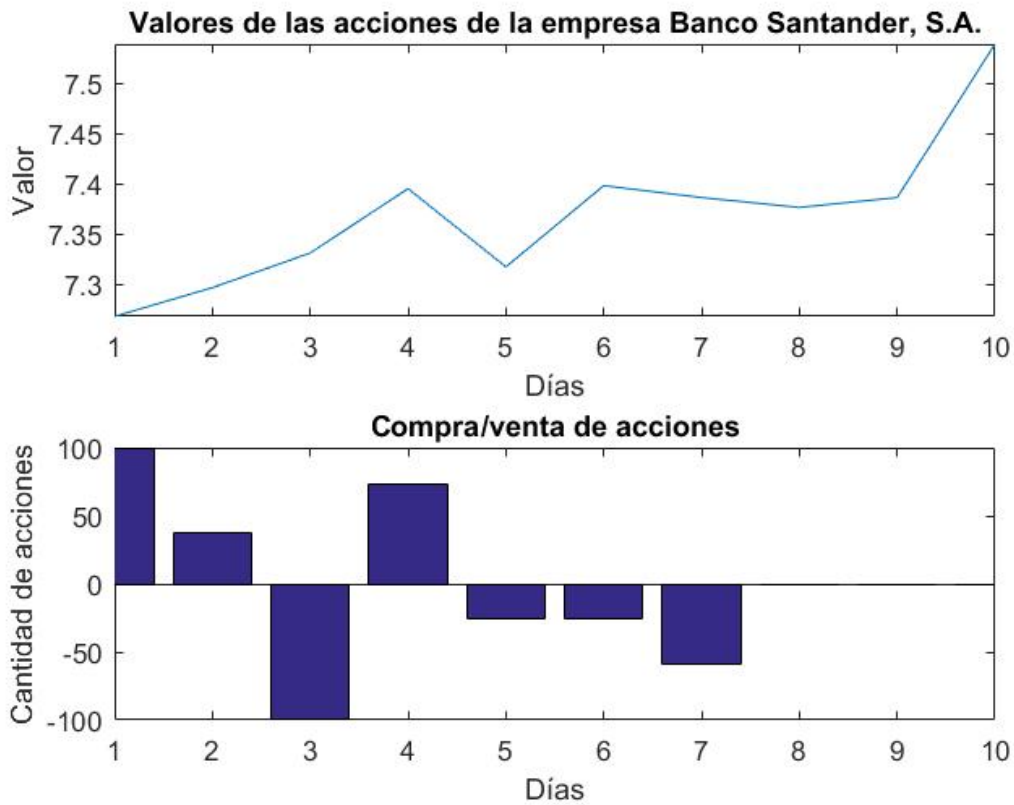


Figura 6-26. Resultados obtenidos de la empresa Banco Santander en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.1

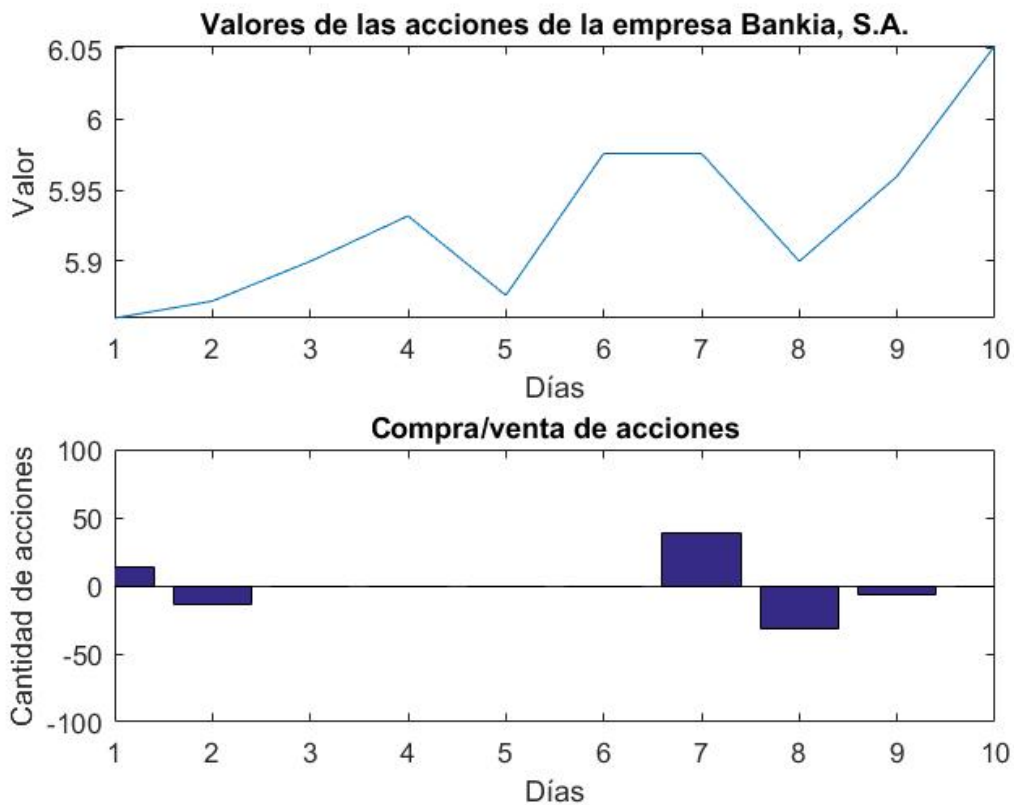


Figura 6-27. Resultados obtenidos de la empresa Bankia en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.1

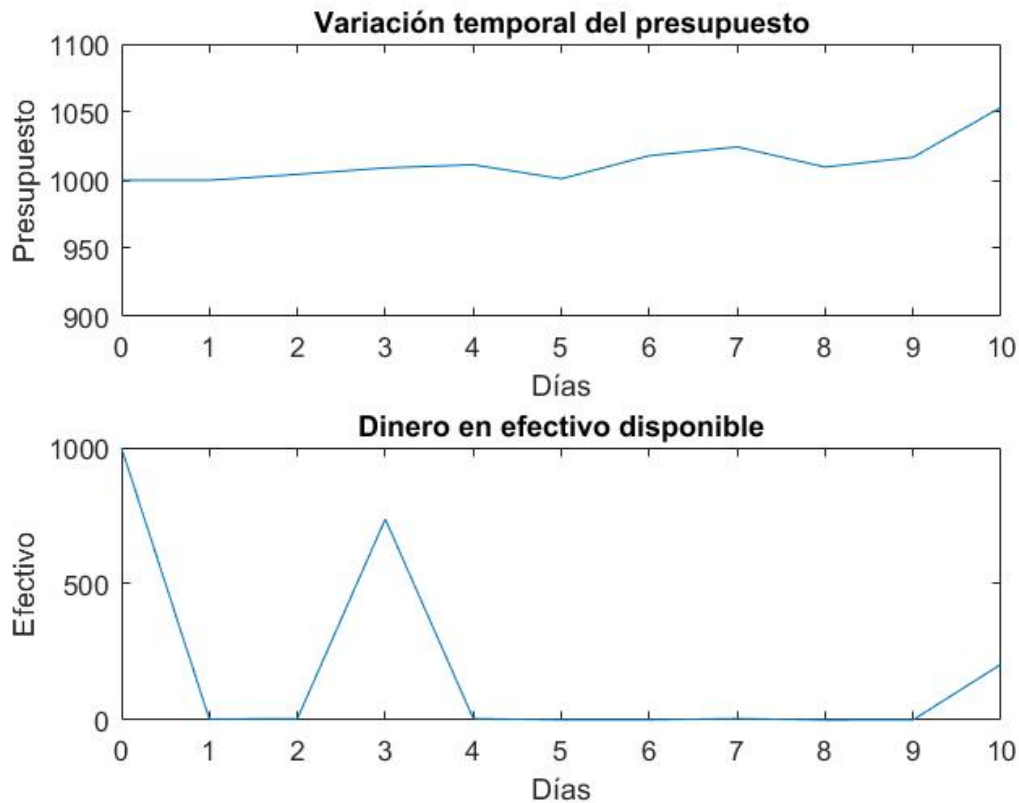


Figura 6-28. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.1

Esta simulación puede ser la más realista de las que se han hecho hasta ahora, pues se usa un método que predice los valores de las acciones en el futuro y además en ella intervienen varias empresas. Se observa que se obtiene un beneficio considerable teniendo en cuenta la duración de la simulación.

Al adentrarse en el ejemplo se observa que la cantidad de operaciones llevadas a cabo en la tercera empresa es escasa. Esto se debe al poco beneficio que producen sus acciones con relación a su valor en comparación con el resto de las empresas que intervienen en esta simulación, siendo la empresa Banco de Sabadell la que mayor beneficio genera por euro invertido gracias, en parte, al reducido valor de sus acciones. Como la tendencia general de esta última empresa nombrada es ascendente, se realizan muchas operaciones de compra incluso en días en los que el valor de las acciones va a disminuir, lo cual se debe al funcionamiento de este método. Pese a que en estos días se pierde dinero, el beneficio obtenido tras la simulación es muy positivo.

6.4.3.2 Polinomio de grado 5

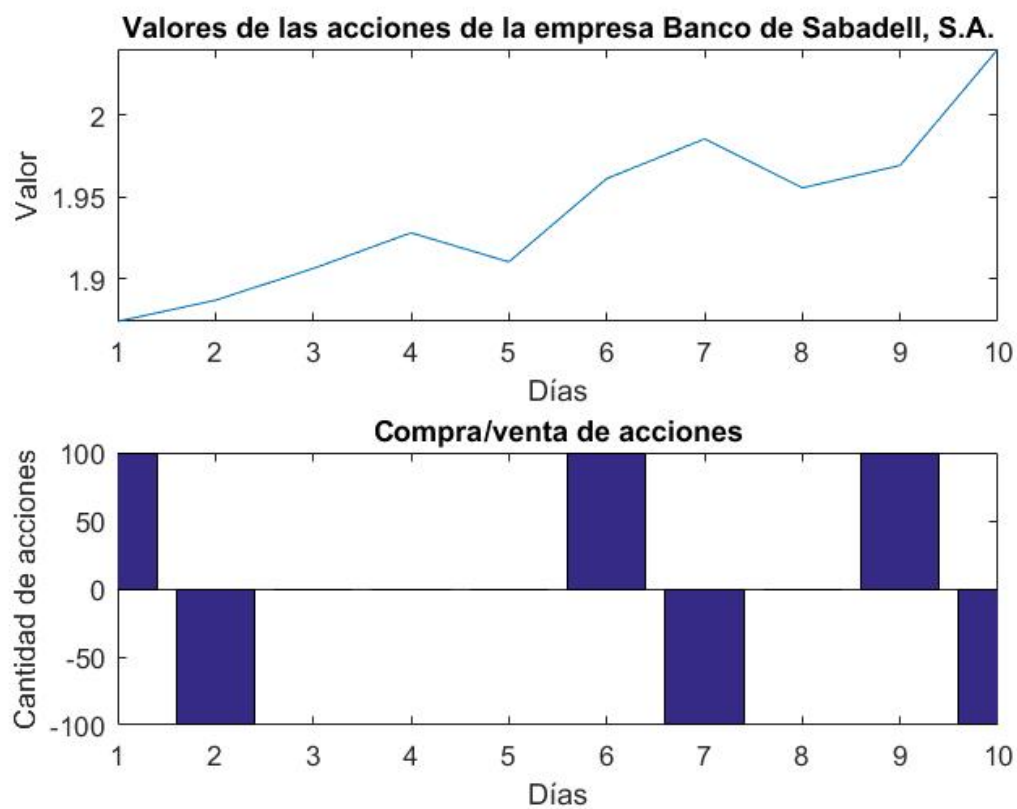


Figura 6-29. Resultados obtenidos de la empresa Banco de Sabadell en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.2

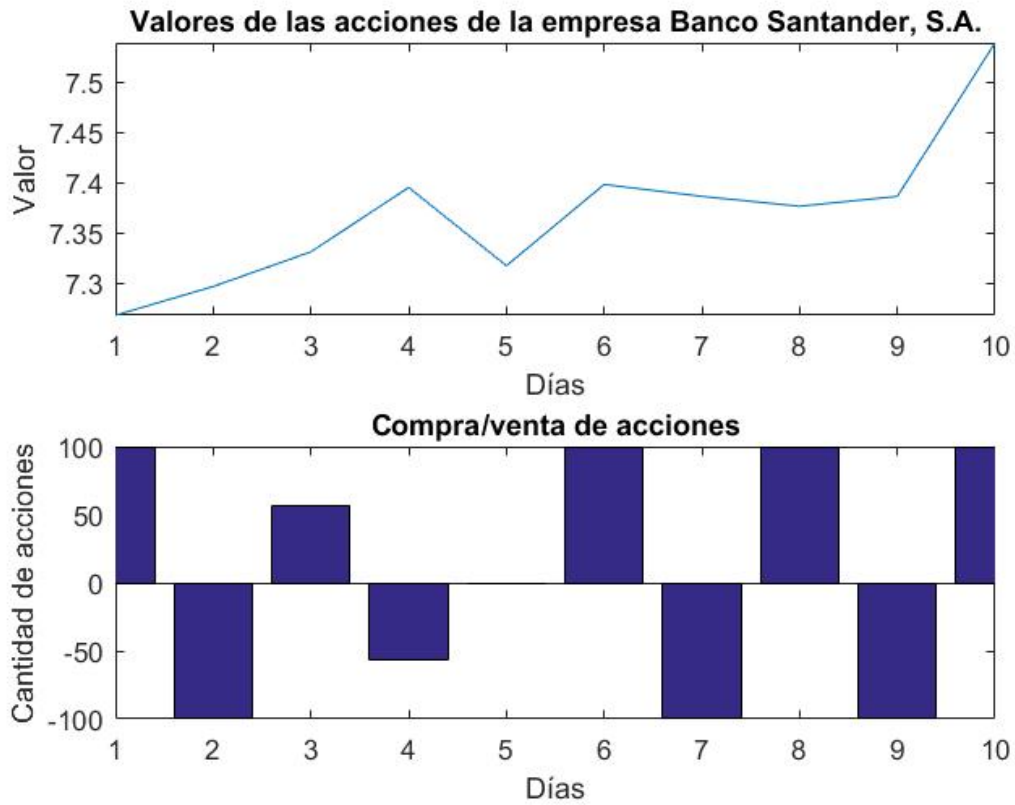


Figura 6-30. Resultados obtenidos de la empresa Banco Santander en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.2

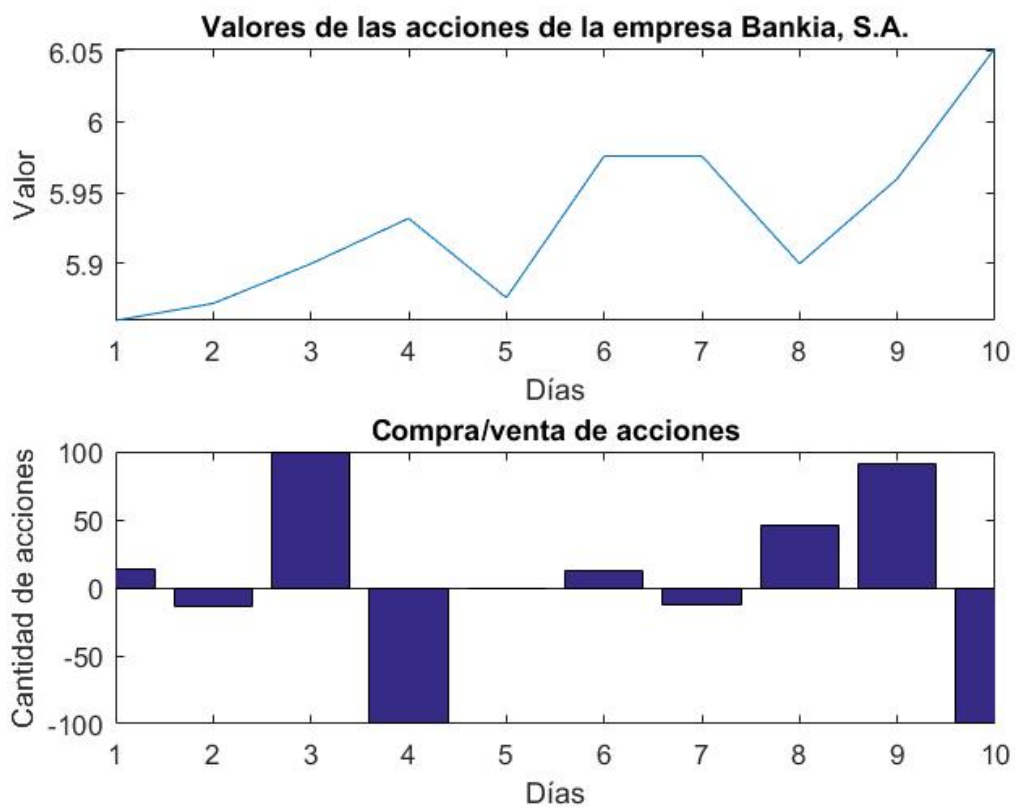


Figura 6-31. Resultados obtenidos de la empresa Bankia en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.2

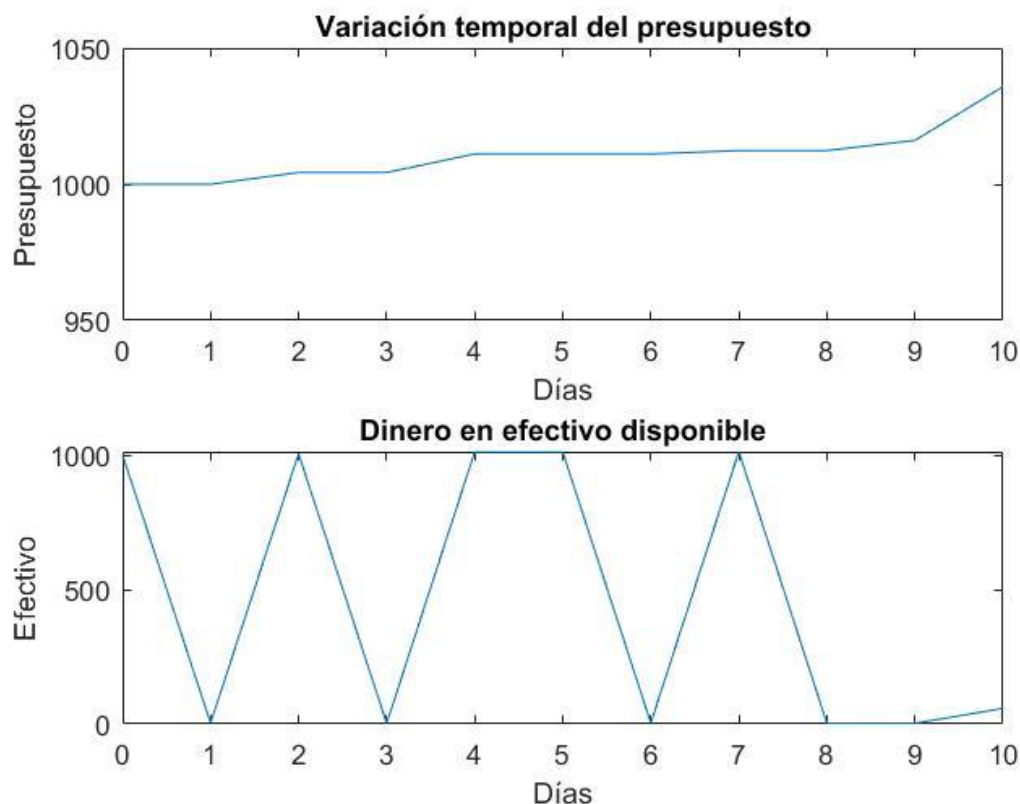


Figura 6-32. Resultados obtenidos del presupuesto en la simulación realizada en el apartado 6.4.3.2

A diferencia de la simulación anterior realizada con la recta de regresión, en este caso se produce un mayor movimiento de dinero entre las empresas, en muchos casos beneficiosos para aumentar el valor del presupuesto. Este es el motivo por el que hay días en los que se venden acciones aunque su valor vaya a aumentar. Ese efectivo se dedica a comprar acciones de las otras empresas ya que producirán un mayor beneficio por euro invertido.

En este caso, aunque el beneficio es positivo, no es superior al que se obtuvo en la simulación anterior con la recta de regresión. Esto no quiere decir que sea mejor usar una recta a un polinomio, ya que en otras simulaciones el presupuesto final conseguido mediante un polinomio es superior al obtenido con una recta. Por tanto, se concluye que dependiendo de la situación y del resto de parámetros resultará más beneficioso usar uno u otro.

6.5 Comparación entre los tres métodos

A continuación se van a mostrar tres casos en los cuales se han realizado las simulaciones del método de la bola de cristal, de tendencia, de la recta de regresión y del polinomio para los mismos parámetros iniciales.

6.5.1 Caso 1

- Fecha de inicio: día 30 de la base de datos
- Duración: 10 días
- Empresas que intervienen: empresa 1 (Acciona), empresa 2 (Acerinox) y empresa 3 (ACS)
- Horizonte de predicción: 5
- Días usados para calcular la recta o el polinomio: 10 días

- Número de acciones en las operaciones: 20
- Presupuesto inicial: 1000 euros

Método	Presupuesto final
Bola de cristal	1207.87
Tendencia	1099.37
Recta de regresión lineal	1002.79
Polinomio de grado 5	990.03

Tabla 6-10. Comparación de resultados de los distintos métodos en la simulación del apartado 6.5.1

En este primer caso se obtiene un gran resultado del método de tendencia en comparación con el beneficio máximo posible indicado por el método de la bola de cristal. Sin embargo, las dos últimas simulaciones apenas han generado beneficios (la última incluso produce algunas pérdidas). Si se estudian las gráficas de los valores de estas empresas durante la simulación, aparecen pocos cambios de tendencia muy separados entre sí, lo cual es beneficioso para el método dos, ya que los días en los que no hay cambios de tendencia, obtiene el beneficio máximo.

El hecho de que aparezcan cambios de tendencia distanciados entre sí varios días es perjudicial para el tercer método, ya sea con recta o con polinomio. Este método obtiene mayor beneficio cuanto más estable sea la tendencia general de los valores de las acciones. Al haber un cambio de tendencia cada varios días, provoca que la tendencia general de la gráfica también cambie, ya que si ese cambio solo durara un día, el resto de los datos utilizados para calcular la recta o el polinomio lo camuflarían. Por tanto, una vez que la recta o el polinomio se ha adecuado a la nueva tendencia general, ésta vuelve a cambiar, haciendo prácticamente imposible el hecho de obtener beneficio alguno.

6.5.2 Caso 2

- Fecha de inicio: día 100 de la base de datos
- Duración: 10 días
- Empresas que intervienen: empresa 1 (Acciona), empresa 2 (Acerinox) y empresa 3 (ACS)
- Horizonte de predicción: 5
- Días usados para calcular la recta o el polinomio: 5 días
- Número de acciones en las operaciones: 20
- Presupuesto inicial: 1000 euros

Método	Presupuesto final
Bola de cristal	1070.91
Tendencia	1012.93
Recta de regresión lineal	1054.29
Polinomio de grado 5	1036.72

Tabla 6-11. Comparación de resultados de los distintos métodos en la simulación del apartado 6.5.2

En este caso, el beneficio obtenido mediante el método de la bola de cristal no es muy elevado, debido a que durante la simulación los valores de las acciones sufren grandes caídas y la tendencia general no es muy positiva. Pese a esto, todos los métodos obtienen beneficio. Al contrario que en el caso anterior, aparecen bastantes cambios de tendencia, lo cual perjudica el método dos. Sin embargo, este método obtiene un presupuesto final mayor al inicial gracias a que se aprovecha de algunos tramos de crecimiento de los valores. En cuando al método tres, se observa que se adecua bastante bien a estos cambios de tendencia y a una simulación en la que consigue un cantidad importante de beneficio (en el caso de la recta, mayor al 75% del máximo posible) con respecto al método de la bola de cristal

6.5.3 Caso 3

- Fecha de inicio: día 200 de la base de datos
- Duración: 10 días
- Empresas que intervienen: empresa 1 (Acciona), empresa 2 (Acerinox), empresa 3 (ACS), empresa 4 (Aena), empresa 5 (Amadeus), empresa 6 (ArcelorMittal), empresa 7 (Banco de Sabadell), empresa 8 (Banco Santander), empresa 9 (Bankia) y empresa 10 (Bankinter).
- Horizonte de predicción: 5
- Días usados para calcular la recta o el polinomio: 5 días
- Número de acciones en las operaciones: 50
- Presupuesto inicial: 50000 euros
- Acciones iniciales que se poseen de cada empresa: 100 acciones

Método	Presupuesto final
Bola de cristal	53501.93
Tendencia	49433.80
Recta de regresión lineal	50129.41
Polinomio de grado 5	50935.06

Tabla 6-12. Comparación de resultados de los distintos métodos en la simulación del apartado 6.5.3

Este último caso emula lo que podría ser el mercado de valores en la vida real. Teniendo en cuenta diez empresas y partiendo de un presupuesto inicial elevado que estará formado tanto por efectivo como por

acciones de las empresas que participan en esta simulación, se intentará maximizar el beneficio. En esta simulación, el método de tendencia no consigue obtener beneficio ni siquiera mantener el presupuesto inicial. Usando la recta de regresión lineal se genera un beneficio del 3.7% respecto al beneficio máximo posible. Sin embargo, con el método del polinomio de grado cinco se obtiene algo más de una cuarta parte del beneficio obtenido por el método de la bola de cristal, lo cual resulta una cifra bastante considerable.

7 CONCLUSIONES DEL PROYECTO

Puedo calcular a la pulgada y al segundo las órbitas de los cuerpos celestes, pero soy absolutamente incapaz de predecir hasta dónde puede arrastrar las cotizaciones de la Bolsa una multitud histérica.

Isaac Newton

De este proyecto, al igual que de todos los proyectos que abarcan el mismo tema, se obtiene la misma conclusión: el mercado de valores no se puede predecir con exactitud. Se pueden realizar simulaciones con los métodos que se han desarrollado en las que el beneficio obtenido es positivo y no muy distinto al máximo beneficio posible. Sin embargo, realizando otra simulación distinta con los mismos parámetros iniciales en otro periodo de tiempo, puede darse el caso en el que el beneficio sea mínimo o incluso que se produzcan pérdidas.

El principal motivo de esto radica en la cantidad de factores que influyen en el mercado, tal y como se vio en el capítulo 2. El hecho de que no exista la posibilidad de controlar estos factores aumenta la dificultad del problema. Desde acontecimientos económicos hasta decisiones políticas, pasando por conflictos internacionales, pueden cambiar de forma radical la tendencia de los precios de las acciones de cualquier mercado financiero. Cualquier pequeño detalle puede tener una importancia vital para la bolsa.

En cuanto a los métodos que se han desarrollado, es importante destacar que el método de la recta o el polinomio de regresión suele obtener unos mayores resultados que el método de la tendencia, aunque dependía bastante de la cantidad de datos que se usaban para calcular esa función. Usar más datos no significa mayor éxito ya que, en ocasiones, al intervenir una mayor cantidad de valores la recta o el polinomio de regresión, tardaba más tiempo en adaptarse al crecimiento o decrecimiento de los precios.

Pese a todo esto, se puede concluir que el método de control predictivo es bastante fiable dentro del ámbito del IBEX35. Muchos de los resultados que se han obtenido son positivos con un buen porcentaje de ganancias. Sin embargo, existe un gran riesgo si se utilizara este procedimiento para invertir en bolsa en la vida real.

7.1 Posibles líneas de ampliación

Para terminar, se van a proponer varios aspectos en los cuales este proyecto puede llegar a ser ampliado en el futuro:

- Reducir el número de limitaciones impuestas en el capítulo 3. Un buen ejemplo sería introducir comisiones a la hora de comprar y vender acciones. El controlador debería tener este hecho en cuenta a la hora de indicar la compra de acciones ya que, si el beneficio obtenido no es muy elevado, al sumarle la comisión puede que no traiga cuenta llevar a cabo esa operación. Otra opción sería introducir en la base de datos todos los dividendos que han repartido las empresas en ese periodo y añadirlos al presupuesto total si se diera el caso en el cual se debieran recibir.
- Adentrándonos en el método de control predictivo, resultaría interesante estudiar el efecto que tendría la perturbación (se supuso nula) en el beneficio obtenido, así como su relación con el resto de los parámetros que influyen en el problema. Se podría analizar en qué casos se obtendría un beneficio

mayor y en cuáles no.

- Extrapolar esta solución e implementarlas en otro tipo de mercados, como los mercados de divisas o de criptomonedas. Consistiría en utilizar el método de control predictivo adecuando los parámetros iniciales para obtener el máximo beneficio posible. Se podría realizar una comparación entre los distintos mercados para averiguar en cuál de ellos este método funciona mejor.
- Realizar la implementación de la base de datos a partir de los valores históricos en tiempo real. En el apartado 5.1, se analizan varios métodos para la creación e implementación de la base de datos. Se analizó la posibilidad de implementar algoritmos que accedieran a determinadas páginas webs para descargar los datos de los valores de las acciones en tiempo real. Esto permitiría darle un sentido aún más realista a este proyecto, ya que si se utilizan los datos más próximos al instante en el que se esté simulando, se podría predecir el valor futuro de las acciones y obtener el tipo de operación a realizar, la cual se podría llevar a cabo si se dispone de la confianza necesaria en este proyecto y el dinero suficiente como para realizar una operación financiera en la vida real.

ANEXO 1: CÓDIGO

```
basicmpcTVS.m
function U = basicmpcTVS(A, B, D, Ax, bx, Au, bu, Q, R, N, W, x)
% function U = mpc(A, B, D, Ax, bx, Au, bu, Q, R, N, W, x)
% Parameters:
% - Define model matrices: A, B, D
% - Constraints Ax, bx, Au, bu
% - Prediction horizon N
% - Define cost function and expected disturbances Q, R
% - Prediction horizon N
% - Disturbance vector W
% - Initial state x

% Define prediction horizon and other useful variables
nx=size(A,2); % number of states
nu=size(B,2); % number of inputs
nw=size(D,2); % number of disturbances

% Future states can be written as X=Gx*x(0)+Gu*U+Gw*W
% Build matrix Gx= [A(1); A(1)*A(2); A(1)*A(2)*A(3)...]
Gx=zeros(N*nx, nx);
Gx(1:nx,:)=A(:, :, 1);
for i=2:N
    Gx( (i-1)*nx+1:i*nx , :)= Gx( (i-2)*nx+1:(i-1)*nx , :)* A(:, :, i);
end

% Build matrix Gu= [B(1),zeros; A(2)B(1), B(2), zeros; A(3)A(2)B(1),
A(3)B(2), B(3);... ]
Gu=zeros(N*nx, N*nu);
for i= 1:N
    for j=1:i
        if i==j
            Gu((i-1)*nx+1:(i)*nx, (j-1)*nu+1:(j)*nu)= B(:, :, i);
        else
            Gu((i-1)*nx+1:(i)*nx, (j-1)*nu+1:(j)*nu)= A(:, :, i)* Gu((i-
2)*nx+1:(i-1)*nx , (j-1)*nu+1:(j)*nu);
        end
    end
end

% Build matrix Gw= [D(1),zeros; A(2)D(1), D(2), zeros; A(3)A(2)D(1),
A(3)D(2), D(3);... ]
Gw=zeros(N*nx, N*nw);
for i= 1:N
    for j=1:i
        if i==j
            Gw((i-1)*nx+1:(i)*nx, (j-1)*nw+1:(j)*nw)= D(:, :, i);
        else
            Gw((i-1)*nx+1:(i)*nx, (j-1)*nw+1:(j)*nw)= A(:, :, i)* Gw((i-
2)*nx+1:(i-1)*nx , (j-1)*nw+1:(j)*nw);
        end
    end
end
```

```

% Build R_hat
R_hat=kron(ones(1,N),R);

% Build Q_hat
Q_hat=kron(ones(1,N),Q);

% Build cost function
F=Q_hat*Gu;

% Transform into U constraints
Au_hat=kron(eye(N),Au);
bu_hat=kron(ones(N,1),bu);
Ax_hat=kron(eye(N),Ax);
bx_hat=kron(ones(N,1),bx);

% Aggregated U constraints
AU=[Ax_hat*Gu; Au_hat];
bU=[bx_hat-Ax_hat*Gx*x-Ax_hat*Gw*W;bu_hat];

U=linprog(F,AU,bU);

ControlPredictivoPrueba.m
function U=ControlPredictivoPrueba(x)
%La entrada de esta función es el estado inicial x.
HorizontePred=5;
tam=2;%Número de empresas
valor1=[1 1 2 2 2]; %valor de las acciones de la empresa 1
valor2=[2 2 2 1 1]; %valor de las acciones de la empresa 2

%%Definición matriz A
A(:,:,HorizontePred)=zeros(tam+2);
for k=1:HorizontePred
    A(:,:,k)=eye(tam+2);
end

for ii=1:tam
    for k=1:HorizontePred
        A(end,1,k)=valor1(k);
        A(end,2,k)=valor2(k);
    end
end
A(end,end-1,:)=1;
%display(A);

%Definición matriz B
B(:,:,HorizontePred)=zeros(tam+2,tam);
for k=1:HorizontePred
    B(1:tam,1:tam,k)=eye(tam);
end

for k=1:HorizontePred
    B(tam+1,1,k)=-valor1(k);
    B(tam+1,2,k)=-valor2(k);
end
%display(B);

%Definición matriz D
D=zeros(tam+2,tam,HorizontePred);
%display(D);

%Definición matriz Ax

```

```

Ax=-eye(tam+2);
%display(Ax);

%Definición matriz bx
bx=zeros(tam+2,1);
%display(bx);

%Definición matriz Au
Au=eye(tam);
Au(tam+1:2*tam,1:tam)=-eye(tam);
%display(Au);

%Definición matriz bu
bu=100*ones(2*tam,1);
%display(bu);

%Definición matriz Q
Q=zeros(1,tam+2);
Q(end,end)=-1;
%display(Q);

%Definición matriz R
R=zeros(1,tam);
%display(R);

%Definición matriz N
N=HorizontePred;
%display(N);

%Definición matriz W
W=zeros(tam*N,1);
%display(W);

U=basicmpcTVS(A, B, D, Ax, bx, Au, bu, Q, R, N, W, x);
%U=0;
end

```

```

res_MPC.m
clear all; close all;
load datos.mat
IndiceEmpresas=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10];
InicioFecha=200; %fecha del calendario donde empieza la simulación, mayor que
cero
HorizontePred=5;
Dia=10; %días que dura la simulación
PresupuestoInicial=input('Introduce el presupuesto inicial: ');

%Definición tamaño vectores y matrices
tam=length(IndiceEmpresas);
x=zeros(tam+2,1);
u=zeros(tam,Dia);
efectivo=zeros(1,Dia);
Presupuesto=zeros(1,Dia);

%Definición del estado inicial del vector x
x(tam+1)=PresupuestoInicial;
x(tam+2)=PresupuestoInicial;

for i=1:tam

```

```

        x(i)=input(['Introduce la cantidad de acciones de la empresa ',
num2str(IndiceEmpresas(i)), ': ']);
        x(tam+1)=x(tam+1)-x(i)*datos(IndiceEmpresas(i)).Valores(InicioFecha-1,1);
end

if x(tam+1)<0
    error(';El dinero en efectivo no puede ser negativo!');
else
    disp(['Tu efectivo inicial es de : ', num2str(x(tam+1)), ' €']);
end

for i=0:Dia-1
    pause(0.5)
    U=ControlPredictivo(IndiceEmpresas,InicioFecha+i,HorizontePred,x,datos);
    display(U);
    NO_efectivo=0;
    %Venta de acciones
    for j=1:tam
        if U(j)<=0
            u(j,i+1)=round(U(j));
            x(tam+1)=x(tam+1)-
(u(j,i+1))*datos(IndiceEmpresas(j)).Valores(InicioFecha+i,1);
            x(j)=x(j)+u(j,i+1);

NO_efectivo=NO_efectivo+(x(j))*datos(IndiceEmpresas(j)).Valores(InicioFecha+i
,1);
            end
        end
        %Compra de acciones
        for j=1:tam
            if U(j)>0
                u(j,i+1)=round(U(j));
                while u(j,i+1)*datos(IndiceEmpresas(j)).Valores(InicioFecha+i,1)
> x(tam+1) && u(j,i+1)~=0
                    u(j,i+1)=u(j,i+1)-1;
                end
                x(tam+1)=x(tam+1)-
(u(j,i+1))*datos(IndiceEmpresas(j)).Valores(InicioFecha+i,1);
                x(j)=x(j)+u(j,i+1);

NO_efectivo=NO_efectivo+(x(j))*datos(IndiceEmpresas(j)).Valores(InicioFecha+i
,1);
            end
        end
        x(tam+2)=x(tam+1)+NO_efectivo;
        efectivo(i+1)=x(tam+1);
        disp(['Presupuesto: ', num2str(x(tam+2))]);
        Presupuesto(i+1)=x(end);
    end
    %Representación de gráficas
    grafica(Presupuesto,PresupuestoInicial,IndiceEmpresas,InicioFecha,u,efectivo,
datos)

```

ControlPredictivo.m

```

function [U,x]=ControlPredictivo(IndiceEmpresas, InicioFecha, HorizontePred,
x, datos)
%Las entradas de esta función son un vector cuyos componentes serán los
índices de
%las empresas que queremos que participen en el control, un entero que
contiene

```

```
%el índice de la fecha según la estructura creada, el valor del horizonte de
%predicción, el estado inicial x y la estructura con toda la información.
tam=length(IndiceEmpresas);
```

```
%%Definición matriz A
```

```
A(:, :, HorizontePred)=zeros (tam+2);
```

```
for k=1:HorizontePred
```

```
    A(:, :, k)=eye (tam+2);
```

```
end
```

```
cont_A=1; %contador de empresas
```

```
for ii=IndiceEmpresas
```

```
    for k=1:HorizontePred
```

```
        A(end, cont_A, k)=datos(ii).Valores(InicioFecha+k-1,1);
```

```
    end
```

```
    cont_A=cont_A+1;
```

```
end
```

```
A(end, end-1, :)=1;
```

```
%display(A);
```

```
%Definición matriz B
```

```
B(:, :, HorizontePred)=zeros (tam+2, tam);
```

```
for k=1:HorizontePred
```

```
    B(1:tam, 1:tam, k)=eye (tam);
```

```
end
```

```
cont_B=1; %contador de empresas
```

```
for ii=IndiceEmpresas
```

```
    for k=1:HorizontePred
```

```
        B(tam+1, cont_B, k)=-datos(ii).Valores(InicioFecha+k-1,1);
```

```
    end
```

```
    cont_B=cont_B+1;
```

```
end
```

```
%display(B);
```

```
%Definición matriz D
```

```
D=zeros (tam+2, tam, HorizontePred);
```

```
%display(D);
```

```
%Definición matriz Ax
```

```
Ax=-eye (tam+2);
```

```
%display(Ax);
```

```
%Definición matriz bx
```

```
bx=zeros (tam+2, 1);
```

```
%display(bx);
```

```
%Definición matriz Au
```

```
Au=eye (tam);
```

```
Au (tam+1:2*tam, 1:tam)=-eye (tam);
```

```
%display(Au);
```

```
%Definición matriz bu
```

```
bu=100*ones (2*tam, 1);
```

```
%display(bu);
```

```
%Definición matriz Q
```

```
Q=zeros (1, tam+2);
```

```
Q (end, end)=-1;
```

```
%display(Q);
```

```
%Definición matriz R
```

```

R=zeros(1,tam);
%display(R);

%Definición matriz N
N=HorizontePred;
%display(N);

%Definición matriz W
W=zeros(tam*N,1);
%display(W);

U=basicmpcTVS(A, B, D, Ax, bx, Au, bu, Q, R, N, W, x);
%U=0;
end

res_simple.m
clear all; close all;
load datos.mat
IndiceEmpresas=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10];
InicioFecha=200; %fecha del calendario donde empieza la simulación, mayor que
uno
Dia=10; %días que dura la simulación
NumeroAcciones=50; %cantidad de acciones a comprar o vender como máximo en
una operación
PresupuestoInicial=input('Introduce el presupuesto inicial: ');

%Definición tamaño vectores y matrices
tam=length(IndiceEmpresas);
x=zeros(tam+2,1);
u=zeros(tam,Dia);
efectivo=zeros(1,Dia);
Presupuesto=zeros(1,Dia);

%Definición del estado inicial del vector x
x(tam+1)=PresupuestoInicial;
x(tam+2)=PresupuestoInicial;

for i=1:tam
    x(i)=input(['Introduce la cantidad de acciones de la empresa ',
num2str(IndiceEmpresas(i)), ': ']);
    x(tam+1)=x(tam+1)-x(i)*datos(IndiceEmpresas(i)).Valores(InicioFecha-1,1);
end

if x(tam+1)<0
    error(';El dinero en efectivo no puede ser negativo!');
else
    disp(['Tu efectivo inicial es de : ', num2str(x(tam+1)), ' €']);
end

%Presupuesto=size(Dia);
for i=0:Dia-1
    pause(1)
    NO_efectivo=0;
    for j=1:tam
        u(j,i+1)=sube_o_baja(InicioFecha+i,IndiceEmpresas(j),x(j),
NumeroAcciones, datos);
        if u(j,i+1)~=0
            while u(j,i+1)*datos(IndiceEmpresas(j)).Valores(InicioFecha+i,1)
> x(tam+1) && u(j,i+1)~=0
                u(j,i+1)=u(j,i+1)-1;

```

```

        end
        x(tam+1)=x(tam+1)-
u(j,i+1)*datos(IndiceEmpresas(j)).Valores(InicioFecha+i,1);
        x(j)=x(j)+u(j,i+1);
    end

NO_efectivo=NO_efectivo+(x(j))*datos(IndiceEmpresas(j)).Valores(InicioFecha+i
,1);
    end
    x(tam+2)=x(tam+1)+NO_efectivo;
    efectivo(i+1)=x(tam+1);
    disp(['Presupuesto: ', num2str(x(tam+2))]);
    Presupuesto(i+1)=x(end);
end
%Representación de gráficas
grafica(Presupuesto,PresupuestoInicial,IndiceEmpresas,InicioFecha,u,efectivo,
datos);

```

```

sube_o_baja.m
function res=sube_o_baja(Dia, IndiceEmpresa, acciones, n, datos)
if datos(IndiceEmpresa).Valores(Dia) > datos(IndiceEmpresa).Valores(Dia-1)
    res=n; %comprar n acciones
else
    if acciones >= n
        res=-n; %vender n acciones
    else
        res=-acciones; %vender las acciones restantes
    end
end
end

```

```

res_lineal.m
clear all; close all;
load datos.mat
IndiceEmpresas=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10];
InicioFecha=200; %fecha del calendario donde empieza la simulación, mayor que
Duracion
HorizontePred=5;
Dia=10; %días que dura la simulación
Duracion=5; %días pasados que se evalúan para conseguir el polinomio
PresupuestoInicial=input('Introduce el presupuesto inicial: ');

%Definición tamaño vectores y matrices
tam=length(IndiceEmpresas);
x=zeros(tam+2,1);
u=zeros(tam,Dia);
efectivo=zeros(1,Dia);
Presupuesto=zeros(1,Dia);
res=zeros(tam,HorizontePred);

%Definición del estado inicial del vector x
x(tam+1)=PresupuestoInicial;
x(tam+2)=PresupuestoInicial;

for i=1:tam
    x(i)=input(['Introduce la cantidad de acciones de la empresa ',
num2str(IndiceEmpresas(i)), ': ']);
    x(tam+1)=x(tam+1)-x(i)*datos(IndiceEmpresas(i)).Valores(InicioFecha-1,1);
end

```

```

if x(tam+1)<0
    error('El dinero en efectivo no puede ser negativo!');
else
    disp(['Tu efectivo inicial es de : ', num2str(x(tam+1)), ' €']);
end

for i=0:Dia-1
    for k=1:tam

res(k,:)=lineal(IndiceEmpresas(k),InicioFecha+i,Duracion,HorizontePred,datos)
;
        end
        pause(0.5)
        U=ControlPredictivolineal(IndiceEmpresas,HorizontePred,x,res);
        display(U);
        NO_efectivo=0;
        %Venta de acciones
        for j=1:tam
            if U(j)<=0
                u(j,i+1)=round(U(j));
                x(tam+1)=x(tam+1)-
(u(j,i+1))*datos(IndiceEmpresas(j)).Valores(InicioFecha+i,1);
                x(j)=x(j)+u(j,i+1);

NO_efectivo=NO_efectivo+(x(j))*datos(IndiceEmpresas(j)).Valores(InicioFecha+i
,1);
            end
        end
        %Compra de acciones
        for j=1:tam
            if U(j)>0
                u(j,i+1)=round(U(j));
                while u(j,i+1)*datos(IndiceEmpresas(j)).Valores(InicioFecha+i,1)
> x(tam+1) && u(j,i+1)~=0
                    u(j,i+1)=u(j,i+1)-1;
                end
                x(tam+1)=x(tam+1)-
(u(j,i+1))*datos(IndiceEmpresas(j)).Valores(InicioFecha+i,1);
                x(j)=x(j)+u(j,i+1);

NO_efectivo=NO_efectivo+(x(j))*datos(IndiceEmpresas(j)).Valores(InicioFecha+i
,1);
            end
        end
        x(tam+2)=x(tam+1)+NO_efectivo;
        efectivo(i+1)=x(tam+1);
        disp(['Presupuesto: ', num2str(x(tam+2))]);
        Presupuesto(i+1)=x(end);
    end
    %Representación de gráficas
    grafica(Presupuesto,PresupuestoInicial,IndiceEmpresas,InicioFecha,u,efectivo,
datos)

```

lineal.m

```

function res=lineal(IndiceEmpresa, DiaInicio, Tiempo, HorizontePred, datos)
x=1:Tiempo;
y=zeros(Tiempo,1);
for i=Tiempo:-1:1
    y(i)= datos(IndiceEmpresa).Valores(DiaInicio+i-Tiempo,1);

```



```

end
x=x';
%M=[x,ones(size(x))];
%M=[x.^3, x.^2, x,ones(size(x))];
M=[x.^5, x.^4, x.^3, x.^2, x,ones(size(x))];
p=M\y;

z=@(x) polyval(p,x);

%Representación de la recta o polinomio de regresión
%figure
%hold on
%plot(x,y,'ro','markersize',4,'markerfacecolor','r')
%fplot(z,[x(1),x(end)])
%hold off

res=size(HorizontePred);
res(1)=datos(IndiceEmpresa).Valores(DiaInicio,1);
for i=2:HorizontePred
    res(i)=z(Tiempo+i-1);
end

```

ControlPredictivolineal.m

```

function [U,x]=ControlPredictivolineal(IndiceEmpresas, HorizontePred, x, res)
%Las entradas de esta función son un vector cuyos componentes serán los
índices de
%las empresas que queremos que participen en el control, el valor del
horizonte
%de predicción, el estado inicial x y la matriz que contiene los valores
%predichos de las acciones de las empresas estudiadas.
tam=length(IndiceEmpresas);

%%Definición matriz A
A(:, :, HorizontePred)=zeros(tam+2);
for k=1:HorizontePred
    A(:, :, k)=eye(tam+2);
end

cont_A=1; %contador de empresas
for ii=1:tam
    for k=1:HorizontePred
        A(end, cont_A, k)=res(ii, k);
    end
    cont_A=cont_A+1;
end
A(end, end-1, :)=1;
%display(A);

%Definición matriz B
B(:, :, HorizontePred)=zeros(tam+2, tam);
for k=1:HorizontePred
    B(1:tam, 1:tam, k)=eye(tam);
end

cont_B=1; %contador de empresas
for ii=1:tam
    for k=1:HorizontePred
        B(tam+1, cont_B, k)=-res(ii, k);
    end
end

```

```

    cont_B=cont_B+1;
end
%display(B);

%Definición matriz D
D=zeros(tam+2,tam,HorizontePred);
%display(D);

%Definición matriz Ax
Ax=-eye(tam+2);
%display(Ax);

%Definición matriz bx
bx=zeros(tam+2,1);
%display(bx);

%Definición matriz Au
Au=eye(tam);
Au(tam+1:2*tam,1:tam)=-eye(tam);
%display(Au);

%Definición matriz bu
bu=100*ones(2*tam,1);
%display(bu);

%Definición matriz Q
Q=zeros(1,tam+2);
Q(end,end)=-1;
%display(Q);

%Definición matriz R
R=zeros(1,tam);
%display(R);

%Definición matriz N
N=HorizontePred;
%display(N);

%Definición matriz W
W=zeros(tam*N,1);
%display(W);

U=basicmpcTVS(A, B, D, Ax, bx, Au, bu, Q, R, N, W, x);
%U=0;
end

```

grafica.m

```

function
grafica(Presupuesto,PresupuestoInicial,IndiceEmpresas,InicioFecha,u,efectivo,
datos)
tiempo=length(Presupuesto);
CantidadEmpresas=length(IndiceEmpresas);
margen=PresupuestoInicial/10;
t=1:tiempo;

valor_empresa=zeros(tiempo,1);
for i=1:CantidadEmpresas
    for j=t
        valor_empresa(j)=datos(IndiceEmpresas(i)).Valores(InicioFecha+j-1,1);
    end
end

```

```
    figure
    subplot(2,1,1)
    plot(t,valor_empresa)
    title(['Valores de las acciones de la empresa ',
datos(IndiceEmpresas(i)).Nombre])
    valor_min=min(valor_empresa);
    valor_max=max(valor_empresa);
    axis([1 tiempo valor_min valor_max])
    xlabel('Días')
    ylabel('Valor')

    subplot(2,1,2)
    bar(u(i,:))
    title('Compra/venta de acciones');
    axis([1 tiempo -100 100])
    xlabel('Días')
    ylabel('Cantidad de acciones')

end
figure
subplot(2,1,1)
plot([0,t],[PresupuestoInicial Presupuesto]);
axis([0 tiempo PresupuestoInicial-margen PresupuestoInicial+margen])
title('Variación temporal del presupuesto')
xlabel('Días')
ylabel('Presupuesto')
subplot(2,1,2)
plot([0,t],[PresupuestoInicial, efectivo])
title('Dinero en efectivo disponible')
axis([0 tiempo 0 max([1000 efectivo])])
xlabel('Días')
ylabel('Efectivo')
end
```


REFERENCIAS

- [1] Molleja Valle, Enrique. "Análisis de tendencias en Bolsa mediante algoritmos de clasificación".
- [2] Pérez Valls, Jesús. "HERRAMIENTA MATLAB PARA LA SELECCIÓN DE ENTRADAS Y PREDICCIÓN NEURONAL DE VALORES DE BOLSA".
- [3] Merino, María; Vadillo, Fernando. "Matemática Financiera con Matlab©". Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa.
- [4] <https://es.mathworks.com/products/finance.html>
- [5] Nieto Martín, Pablo. "Machine Learning Algorithms for Forex Markets".
- [6] Toledo, Francisco. "De la Posada "Ter Beurze" a Wall Street". <https://inbestia.com/analisis/de-la-posada-ter-beurze-a-wall-street>
- [7] Martín, Jesús. "Origen de la Bolsa de Valores". <https://www.estrategiasdeinversion.com/actualidad/noticias/bolsa-espana/origen-de-la-bolsa-de-valores-n-390863>
- [8] Gómez, Lidia. "Jueves Negro, el día que se derrumbó Wall Street y comenzó la Gran Depresión". <https://www.elmundo.es/la-aventura-de-la-historia/2014/10/24/544a1b0dca474142598b4579.html>
- [9] Calzada Díaz, Humberto. "El crack del 29, el inicio de La Gran Depresión". <https://www.rankia.mx/blog/como-comenzar-invertir-bolsa/3780764-crack-29-inicio-gran-depresion>
- [10] Antequera, William. "Historia y orígenes de la Bolsa". <https://www.rankia.com/blog/bolsa-desde-cero/3349076-historia-origenes-bolsa>
- [11] "Ibex 35". <https://www.bancosantander.es/es/diccionario-financiero/ibex-35>
- [12] "Normas técnicas para la composición y cálculo de los índices de sociedad de bolsas, S.A.". <https://web.archive.org/web/20140425064205/http://www.bolsamadrid.es/docs/Indices/Ibex/normdef.pdf>
- [13] "¿Qué es el Ibex 35?" <https://www.gedesco.es/blog/que-es-el-ibex-35/>
- [14] Calzada Díaz, Humberto. "¿Qué factores mueven la bolsa de valores?". <https://www.rankia.mx/blog/como-comenzar-invertir-bolsa/3127530-que-factores-mueven-bolsa-valores>
- [15] "Factores que influyen en las variaciones del mercado de valores". <https://salamancartvaldia.es/not/180160/factores-influyen-variaciones-mercado-valores/>
- [16] "Elementos que influyen en el mercado financiero". <https://institutoibt.com/blog/elementos-influyen-mercado-financiero/>
- [17] Autora: M^a de las Mercedes Pérez de la Parte. Directores: Eduardo Fernández Camacho y Oscar

Camacho Quintero. Tesis Doctoral: Control Predictivo con Modos Deslizantes. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Marzo de 2004.

[18] Eduardo F. Camacho and Carlos Bordons. "Model Predictive Control". Second Edition. Editorial Springer. 2007

[19] Maestre Torreblanca, José María. "Model Predictive Control" lowlevelMPC.pdf.

[20] Implementación de un Control Predictivo Basado en Modelo Aplicado a un Sistema de Control de Caudal de Agua Didáctico. Edwin H. Lopera y Diego A. Mejía. Rev. Tecno Lógicas No. 25, ISSN 0123-7799, Diciembre de 2010.

[21] https://es.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html

[22] <https://www.metatrader5.com/es/trading-platform>

[23] Autora: Ana Sánchez Amores. Tutor: José María Maestre Torreblanca. Trabajo Fin de Grado: Control Predictivo de Drone Comercial. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. 2018.

