

INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA
AL CONTROL DE CALIDAD EN LA
PRODUCCIÓN DE BILLETES

2023

BANCO DE **ESPAÑA**
Eurosistema

Documentos Ocasionales
N.º 2303

Adrián López González

**INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA AL CONTROL DE CALIDAD EN LA PRODUCCIÓN
DE BILLETES**

INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA AL CONTROL DE CALIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE BILLETES

Adrián López González

BANCO DE ESPAÑA

<https://doi.org/10.53479/29619>

Documentos Ocasionales. N.º 2303

Febrero 2023

La serie de Documentos Ocasionales tiene como objetivo la difusión de trabajos realizados en el Banco de España, en el ámbito de sus competencias, que se consideran de interés general.

Las opiniones y análisis que aparecen en la serie de Documentos Ocasionales son responsabilidad de los autores y, por tanto, no necesariamente coinciden con los del Banco de España o los del Eurosistema.

El Banco de España difunde sus informes más importantes y la mayoría de sus publicaciones a través de la red Internet en la dirección <http://www.bde.es>.

Se permite la reproducción para fines docentes o sin ánimo de lucro, siempre que se cite la fuente.

© BANCO DE ESPAÑA, Madrid, 2023

ISSN: 1696-2230 (edición electrónica)

Resumen

Este documento es una aproximación al trabajo realizado en la Unidad de Investigación y Desarrollo, del Departamento de Control de Producción de Billetes del Banco España, durante los últimos meses en materia de inteligencia artificial. La investigación y el desarrollo se han centrado en su aplicación al proceso de producción de billetes, y más concretamente al control de calidad de este.

Se exponen los términos más importantes ligados a la inteligencia artificial y a la gestión de la calidad en el mundo del billete. Finalmente, se detalla el esquema de un prototipo de sistema dual para el control de calidad.

Palabras clave: inteligencia artificial, billetes, investigación y desarrollo, producción, calidad, control de calidad.

Códigos JEL: O43, O44, O32, O33.

Abstract

This paper presents the work carried out in the Research and Development Unit of the Banco de España's Banknote Production Control Department over the last few months in the field of artificial intelligence (AI). Research and development have focused on the application of AI to the banknote production process, specifically to banknote quality control.

The most important terms related to artificial intelligence and quality management in the world of banknotes are explained. The paper concludes by outlining a prototype of a dual quality control system.

Keywords: artificial intelligence, banknotes, R&D, production, quality, quality control.

JEL classification: O43, O44, O32, O33.

Índice

Resumen 5

Abstract 6

1 Introducción 9

2 Calidad 4.0 12

3 Inteligencia artificial 14

3.1 Definición 14

3.2 *Machine Learning* 15

3.3 Redes neuronales artificiales 15

3.4 *Deep Learning* 17

3.5 *Big Data* 17

4 Control de calidad en la impresión de billetes 19

4.1 Control de calidad mediante atributos 19

4.2 Control de calidad mediante variables 20

4.3 Control mediante análisis de imágenes 21

4.4 Control mediante visión artificial 22

5 Minería de datos de la producción de billetes 23

5.1 Métodos de extracción 23

5.1.1 Imágenes hiperespectrales 23

5.1.2 Escáneres *push broom* 24

5.1.3 Sensores 24

5.1.4 Otros métodos 25

5.2 Tratamiento 25

5.2.1 Análisis por componentes principales (PCA) 26

5.2.2 Análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) 26

5.3 Interpretación 26

6 Aplicación de la inteligencia artificial 29

6.1 Documentos técnicos de referencia digitales 29

6.2 Análisis predictivo como control de calidad 30

6.3 *Blockchain* y creación de librerías virtuales independientes 31

7 Prototipo de control de calidad modular novedoso 33

7.1 Fundamentos 33

7.2 Rutinas de operación 35

7.3 Sistema VAS 35

7.4 Sistema HAIS 36

7.5 Sistema completo 37

8 Conclusiones 38

Bibliografía 39

Índice de ilustraciones 40

Anejo 1 Estudio sobre la implantación de la inteligencia artificial 41

Anejo 2 Métodos estadísticos PCA y PLS-DA 44

1 Introducción

Las innovaciones tecnológicas han marcado históricamente el devenir y los modelos productivos de la industria. Desde las primeras granjas y gremios hasta la actualidad, los diferentes cambios que han ido acaeciendo en torno a la producción han sido a causa de la aparición de novedosas tecnologías o sistemas de fabricación. Estos han conllevado una mejora significativa en los aspectos ligados a la producción y se han considerado una revolución.

Se tienen en cuenta cuatro etapas o revoluciones industriales principales en la historia, todas ellas marcadas por un hecho o innovación que supuso un cambio total con respecto al momento anterior. Esto, asimismo, ha provocado el nacimiento de nuevas oportunidades y el fin de algunas labores existentes hasta ese momento.

La primera revolución industrial estuvo marcada por la invención de la máquina de vapor y por el traslado y la concentración de las unidades productivas en las grandes ciudades, centralizando la industria¹.

La segunda revolución industrial fue provocada por la posibilidad de producir electricidad en cantidades industriales y la resolución del problema del transporte, que originó modelos de producción como el fordismo y el taylorismo².

La tercera revolución industrial fue debida a la aparición de las primeras computadoras, que dieron lugar a los primeros ordenadores. Necesitó mejorar la velocidad de transmisión de la información a fin de conectar a las personas de diferentes partes del mundo, lo que se consiguió con el nacimiento de Internet. Este hecho cambió la forma de relacionarse mundialmente y permitió la deslocalización y la globalización de la producción³.

Finalmente, nos encontramos envueltos en los primeros pasos de la cuarta revolución industrial. En este caso, el avance de la conectividad, la mejora en la computación y en la tecnología ligada a ella han ocasionado un gran crecimiento en todos los sectores periféricos. Como consecuencia, ha surgido un nuevo término: «Industria 4.0». Este engloba la nueva forma de entender la producción, basada en las últimas innovaciones tecnológicas y en un elevado grado de automatización. Entre estas destaca la inteligencia artificial (IA), como abanderada del cambio gracias a la creciente capacidad de recopilación de datos mediante sensores y a la mejora de la conectividad⁴ (como con el nacimiento del 5G).

El mundo del billete constituye un sector único y, por tanto, ha de ser tratado de una manera diferente al resto de los sectores en la mayoría de los aspectos, pero no por ello puede permanecer ajeno a los diferentes cambios producidos en el resto de la industria.

¹ Lucas (2003).

² Bilbao y Lanza (2021).

³ Rifkin (2011).

⁴ Blanco, Fontrodona y Poveda (2017).

En el Eurosistema, la producción de billetes está regulada por el Banco Central Europeo (BCE) y es delegada en los diferentes bancos centrales nacionales de cada Estado miembro, a los que se les otorga anualmente una cuota. Los bancos centrales nacionales pueden optar por dos formas de abastecerse de esa cuota: produciéndolos en sus imprentas *in-house* (públicas) o licitando a imprentas privadas o públicas⁵.

El billete constituye uno de los productos más importantes para el desarrollo de la actividad económica de los Estados, no solo como método de pago, sino también como depósito de valor de muchas entidades empresariales y usuarios. Es reseñable que, a pesar del surgimiento en los últimos años de nuevas formas de pago y de figuras monetarias como las criptomonedas, la producción de billetes en el Eurosistema ha aumentado.

Poniendo como ejemplo a España, desde la etapa anterior a su incorporación como Estado miembro de la Unión Europea hasta la actualidad, la producción de billetes ha sufrido innumerables cambios según puede apreciarse en las imágenes adjuntas, donde se muestran un billete 1.000 pesetas emitido por el Banco de España y uno de 50 euros de la serie 2 (última emitida por el BCE).



1 Billete de 1.000 pesetas, de 1936. Fuente: Banco de España.



2 Billete de 50 euros de la serie 2. Fuente: Banco Central Europeo.

El billete es un producto tecnológicamente muy avanzado, a pesar de lo que a primera vista para el público general pudiera parecer⁶. Cuenta con una gran variedad de medidas de seguridad de diferente naturaleza, que le confieren una gran protección frente a falsificaciones. Esto ha afectado a su diseño, cada vez más complejo y por tanto solicitante de mejores técnicas de impresión. Además, el billete ha de hacerse atractivo al público, por lo que requiere ser actualizado a los gustos populares cada cierto tiempo.

Los controles de calidad en la producción también han sufrido cambios, y se han introducido algunas de las innovaciones que el mercado iba ofreciendo, a fin de mejorar cada vez más la eficiencia en la producción de cara también a ofrecer al usuario un mejor producto. Algunas de estas innovaciones son la mejora en la conectividad dentro del proceso o la inclusión al final del proceso de selectoras, que, mediante visión artificial y comparación de patrones, son capaces de detectar los billetes defectuosos. Esto se complementa actualmente con un control de calidad por el operario de algunos pliegos de control.

⁵ Banco de España (2023).

⁶ Banco Central Europeo (2023).

Como se ha expuesto, el avance tecnológico no puede pararse y el mundo del billete ha de entrar de lleno en la Industria 4.0, no solo de cara a la actualización de su producto, sino también haciendo uso de las innovaciones para su propio beneficio de cara a una mejora en la eficiencia. Por ello, se ha de estudiar la manera en la que poder hacer uso de una herramienta como la IA para la mejora de la producción.

Este documento ofrece una aproximación al trabajo realizado en los últimos meses por el Banco de España en relación con la Industria 4.0, y más concretamente en IA, con el objetivo de una aplicación práctica en el control de calidad de la producción de billetes en Imprenta de Billetes, SA, Medio Propio del Banco de España (IMBISA).

La estructura de este documento es la siguiente: tras esta introducción, la segunda sección explica con una mayor concreción el concepto de Calidad 4.0 y sus implicaciones; la tercera sección presenta la IA y los distintos conceptos asociados a ella; la cuarta sección hace un recorrido por el control de calidad en la producción de billetes actual; la quinta sección está dedicada a la minería de datos en la producción de billetes que haga posible la aplicación de la IA; la sexta sección esboza las diferentes aplicaciones que tendría la IA con los datos antes extraídos y tratados; la séptima sección expone un prototipo de control de calidad novedoso, en el que se emplearía la IA combinada con la visión artificial en un sistema totalmente modular; la octava sección resume las principales conclusiones. Tras esto, se han incorporado dos anejos, que extienden la explicación de algunos conceptos. Se ofrece también un apartado en este documento que recoge las diferentes referencias bibliográficas que se han consultado para su elaboración.

2 Calidad 4.0

Las dos primeras revoluciones industriales no llevaron asociado ningún concepto específico en cuanto a calidad se refiere. Esta cualidad se le confería al producto de manera implícita y no al proceso. Es decir, la calidad se juzgaba en función de la habilidad del fabricante o del artesano.

El concepto de inspección como tal nace en el siglo XX y con él el de control de calidad. Surge la figura de una persona cualificada que verificaba y valoraba el trabajo del operario o trabajador⁷.

Hasta la llegada de la tercera revolución industrial no aparecen los términos de gestión y aseguramiento de la calidad, tomando así consciencia de su relevancia en la producción y en el ahorro de costes. Esto es provocado por el empuje de la automatización gracias a la computación y a la mejor conectividad.

Estos conceptos se han ido adaptando, mejorando y desarrollando para hacerlos cada vez más eficientes. Han surgido filosofías de producción con un enfoque total en la calidad del producto durante la fabricación, como la *Lean Manufacturing*. Esta se centra en optimizar la producción de tal manera que los errores se detecten lo antes posible, permitiendo así una actuación inmediata. El objetivo es que ningún producto defectuoso pase a la fase siguiente de elaboración.

El concepto de Calidad 4.0 es enunciado por primera vez en 2017 por la empresa LNS Research⁸, y en él se engloban los diferentes aspectos en los que las tecnologías facilitadoras de la Industria 4.0 pueden mejorar los sistemas de gestión de calidad.

El punto inicial de aplicación de la Calidad 4.0 está en el empleo de técnicas tradicionales y en adherir a ellas progresivamente diferentes novedades tecnológicas que supongan mejoras relevantes.

Las primeras herramientas que se habrían de implementar serían: la mejora en la conectividad, el análisis de datos, la IA y la automatización. La mejora de la aplicación de la Calidad 4.0 se desarrolla en 10 ejes, que se pueden observar en la ilustración 3.

Como resumen de algunos de estos ejes y de su implicación en la mejora de la gestión de la calidad, merece la pena destacar que:

- El *Edge Computing* y las redes *IoT* (*Internet of Things* - Internet de las cosas) proporcionan un mayor volumen de datos fiables para su análisis.

⁷ Rodríguez y Rodríguez (2009).

⁸ LNS Research (2023).



3 Gráfica solar de los ejes de la Calidad 4.0. Fuente: Elaboración propia.

- El análisis de los datos permite tomar decisiones de acuerdo con ellos con mayor precisión y elaborar modelos que favorezcan la predicción de eventos y la previsión en la producción.
- El 5G y otras mejoras de la conectividad favorecen la velocidad en el intercambio de información dentro y fuera del entorno.
- La colaboración y la conformidad entre los diferentes agentes ligados a la producción se consiguen mediante la intranet y la gestión documental, y se combinan con redes *blockchain* que consolidan la seguridad del intercambio de información.
- La promoción de la cultura de la calidad a todos los estamentos de la empresa o entidad es clave para asegurar un cumplimiento por parte de todos los eslabones que intervienen en la cadena.

La mejora de la calidad en una producción es un proceso de mejora continua que requiere una inversión, y, por ende, se han de priorizar aquellos aspectos que supongan una mayor mejoría para el caso planteado.

3 Inteligencia artificial

3.1 Definición

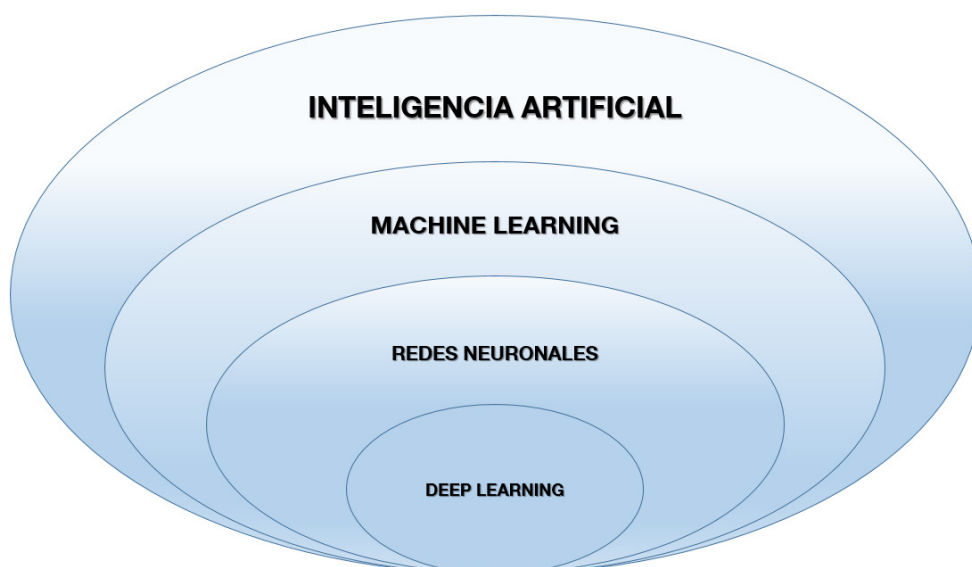
En 1950 se formula por primera vez el concepto de IA, con el objetivo de darle nombre al uso de computadoras para, mediante algoritmos inteligentes, imitar las funciones cognitivas inherentes al ser humano. Estos algoritmos son capaces de tratar datos y de analizarlos, para convertirlos en información relevante.

La definición que la Universidad de Stanford realiza en su estudio AI100⁹ sobre IA es:

«la inteligencia artificial es esa actividad dedicada a hacer que las máquinas sean inteligentes, y la inteligencia es esa cualidad que permite a una entidad funcionar de manera adecuada y prospectiva dentro de su entorno.»

Trasciende de esta definición que la IA resulta una herramienta con un gran potencial para revolucionar, a nivel global, los procesos en una organización. Una buena implementación de esta provoca la liberación de funciones tediosas, para centrar la atención en aquellas con mayor valor, como el diseño de estrategias o la planificación de capacidades.

Dentro de la IA hay múltiples variantes de computación. El presente documento centra la atención en las relevantes para el cometido de este: la mejora de la gestión del control de calidad. Por ello, se hablará de *Machine Learning*, redes neuronales artificiales y, por último, *Deep Learning*.



4 Esquema de composición de los conceptos ligados a la inteligencia artificial. Fuente: Elaboración propia.

9 Universidad de Stanford (2021).

En 2021, el Instituto de Ingeniería de España realizó un informe sobre la implantación de la IA en el país¹⁰. Las conclusiones extraídas de ese informe son:

- La IA se considera poco implantada en las empresas y entidades que producen bienes y servicios, aunque los ingenieros que trabajan en los puestos de responsabilidad y los directivos sí la emplean con mayor frecuencia.
- Las empresas que trabajan con IA infrutilizan los medios de los que disponen para ello, pero la mayoría ve un alto potencial de mejora por parte de sus trabajadores.
- La experiencia en IA de los ingenieros españoles es escasa. Sin embargo, se aprecia un potencial de formación muy optimista por parte de estos.
- Un grupo mayoritario de ingenieros españoles ve un alto impacto de la IA en el futuro, mientras que el resto ve un impacto moderado.

Las conclusiones pormenorizadas y expuestas mediante gráficas en este informe se detallan en el anejo 1.

En resumen, la IA tiene un camino que recorrer para su implantación en España. No obstante, su gran potencial de crecimiento y su alto impacto la colocan en un lugar protagonista de cara al desarrollo industrial de los próximos años¹¹.

3.2 *Machine Learning*

El *Machine Learning* o aprendizaje automático puede definirse como una herramienta perteneciente a la IA cuyo objetivo es dotar a las computadoras de una capacidad de aprendizaje semejante a la de las personas¹².

Además, el algoritmo que rige el *Machine Learning* ha de tener la capacidad de automodificarse en función de los datos que analiza, y puede finalmente resolver un problema computacional de manera autónoma. Este puede consistir en encontrar patrones ocultos o ejecutar tareas complejas.

3.3 *Redes neuronales artificiales*

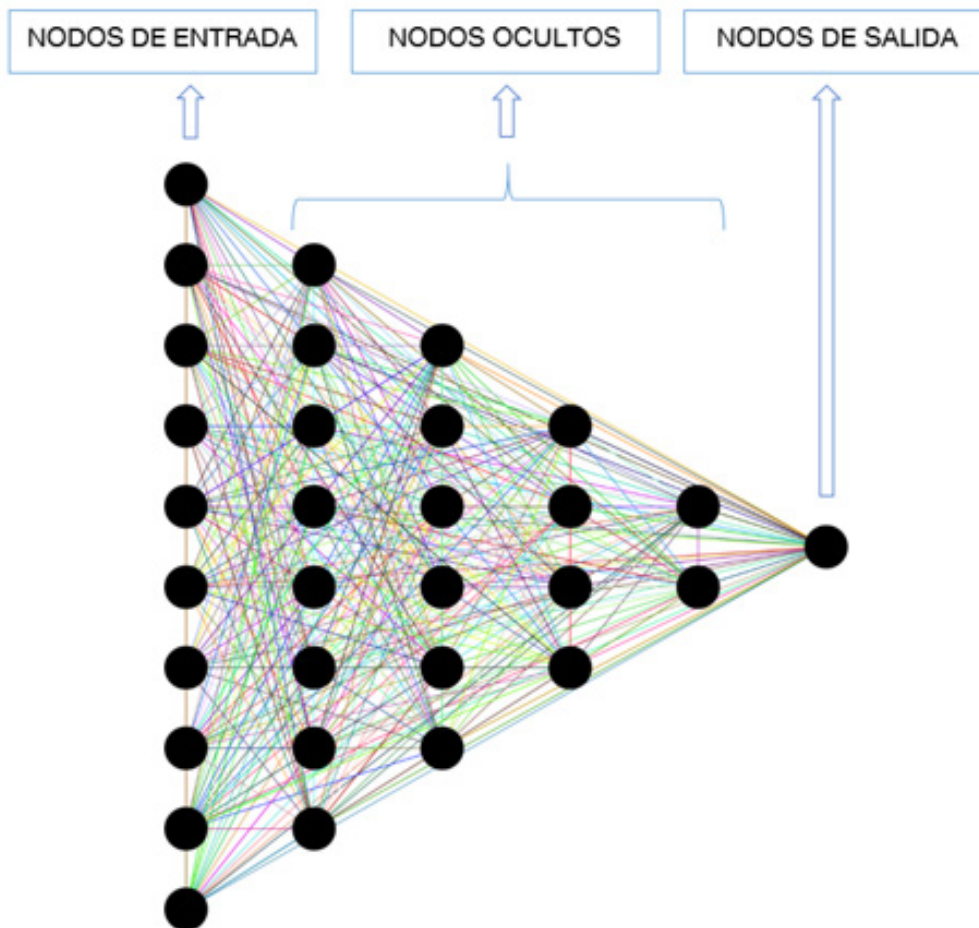
Las redes neuronales artificiales pretenden simular el funcionamiento del cerebro humano mediante modelos computacionales. Es decir, imitan el proceso que hacen las neuronas.

Están compuestas por nodos, que reciben, transmiten y envían la información. El objetivo es lograr un elevado grado de aprendizaje y de pensamiento por parte de la máquina.

¹⁰ Instituto de Ingeniería de España (2021).

¹¹ Comisión Europea (2018).

¹² Berkman (2017).



5 Esquema de composición de una red neuronal artificial. Fuentes: Imagen libre y elaboración propia.

Los nodos se clasifican en tres grupos:

- Nodos de entrada.
- Nodos de salida.
- Nodos ocultos.

Los nodos ocultos son los intermediarios de la cadena de transmisión. A mayor número de nodos ocultos, mayor es la profundidad de la red. Estos se clasifican en capas conocidas como «capas de aprendizaje», por lo que una mayor cantidad de capas conlleva una mayor capacidad de aprendizaje.

El proceso de aprendizaje consiste en la recepción de datos por parte de los nodos de entrada; estos los envían hacia el interior de la red, donde se ubican los nodos ocultos, que procesan, modifican y transfieren la información de una capa a otra.

3.4 *Deep Learning*

Al entrenar las redes neuronales, por cada iteración se van creando, modificando o eliminando conexiones entre los nodos para dar respuestas lo más certeras posible ante los problemas planteados. El concepto de *Deep Learning* se origina debido a esas secuencias y profundidad de aprendizaje.

Se puede decir que es un subcampo dentro de las redes neuronales artificiales, que entra en funcionamiento cuando dichas redes poseen gran cantidad de capas de nodos.

Al contar con un nivel de profundidad, el sistema es capaz de acometer problemas cada vez más complejos. El *Deep Learning* ayuda a que las computadoras comprendan simbolismos y contextos completos y dinámicos, y pueden ser capaces de predecir tendencias, fenómenos o circunstancias, e incluso de aprender de manera autónoma.

Las aplicaciones más comunes del *Deep Learning* se desarrollan en:

- Visión artificial.
- Análisis predictivo.
- Asistentes virtuales.
- *Chatbots*.
- Robótica.
- Salud.
- Entretenimiento.

3.5 *Big Data*

El *Big Data* son grandes cantidades de datos digitales imposibles de tratar mediante métodos computacionales tradicionales y requieren de sistemas específicos. El *Big Data* tiene cinco características principales, también denominadas las «5 V del *Big Data*»:

- Volumen.
- Velocidad.
- Variedad.
- Veracidad.
- Valor.



6 Imagen que ilustra la transformación que conlleva la inteligencia artificial en su objetivo de asemejarse a la mente humana.
Fuente: Imagen libre.

4 Control de calidad en la impresión de billetes

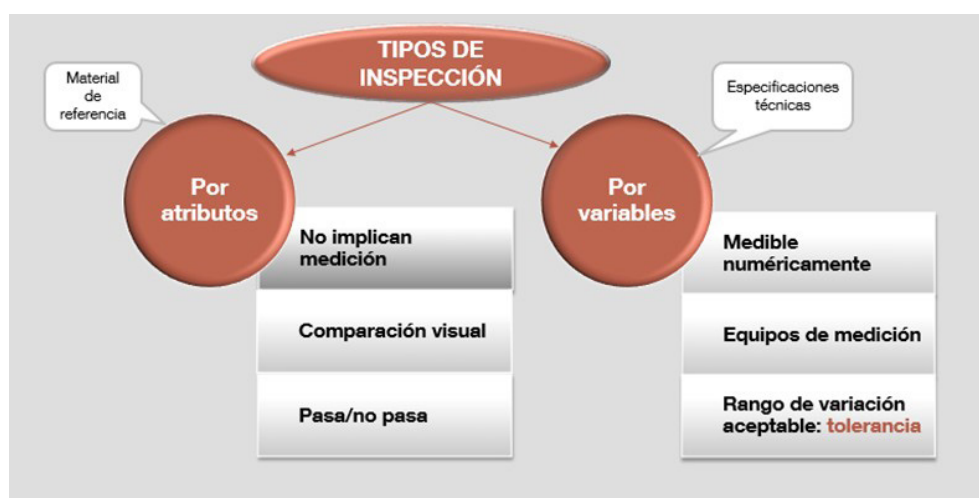
El control de calidad sobre los billetes nuevos se puede dividir en dos fases:

- Control durante la fabricación.
- Control de recepción del billete acabado.

El control en curso es realizado por IMBISA, que es la imprenta de billetes, y se efectúa durante todo el proceso de fabricación. Tiene por objeto controlar el desarrollo del proceso, a fin de mantenerlo bajo control y recoger información para mejorarlo.

El control de recepción lo realiza el Banco de España, en colaboración con IMBISA, y tiene por objeto comprobar que se verifican las especificaciones técnicas establecidas por el Banco Central Europeo¹³. Esto se muestra en la ilustración 7.

La puesta en práctica del control de calidad de recepción se realiza aplicando planes de muestreo por atributos o características cualitativas del billete, como entonación, repintado, manchas, aspecto de la marca de agua, etc. Y planes de muestreo por variables o características medibles del billete, como longitud, anchura, ajuste entre la impresión litográfica y la calcografía, ajuste entre la impresión del anverso y la del reverso, etc.



7 Esquema de la inspección de billetes por parte de Banco de España. Fuente: Banco de España.

4.1 Control de calidad mediante atributos

La inspección por atributos consiste en examinar, mediante características cualitativas, una muestra aleatoriamente del lote que se ha de validar, y en comparar el número de defectos hallados en la muestra con el número de defectos admitidos por el plan de muestreo y decidir si se acepta o se rechaza el lote.

¹³ Martínez (1997).

Para ello se lleva a cabo un control adaptado al mundo del billete, basado en la norma ISO 2859¹⁴, que especifica los diferentes conceptos ligados al control de calidad por muestreo.

En el punto 3.1.5 de la norma ISO 2859-1 se definen las situaciones de incumplimiento de los requerimientos.

En algunas situaciones, los requisitos especificados coinciden con los requisitos de uso del cliente. En otras, pueden no coincidir, siendo más o menos estrictos, o la relación exacta entre ambos no se conoce o no se entiende del todo.

La no conformidad se clasificará generalmente, según su grado de gravedad, como:

- Clase A: aquellas no conformidades de un tipo consideradas como de máxima preocupación; en el muestreo de aceptación, a estos tipos de no conformidades se les asignará un valor límite de calidad de aceptación muy pequeño.
- Clase B: aquellas no conformidades de un tipo que se considera que tienen el siguiente grado de preocupación; por lo tanto, a estas se les puede asignar un valor límite de calidad de aceptación mayor que las de la clase A y menor que las de la clase C, si existe una tercera clase, etc.

Además, en la norma ISO 2859-3¹⁵ se detalla el proceso de inspección de muestreo por lotes de omisión, que también se ha adaptado para el control de calidad de producción de billetes. De manera que, siguiendo la norma, al inicio de la producción se llevará a cabo un control lote a lote y, en función de la calidad de este, se irá aumentando el número de lotes sin necesidad de inspeccionar, según los resultados de los inspeccionados.

4.2 Control de calidad mediante variables

La inspección por variables se aplica a características de calidad cuantitativa, es decir, aquellas que se pueden medir en una escala continua (por ejemplo, la longitud del billete, el desajuste de las impresiones calcográfica y litográfica, etc.). Tiene por objeto comprobar para cada variable que el resultado de la muestra tomada del lote que se ha de inspeccionar está dentro de los límites de tolerancia admitidos.

Los procedimientos de muestreo por variables tienen dos desventajas con respecto a los procedimientos por atributos: la primera es que debe emplearse un plan de muestreo independiente para cada variable; y la segunda, que la distribución de la variable ha de tener una forma específica.

¹⁴ Organización Internacional de Normalización (1999).

¹⁵ Organización Internacional de Normalización (2005).

A continuación, en la ilustración 8 se muestra el control de una de las muchas variables del billete, como el posicionamiento de sus elementos.



8 Ejemplo de control por variables relacionado con la posición de un elemento en un billete de 50 euros de la serie 2. Fuente: Imagen propia.

4.3 Control mediante análisis de imágenes

Entrando de lleno en el actual control de calidad realizado en la producción de billetes, este mezcla técnicas tradicionales con algunas innovaciones tecnológicas para una mejor eficiencia. La parte tradicional se ve representada por la extracción de pliegos de muestreo y de control para su posterior inspección por un operario. Este realiza de manera visual el control por atributos y por variables, y basa su trabajo en las especificaciones técnicas aprobadas y en las referencias impresas.

La ilustración 9 trata de mostrar la inspección visual que se realiza a los billetes durante su producción.



9 Imagen que ilustra el control visual realizado en la producción de billetes de euro. Fuente: Imagen propia.

El complemento tecnológico de este proceso se sitúa al final de la producción, donde los billetes ya cortados pasan por selectoras que llevan a cabo un análisis por atributos y por variables mediante visión artificial. El objetivo es descartar, en función de variables prediseñadas y a gran velocidad, aquellos billetes considerados defectuosos.

4.4 Control mediante visión artificial

Las selectoras situadas al final de proceso de producción hacen uso de la visión artificial en la clasificación de los atributos para realizar un buen control de los defectos que aparecen en los billetes.

Según la Asociación de Imágenes Automatizadas (AIA)¹⁶, el término «visión artificial» incluye todas las aplicaciones industriales y no industriales donde una combinación de *hardware* y *software* brinda una guía operativa a dispositivos en la ejecución de sus funciones según la captura y el procesamiento de imágenes.

Por eso, pese a su empleo actualmente en la gestión de la calidad de los billetes, surge la necesidad de optimizarlo de cara a ampliar su uso a más puntos del proceso que posibiliten un adelantamiento de la actuación en caso de error. El objeto sería emplear la visión artificial como ayuda al operario en los procesos de control de calidad, lo que permite un control más preciso y exhaustivo del pliego impreso.

Esta conclusión va en consonancia con las medidas de producción más extendidas en la industria en general, como las ligadas a la filosofía del *Lean Manufacturing*. Esto permite abordar uno de los objetivos del Banco de España y de IMBISA: la reducción del perdido.

¹⁶ Automated Imaging Association (AIA) es el grupo comercial de visión artificial más grande del mundo. Tiene más de 350 miembros de 32 países, incluidos integradores de sistemas, fabricantes de cámaras, iluminación y otros componentes de visión, proveedores de *software* de visión, *OEM* (*Original Equipment Manufacturer* – fabricante original del equipo) y distribuidores. La sede de la asociación se encuentra en Ann Arbor, Michigan. Un ejemplo de empresa miembro de AIA sería Sony®.

5 Minería de datos de la producción de billetes

La posible implementación de procesos donde la IA adquiere relevancia conlleva la necesidad de obtener datos, y que estos sean fiables y precisos. Para ello se ha de reconsiderar el modelo de control de calidad con el fin de encontrar la manera de introducir formas de extraer esos datos, tratarlos e interpretarlos.

En este punto se expondrán algunos métodos para la extracción de estos datos de forma precisa y fiable, el tratamiento del gran volumen de datos extraídos mediante métodos estadísticos avanzados, y la interpretación de estos datos de manera teórica, previo empleo de IA.

5.1 Métodos de extracción

Uno de los grandes inconvenientes a los que se enfrenta la IA a la hora de abrirse paso en el mundo del billete es la falta de datos relevantes extraídos de la producción, dada la complejidad del producto y del proceso. Por ello, se ha de buscar la manera de incorporar diferentes elementos tecnológicos capaces de extraer todo tipo de datos.

A continuación se exponen los métodos más efectivos para ese cometido, valorados para la realización de este documento.

5.1.1 Imágenes hiperespectrales

La tecnología de imágenes hiperespectrales combina la visión por ordenador tradicional y la espectroscopia, y permite medir simultáneamente la variación espacial y espectral de una muestra¹⁷. Esta variación espectral es producto de la interacción con la radiación de la materia, para cientos de longitudes de ondas y puntos de muestreo simultáneamente, y puede ser cuantificada por reflectancia, que es definida como el porcentaje de radiación reflejada por una muestra en relación con la total que incide en ella¹⁸.

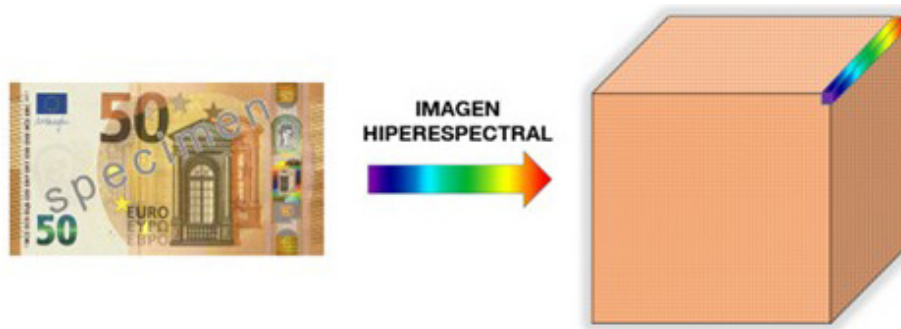
La tecnología de imágenes hiperespectrales permite adquirir imágenes digitales con una gran cantidad de canales espectrales muy cercanos entre sí, incluidas algunas regiones no detectables por el ojo humano, como el ultravioleta (UV), el infrarrojo cercano (NIR) o el lejano (FIR), obteniendo para cada píxel una firma espectral única de cada material e imposibilitando que distintos materiales generen la misma respuesta, pese a su posible semejanza¹⁹.

La información extraída de la imagen hiperespectral se organiza en una matriz tridimensional, donde se registran la situación espacial (x_i, y_i) y las intensidades de respuesta

¹⁷ Dai (2014), ElMasry, Sun y Allen (2013).

¹⁸ Fernandes (2013), Qin (2013).

¹⁹ Cho (2013).



10 Construcción del hipercono a partir de un billete de 50 euros de la serie 2. Fuente: Elaboración propia.

a determinadas longitudes de onda en un vector asociado a esa situación espacial; es decir, a cada punto espacial de la imagen hacemos corresponder un vector de intensidades de respuesta a las diferentes longitudes de onda. Esta matriz es conocida como *HyperCube* o «hipercubo».

Los datos almacenados en un hipercono pueden rondar en cuantía el orden de decenas de millones, dados el volumen de longitudes de onda y los puntos de muestreo que se pueden registrar. Además, estos datos son en muchos casos redundantes y cuentan con una correlación muy elevada, por lo que serán necesarios elementos de regresión que faciliten su tratamiento, como se expondrá más adelante.

Una de las ventajas de este método es que la captura de imágenes se realiza sin contacto, mediante las denominadas «cámaras hiperespectrales». La sensibilidad de la tinta de la impresión de billetes ante esfuerzos de fricción o arrastre cuando no ha secado completamente puede ser un condicionante para algunas tecnologías.

5.1.2 Escáneres *push-broom*

Los escáneres *push-broom* o de escoba son empleados para la detección espectrométrica de imágenes a lo largo de una línea. Están altamente implementados en diferentes campos de la industria. Muchos de ellos, ligados a su uso en satélites, se encargan de la captura multiespectral de una variedad de objetos y relieves.

Su uso para el mundo del billete se ha descartado prácticamente, debido a su peor rendimiento en comparación con las imágenes hiperespectrales.

5.1.3 Sensores

La obtención de datos no es algo que concierna solamente al pliego impreso. Hay multitud de variables que intervienen en una buena producción del billete y que han de ser medidas e incorporadas para un correcto análisis de la producción.

Todo ello se enmarca en el desarrollo del Internet de las cosas o *IoT*, filosofía tecnológica que busca, entre otras cosas, la conectividad de todos los procesos y elementos de la producción, gracias al desarrollo de tecnología como el 5G y a la aparición de sensores capaces de medir casi cualquier cosa.



11 Imagen que ilustra la amplitud de campos que comprende el Internet de las cosas o IoT. Fuente: Imagen libre.

5.1.4 Otros métodos

Además de lo expuesto, gracias al avance de la Industria 4.0 surgen cada día novedosas tecnologías que son capaces de extraer nuevos datos de los elementos y que son útiles para el desarrollo de cualquier solución ligada a la IA. Por ello, el sistema de captura y tratamiento de datos ha de tener laxitud suficiente para adaptarse a estas innovaciones.

5.2 Tratamiento

Una de las dificultades comentadas relativas a la aplicación de la IA es el volumen de datos que se han de tratar que nos aporta una imagen hiperespectral. Es obvio que tratar con estos datos, y comparar de manera directa, conlleva un coste computacional alto. En la actualidad, existen diversos métodos de análisis y de comparación de datos que reducen este tiempo.

La idea general sería transformar la matriz del hipercubo de manera que, mediante la relación de los datos aportados, se reduzca la dimensión de esta.

Para ello se han abordado dos métodos esenciales derivados de los estudios planteados por la Universidad de Indonesia²⁰ y por la Universidad de Puerto Rico^{21,22} (Estados Unidos) — que publicó un estudio sobre la comparación de los métodos planteados—.

Los dos métodos principales de comparación y de simplificación de datos propuestos, que forman parte de la base del *Machine Learning*, son: el análisis por componentes principales (*Principal Component Analysis*, PCA) y el análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (*Partial Least Squares-Discriminant Analysis*, PLS-DA). A continuación se detallan brevemente, pero se desarrollan con mayor detalle en el anejo 2.

²⁰ Rahayu (2017).

²¹ Vega-Vilca y Guzmán (2011).

²² Vega-Vilca (2004).

5.2.1 Análisis por componentes principales (PCA)

El análisis por componentes principales, como su nombre indica, consiste en encontrar los elementos principales o que mejor explican la relación entre los elementos (x_i, y_i) y el vector de longitudes de onda asociado.

Esto permite analizar solo los aspectos más importantes de los datos con una efectividad muy alta, y posibilita la comparación de los datos sin un coste computacional excesivo.

5.2.2 Análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA)

El análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales es un método algo más novedoso, con mucho desarrollo aún por delante. Sin embargo, sus excelentes resultados han provocado que su aplicación en los últimos años se extienda como sustituto de muchos de los métodos anteriormente empleados.

En estudios comparativos de los dos métodos expuestos se ha hallado que el PLS-DA resulta más eficiente para el trabajo requerido. Aun así, debido a la novedad de este y a un mayor coste operacional, el método de PCA está más extendido en los diferentes programas empleados en el tratamiento de datos a través de distintos *apps* y *plug-ins* previamente programados y definidos.

5.3 Interpretación

Una vez tratados los datos, estos requieren una interpretación. Algunos de los principales *softwares* dedicados al trabajo con grandes volúmenes de datos ya incluyen en su catálogo funciones y *plug-ins* para la interpretación de los resultados de imágenes hiperespectrales y su composición.

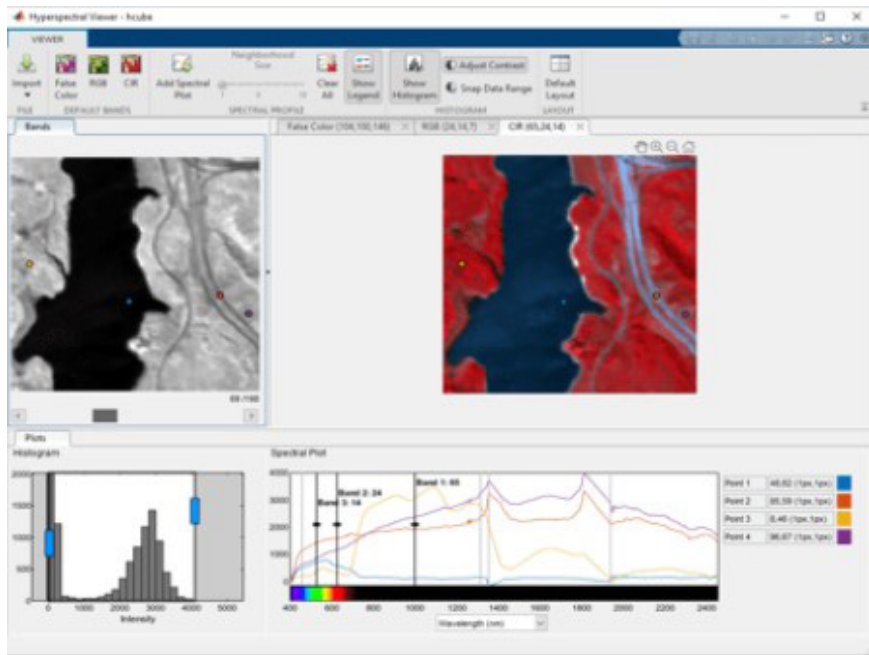
Sin embargo, el diseño de un sistema completo requiere añadir el resto de los elementos de detección para un análisis y entrenamiento de la máquina óptimos.

Como ejemplo, se muestra la versión 2021a del *software* MATLAB®²³, desarrollado por MathWorks, que ofrece la opción de realizar ambas operaciones según las matrices que quedan definidas. A continuación se muestran las interfaces de las *apps* embebidas en el programa y que permiten realizar tanto el análisis de los datos obtenidos como el entrenamiento de la máquina de cara al empleo de IA.

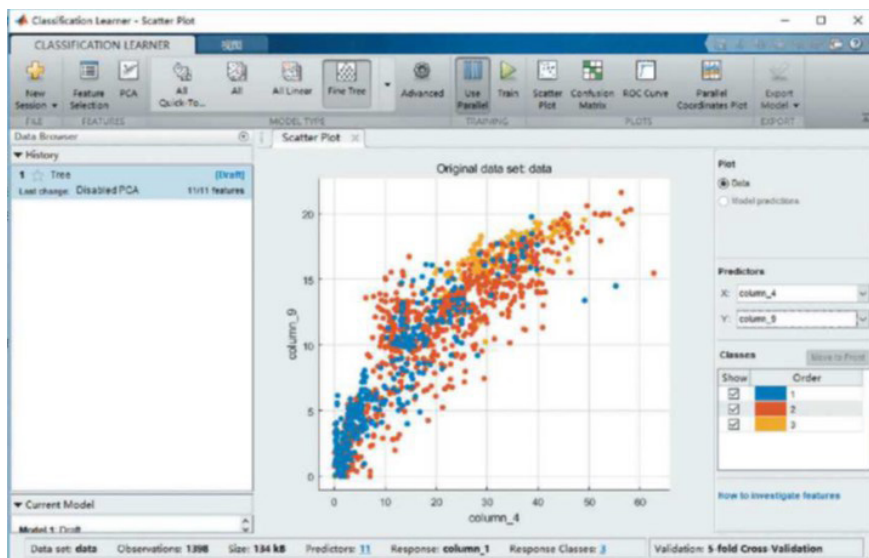
Ambos *plug-ins* se muestran en las ilustraciones 12 y 13.

La interpretación de los datos va más allá de su análisis, dado que, como parte de la viabilidad técnica del proceso, resulta necesario especificar un rango de tolerancias para la evaluación por parte del algoritmo. No solo se registrará la posición de los

²³ MATLAB (2022a).



12 *Plug-In Hyperspectral Viewer* del programa MATLAB® para el tratamiento de imágenes hiperespectrales. Fuente: Web de MATLAB®.



13 *Plug-In Classification Learner* del programa MATLAB® para el tratamiento de volúmenes de datos mediante métodos de regresión e inteligencia artificial. Fuente: Web de MATLAB®.

atributos del billete, sino que también habrá que añadir nuevos baremos para la catalogación de las nuevas variables surgidas, como el posicionamiento o los registros de respuesta a las diferentes longitudes de onda del espectro.

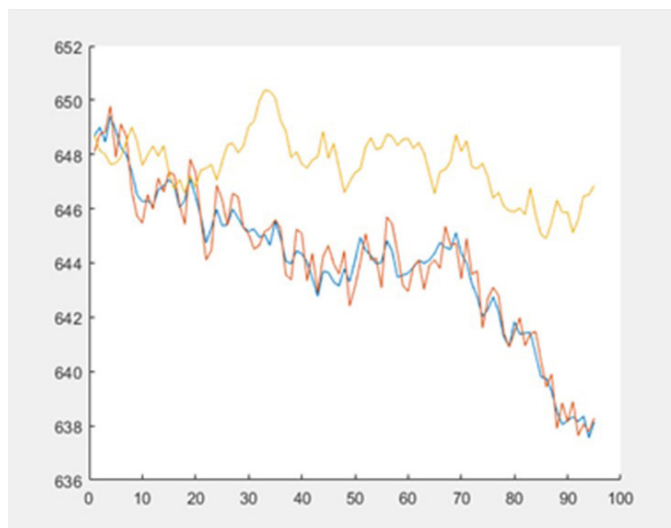
Es necesario un estudio profundo que optimice esta valorización una vez que se defina el prototipo, además de correcciones periódicas del rango a pesar de valorarse que estas tolerancias vayan actualizándose automáticamente mediante *Deep Learning*, de manera que sean cada vez más precisas y sin que ello conlleve un perdido elevado por excesiva restricción al error.

Las nuevas variables que se han de considerar son las que derivan del análisis de la banda espectral, pues se ha de crear un rango de tolerancias para la desviación del valor obtenido de cada una de las bandas seleccionadas para la evaluación.

Las tolerancias, además, han de tener en cuenta la diferencia que puede haber entre una desviación de tonalidad y la que pudiera haber por un defecto de impresión del tipo de mancha o ausencia de impresión.

Para ello se deben combinar las tolerancias dimensionales con las relativas a la banda del espectro analizado, creando regiones donde se hagan excepciones por errores detectados en la lectura. También se puede valorizar mediante una cantidad determinada de errores acumulados, lo que es menos preciso, pero efectivo, para algunos casos.

En la ilustración 14 se muestra una comparación valor por valor de una banda espectral analizada en un punto con respecto a la referencia guardada en ese mismo punto.



14 Captura de un análisis comparativo de una banda del hipercubo (línea amarilla) con respecto a una referencia creada (líneas azul y roja). Fuente: Elaboración propia.

6 Aplicación de la inteligencia artificial

Una vez interpretados y clasificados los datos, para extraer conclusiones de ellos se han de implementar herramientas de IA, de manera que se obtenga un beneficio del proceso.

Uno de los requerimientos necesarios del sistema, de cara a luchar contra la posible obsolescencia, es la incorporación de IA en alguna de sus vertientes. Esto guarda relación con los objetivos de la cuarta revolución industrial en materia de Calidad 4.0.

El objetivo es preparar el sistema para el futuro desarrollo de la industria, debiendo este ser capaz de extraer los datos necesarios para servir de elemento de aprendizaje y de predicción. Esto se lleva a cabo a través de la implementación de un buen algoritmo de decisión, clasificación y *Deep Learning*.

Tras las consultas realizadas a los principales actores del sector del control por visión, encargados de desarrollar sistemas de control por visión e IA en varios campos de la industria, se ha concluido que todos ellos cuentan con sistemas de aprendizaje para su control de calidad.

Por otro lado, resulta necesario, además, plantear la posibilidad de extraer los datos de la producción para llevar a cabo análisis externos a fin de obtener un histórico fiable y una futura actuación y decisión autónoma del sistema, de cara al objetivo de automatización requerido.

No se puede dejar de comentar en este punto el uso de la IA para la creación de *Gold Master* virtuales, que nos sirvan de cara al análisis y la clasificación que se realicen.

A continuación se detallan las aplicaciones iniciales en las que se enfocaría el uso de la IA.

6.1 Documentos técnicos de referencia digitales

Uno de los principales escollos a la hora del análisis de los billetes mediante técnicas de visión artificial u otras técnicas análogas es que los documentos de referencia en los que basar la inspección son analógicos, lo que imposibilita la actuación digital.

Se ha de abordar en este documento la necesidad de creación de una pieza virtual por cada atributo, que pudiera actualizarse y permitiera valorar los datos extraídos de los pliegos.

Por ello se ha de considerar el *Deep Learning* como elemento primordial a la hora de llevar a cabo el proyecto. Mediante el registro de los datos resultantes del proceso de minería se ha de generar una matriz conformada por los diferentes atributos que se han de analizar. El objeto de esto es obtener un valor de registro con el que poder comparar y que sepamos válido. Ese valor de registro se ha de obtener mediante *Deep Learning* de acuerdo con los

datos asociados a cada uno de los pliegos buenos analizados durante el entrenamiento de la máquina, y que se saben buenos por estar verificados por un operario previamente. Además, esa información puede servir de base para la actualización del algoritmo.

Los componentes de la matriz de atributos que se genere han de ser definidos por el operario del sistema una única vez, eligiendo antes de la fase de entrenamiento qué atributos se considerarán para componer el que denominaremos «*Gold Master digital*».

Gracias a la IA se mantiene el sistema actualizado, lo que nos permite, en caso de ser necesario, elaborar virtualmente documentación técnica para poder valorar las desviaciones que se producen históricamente en la producción, como ya se ha comentado.

Una interfaz rápida y sencilla resultará imprescindible para poder llevar a cabo todas estas funciones, y bajo ella ha de correr el algoritmo dando resultados claros de lo obtenido. Para que esto sea así, se ha de incorporar un *hardware* lo suficientemente potente, junto con un algoritmo capaz de reducir el volumen de datos mediante herramientas de regresión como el PLS-DA o el PCA (véanse apartado 5.2 y anejo 2). El objetivo es buscar la eficiencia y el máximo rendimiento posible, sin sacrificar la eficacia y la precisión del sistema.

En la ilustración 15 se muestra un pliego virtual creado a raíz del análisis de una muestra. Cada celda representa un pixel característico del análisis y en él se guarda toda la información extraída. Esto permite la localización de los errores de producción, facilitando así su análisis por el operario.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
2	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
3	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
4	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
5	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
6	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
7	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
8	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
9	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
10	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
11	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
12	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
13	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
14	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
15	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
16	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
17	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
18	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string
19	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string	45a2 string

15 Captura de un pliego virtual creado. Fuente: Elaboración propia.

6.2 Análisis predictivo como control de calidad

Como ya se ha comentado, uno de los grandes impedimentos con los que topan las medidas relacionadas con la visión artificial y la IA es la inexistencia de un archivo técnico digital, considerado referencia, avalado por el BCE.

La obtención de esos archivos constituiría un gran avance en la adecuación de estas innovaciones al mundo del billete, de cara a valorar otros procedimientos de análisis y a profundizar en los métodos de la Calidad 4.0.

Así, surge una vía clara de desarrollo basada en el uso del *Gold Master* obtenido para realizar análisis predictivos. Es decir, el continuo aprendizaje y decisión aportados por el *Deep Learning* en la creación de la referencia sirven a su vez como punto de partida para obtener conclusiones acerca de la producción en curso y tomar decisiones sobre ello.

Con el análisis de esta información tras varios ciclos de operación, se tendrá la capacidad de predecir fallos en la producción con una alta fidelidad. El punto óptimo de desarrollo se lograría cuando, con la ayuda del operario y un registro de los errores producidos en el sistema, el algoritmo sea capaz de avisar con antelación de la necesidad de mantenimiento para evitar un posible fallo.

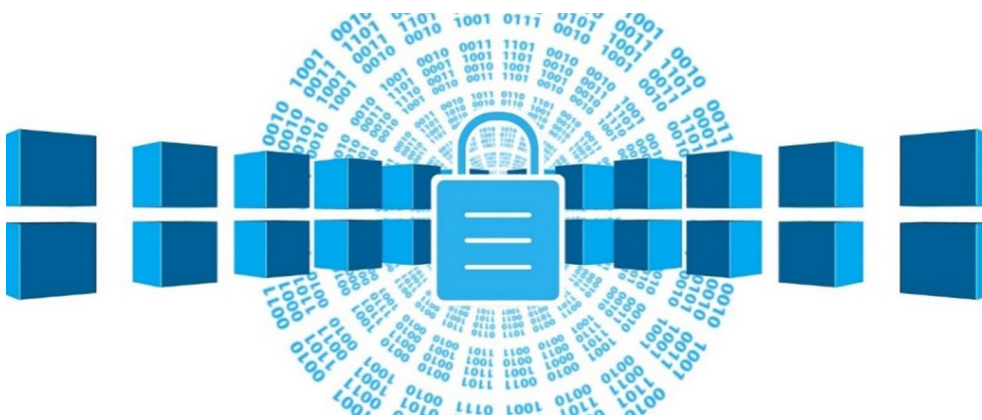
Esto coincide y apoya la filosofía *Lean Manufacturing*, en cuanto a actuar lo antes posible ante el error, evitando producir un producto defectuoso. Y, en consecuencia, se producirá una inmediata reducción del perdido.

6.3 Blockchain y creación de librerías virtuales independientes

IBM, una de las grandes empresas del sector tecnológico, define el *blockchain* como:

«*Blockchain* es un libro mayor compartido e inmutable que facilita el proceso de registro de transacciones y de seguimiento de activos en una red de negocios. Un activo puede ser tangible (una casa, un auto, dinero en efectivo, terrenos) o intangible (propiedad intelectual, patentes, derechos de autor, marcas). Prácticamente cualquier cosa de valor puede ser rastreada y comercializada en una red de *blockchain*, reduciendo el riesgo y los costos para todos los involucrados.»²⁴

Es decir, podemos definir *blockchain* como una tecnología capaz de establecer conexiones totalmente seguras y descentralizadas para el intercambio de información, sea de la naturaleza que sea. Este intercambio no requiere de intermediarios, lo que le confiere mayor seguridad y menor coste.



16 Imagen que ilustra la seguridad de las redes *blockchain*. Fuente: Imagen libre.

24 IBM (2023).

Las ventajas que ofrecen las redes *blockchain* no se quedan en la seguridad o en el coste. Estas redes, por definición, no pueden ser editadas, solo completadas. Es decir, la información siempre se podrá añadir, pero no es posible destruir información que ya esté en la red. Esto le confiere un alto grado de estabilidad y define un marco perfecto para las transacciones de información confidencial o de seguridad, como la documentación técnica virtual.

Además, la red requiere un código cifrado para poder participar y acceder a la información que concierna a un certificado. Dicho de otra manera, solo se verán aquellos datos que estén destinados al sistema que lo solicite.

La creación de librerías virtuales según las referencias obtenidas abre un campo de desarrollo dentro de una red *blockchain* para el intercambio de estas en el BCE. La implementación de un sistema de control de calidad similar, basado en la IA en las diferentes imprentas ligadas a la producción de billetes de euro hace posible el intercambio de información entre sistemas.

La red *blockchain* permitiría de que la red fuera anónima e inaccesible, salvo para aquellos con los certificados pertinentes, de manera que serían los sistemas los que autónomamente cotejaran entre ellos las conclusiones de los diferentes controles de calidad realizados en cada imprenta. El objeto de esto es elaborar, a medida que opera el sistema, un análisis cada vez más eficiente y almacenar un volumen mayor de información. Para ello, la red *blockchain* se establecería entre máquinas, lo que haría anónimos los datos vertidos a la red, y no comprometería a ningún equipo de trabajo. Esas conexiones se pueden apreciar en la ilustración 17.



17 Imagen que ilustra las conexiones a nivel de imprentas de los distintos sistemas de control de calidad con inteligencia artificial. Fuente: Elaboración propia.

7 Prototipo de control de calidad modular novedoso

7.1 Fundamentos

En este apartado se va a comentar el desarrollo que se ha llevado a cabo durante los últimos meses en la Unidad de Investigación y Desarrollo del Departamento de Control de Producción de Billetes (DCPB) según lo expuesto, de cara a idear un sistema para el control de calidad en IMBISA.

A continuación se exponen algunos de los puntos base de este planteamiento:

- Se propone un sistema novedoso en el mundo del billete, capaz de detectar posibles errores de impresión y de almacenar por otra vía datos con el fin de darles uso en una valoración posterior.
- IMBISA ha requerido un sistema más preciso de control de la impresión, ante la necesidad de mejorar su actual método por falta de resolución.
- Se ha visitado IMBISA y se han constatado los principales condicionantes para la implantación de un sistema de control de calidad automatizado.
- Se propone un sistema modular *dual-line*, basado en dos líneas. Una para un sistema tradicional de visión artificial de alta resolución. Y otra basada en un análisis hiperspectral de cara a la adquisición de datos y la aplicación de IA para elaborar un análisis muy detallado.
- Este trabajo toma referencia de los trabajos presentados en el DCPB «Análisis de imágenes hiperspectrales aplicado al control de producción de billetes por atributos *in situ* orientado al proceso de producción» y «Análisis de imágenes hiperspectrales aplicado al control de producción de billetes por atributo orientado al producto final», ambos de septiembre de 2021 y realizados por Adrián López González y Carlos García-Mauriño Villanueva.
- Se ha realizado un estudio de mercado para enmarcar la propuesta en el entorno industrial, destacando la necesidad de aprovechar la IA.
- Los puntos clave de detección están en los procesos de litografía y calcografía, siendo el principal error de ambos procesos la ausencia de impresión de microlíneas.
- Se pretende un único módulo de análisis para litografía y calcografía. Para ello es necesario un algoritmo muy robusto que seleccione los principales puntos de interés.
- Se requiere la capacidad de análisis tanto en UV como en IR.

Para este sistema se han planteado algunas necesidades extra más allá de lo requerido por IMBISA. Esto permitirá contar con un sistema novedoso tecnológicamente y que afronte eficientemente la obsolescencia a la que habitualmente se enfrenta cualquier sistema de calidad.

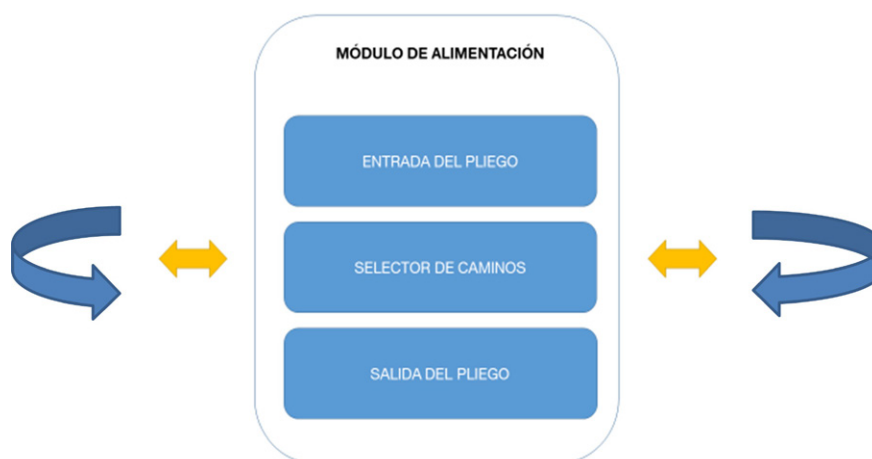
Para ello se ha planificado un sistema modular, capaz de incorporar los análisis de IR y UV en sus dos bandas de manera totalmente segura, con la posibilidad de definir diferentes rutinas para el análisis de los pliegos que permitan analizarlos por ambas caras o definir qué profundidad de análisis se quiere llevar a cabo.

En un momento dado, se planteó la posibilidad de desarrollar un sistema en diferentes plantas para albergar todos los requerimientos. Sin embargo, se descartó, por considerarlo innecesario de momento, e ineficiente. En caso de que el espacio habilitado para el sistema fuera insuficiente, podría plantearse el sistema de esta otra manera.

Se propone, por tanto, un sistema que se ha denominado *dual-line* y que se expondrá con detalle a continuación, junto con algunas imágenes y esquemas que lo clarifiquen.

El sistema propuesto cuenta con dos módulos separados de análisis: Módulo VAS (Sistema de Visión Artificial, por sus siglas en inglés) y Módulo HAIS (Sistema Hiperespectral de Inteligencia Artificial, por sus siglas en inglés). Ambos se expondrán con detalle en este punto.

Estos módulos han sido separados por un módulo de alimentación y descarga de los pliegos que actúa como punto final y de partida del análisis. Este consta de una bandeja de carga, una fase intermedia o de conexión (que actúa como selector de caminos) y una bandeja de depósito final de pliegos, como se aprecia en la ilustración 18.



18 Esquema del módulo de alimentación y salida del sistema. Fuente: Elaboración propia.

El sistema de selección de caminos trabaja en función de las rutinas elegidas previamente, sirve de puerta lógica del proceso y evita, a su vez, posibles cruces de caminos de los pliegos durante la operación.

Se han acoplado dos elementos más de salida y de alimentación para cumplir con todas las rutinas posibles del análisis, estos más sencillos y equiparables a mesas depositarias básicas. Están ideados, sobre todo, para realizar un análisis en ambas caras.

Todo el sistema cuenta con un registro de trazabilidad, que nos permite saber en todo momento de qué pliego se trata y qué situación tiene dentro del ciclo. El objetivo es trasladar esta información de manera rápida a otras fases donde pudiera ser relevante.

7.2 Rutinas de operación

El selector de rutinas es un algoritmo que tiene por entradas:

- El proceso del que deriva el pliego, litografía o calcografía.
- El módulo que se va a emplear: VAS, HAIS o ambos.
- Si estos módulos de manera individual trabajarán en anverso, reverso o ambos.

En función de esto, el algoritmo seleccionará la rutina correspondiente y el resto de los elementos actuarán en función de ella, hasta llegar a la salida correspondiente a la rutina tras realizar todos los pasos precisos.

7.3 Sistema VAS

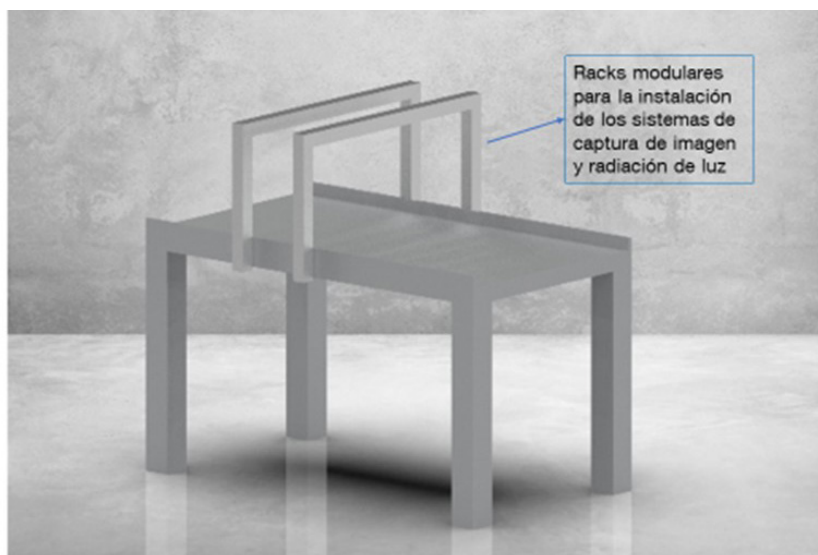
Tras introducir las entradas requeridas por el sistema para la selección de la rutina, se cargan los pliegos y el sistema comienza a funcionar. Para este módulo, la carga se hace directa desde la bandeja de alimentación.

Posteriormente se analiza el código de trazabilidad y se crea el pliego virtual, que es una recreación del pliego que se analizará y que se utilizará para ir almacenando la información y realizar los diferentes análisis. Acto seguido, se cargará la rutina de trabajo, que ha sido seleccionada como se ha explicado.

La línea VAS cuenta con cámaras de resolución muy alta para el análisis de objetos con necesidades muy precisas, como algunas estructuras lineales de los billetes. Según se ha comentado, esto es esencial y se ha tenido muy presente en el diseño del sistema. En la ilustración 19 se muestra dónde se incorporarían estas cámaras en la mesa de trabajo.

La línea cuenta con tres submódulos:

- Módulo de luz visible.
- Módulo de IR.
- Módulo UV (para las dos longitudes de onda necesarias).



19 Imagen del sistema de visión artificial (VAS). Fuente: Elaboración propia.

Cada uno de esos submódulos se relaciona con un máster precreado en función de la rutina seleccionada al principio de la operación. Al tener generados los pliegos de manera virtual, estos másteres se podrán ir actualizando y mejorando con IA tras la comparación y el análisis.

La generación de los másteres se hará igualmente mediante IA, que dará como resultado una referencia muy fiable y completa con la que comparar.

Si la rutina seleccionada conllevara un análisis del reverso del pliego, al terminar el análisis del anverso de toda la pila se comenzaría con el reverso de manera invertida, a través de unos rodillos de carga por fricción o de forma manual para evitar deterioros por arrastre.

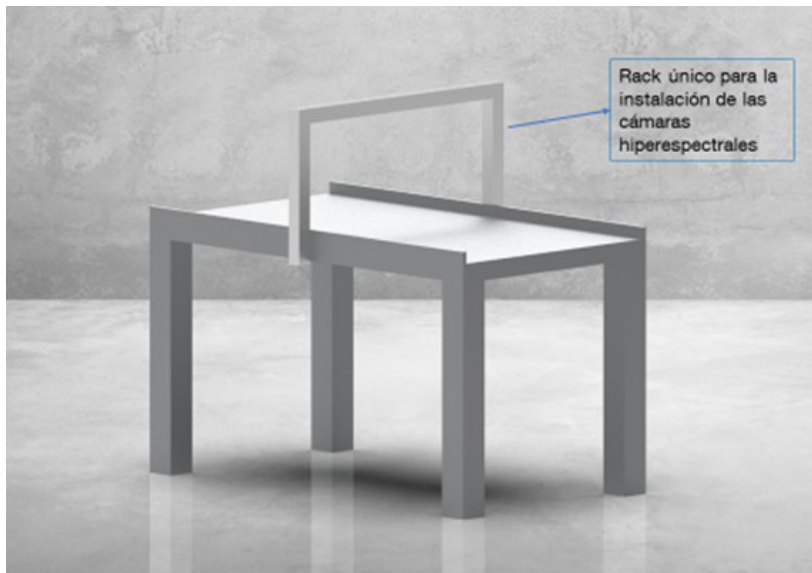
Una vez terminado el análisis, los pliegos se recopilan en una de las bandejas disponibles en función de cuál sea el paso siguiente que se llevará a cabo.

7.4 Sistema HAIS

El sistema HAIS es muy parecido al sistema VAS antes expuesto y está constituido por una mesa sobre la que se instalará la línea de cámaras hiperespectrales encargadas de hacer el registro de los pliegos y transferirlos a un ordenador. Este, mediante un *software*, traslada esa información a datos y valores, y además la compara con la referencia creada. Como consecuencia, se obtiene un análisis pormenorizado del pliego, tanto del color como de la situación de los atributos.

La alimentación de la mesa se lleva a cabo por el módulo de alimentación. La salida, al igual que en el VAS, permite el volteo y por tanto el análisis de las dos caras del pliego.

En la ilustración 20 se muestra la configuración de la mesa para la colocación de cámaras.



20 Imagen del sistema de análisis hiperspectral mediante inteligencia artificial (HAIS). Fuente: Elaboración propia.

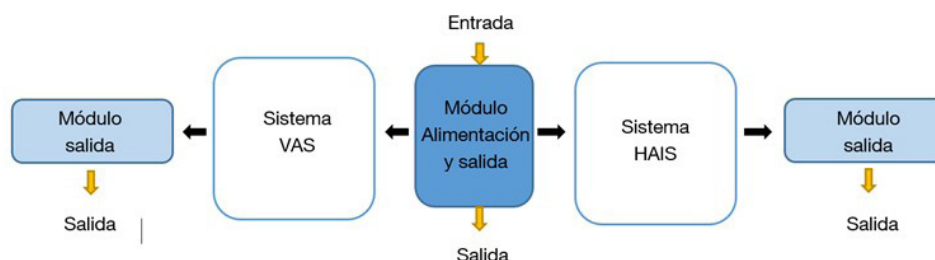
7.5 Sistema completo

Como conclusión de este apartado, se van a enunciar el sistema final, su composición y su empleo. Se acompaña de un esquema del sistema con sendos módulos operativos montados (ilustración 21).

Así, el sistema constaría de los dos módulos VAS y HAIS, uno a cada lado del módulo de alimentación, que a su vez sería el punto de inicio y uno de los finales posibles del ciclo de operación. El sistema completo constará de otras dos salidas, una por cada módulo, que serán puntos de estacionamiento entre las diferentes fases y que permitirán operar en ambas caras.

La norma de operación se verá definida por las rutinas posibles previamente configuradas.

La superficie que el sistema entero ocupará se aproxima a unos 7 m². La velocidad de operación quedaría por definir, en función de la claridad requerida de análisis, y puede registrar diferentes velocidades en las diversas rutinas.



21 Esquema de composición del sistema *dual-line* completo. Fuente: Elaboración propia.

8 Conclusiones

Los últimos años de desarrollo industrial a nivel global se han visto dominados por la Industria 4.0, que se ha extendido a todos los sectores y ámbitos, no solo de la producción, sino también de la vida de las personas.

Es incuestionable la necesidad de adaptación ante tal revolución, y las soluciones basadas en IA son las preponderantes dentro de esta. Todos los estudios acerca de su papel en la industria le otorgan una gran relevancia en los próximos años.

Por ello, es necesario buscar la manera de adaptar la industria del billete a esta revolución, de modo que pueda beneficiarse de todo su potencial. Para ello se requiere implementar innovaciones tecnológicas que, como se ha visto, permitan extraer los datos de la producción. De no hacerlo, resultaría imposible la implementación de cualquier sistema relativo a computación, como los ligados a la IA. La manera que se ha considerado mejor por su amplitud de datos que tratar y lo novedoso de esta ha sido el análisis de imágenes hiperespectrales.

Una vez que esos datos son extraídos y tratados, el potencial de este cambio es muy grande. Tomando como referencia el entorno, aquellas empresas que implantaron medidas ligadas a la IA en su producción, en un entorno de filosofía *Lean Manufacturing*, han conseguido grandes porcentajes de mejora en la reducción del perdido. Esto refuerza la idea de la necesidad de incorporar la Calidad 4.0 al proceso de producción de billetes, tanto por la reducción de costes que conlleva como por el objetivo de realizar un billete más verde.

Por todo lo expuesto, se considera de interés plantear una implantación y una adaptación como las propuestas en este documento.

Bibliografía

- Banco Central Europeo. (2023). "Billetes: Investigación y desarrollo". <https://www.ecb.europa.eu/euro/banknotes/research/html/index.es.html?form=MY01SV&OCID=MY01SV>
- Banco de España. (2023). "La producción y puesta en circulación". https://www.bde.es/bde/es/areas/billemone/Publico_general/Billetes_de_euro/produccion/La_produccion_y_6c78baff11bc821.html#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20de%20billetes%20en,200%20%E2%82%AC%20y%20500%20%E2%82%AC
- Berkman, Jacqueline. (2017). "Machine Learning vs. Deep Learning". <https://blogs.oracle.com/ai-and-datascience/post/machine-learning-vs-deep-learning>
- Bilbao, L. M., y R. U. Lanza. (2021). "Los inicios de la Segunda Revolución Industrial". *Historia Económica*, pp. 151-164. Universidad Autónoma de Madrid.
- Blanco, R., J. Fontrodona y C. Poveda. (2017). "La Industria 4.0: el estado de la cuestión". *Revista de Economía Industrial*. Cámara de Comercio de Barcelona.
- Cho, B. K. (2013). "Detection of cuticle defects on cherry tomatoes using hyperspectral fluorescence imagery". *Postharvest Biology and Technology*, pp. 40-49.
- Comín, A. (2011). *Historia económica mundial. De los orígenes a la actualidad*. Alianza Editorial.
- Comisión Europea. (2018). "Plan coordinado sobre la inteligencia artificial". <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018DC0795&from=DA>
- Dai, Q. C. (2014). "Potential of hyperspectral imaging for non-invasive determination of mechanical properties of prawn (*Metapenaeus ensis*)". *Journal of Food*, p. 136.
- ElMasry, G., D. W. Sun y P. Allen. (2013). "Chemical-free assessment and mapping of major constituents in beef using hyperspectral imaging". *Journal of Food Engineering*, 117 (2), pp. 235-246.
- Fernandes, A. L. (2013). "Comparison between neural networks and partial least squares for intra-growth ring wood density measurement with hyperspectral imaging". *Computers and Electronics in Agriculture*, pp. 71-81.
- Hoong-Ta Lim, V. M. (2017). "Hyperspectral imaging of polymer banknotes for building and analysis of spectral library". *Elsevier*.
- IBM. (2023). "¿Tecnología Blockchain?". <https://www.ibm.com/es-es/topics/what-is-blockchain>
- Instituto de Ingeniería de España. (2021). *Implantación de la inteligencia artificial en España*.
- LNS Research. (2023). "Transform your organization with data-driven insights". <https://www.lnsresearch.com>
- Lucas, R. E. (2003). *The Industrial Revolution: Past and Future*.
- Martínez, F. L. (1997). *Modelización de la calidad post-venta de un producto: aplicación a la fiabilidad de los billetes de banco*. Publicaciones Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid.
- MATLAB. (2022a). "Getting Started with Hyperspectral Image Processing". <https://es.mathworks.com/help/images/getting-started-with-hyperspectral-image-analysis.html>
- MATLAB. (2022b). "Procesamiento de imágenes hiperespectrales". <https://es.mathworks.com/help/images/hyperspectral-image-processing.html>
- Organización Internacional de Normalización. (1999). "Sampling procedures for inspection by attributes". *Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection (ISO 2859-1)*.
- Organización Internacional de Normalización. (2005). "Sampling procedures for inspection by attributes". *Skip-lot sampling procedures (ISO 2859-3)*.
- Qin, J. C. (2013). "Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality". *Journal of Food Engineering*, pp. 157-171.
- Rahayu, S. S. (2017). "Application of Principal Component Analysis (PCA) to Reduce Multicollinearity Exchange Rate Currency of Some Countries in Asia Period 2004-2014". *International Journal of Educational Methodology*.
- Rifkin, J. (2011). *La Tercera Revolución Industrial. Cómo el poder lateral está transformando la energía, la economía y el mundo*. Ediciones Paidós.
- Rodríguez, M. C., y D. R. Rodríguez. (2009). "El concepto de calidad: Historia, evolución e importancia para la competitividad". *Revista de la Universidad de La Salle*.
- Universidad de Stanford. (2021). *One Hundred Year Study on Artificial Intelligence (AI100)*.
- Vega-Vilca, J. C. (2004). *Generalizaciones de mínimos cuadrados parciales con aplicación en clasificación supervisada*. Ciencias e Ingeniería de la Información y Computación, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez.
- Vega-Vilca, J. C., y J. Guzmán. (2011). "Regresión PLS y PCA como solución al problema de multicolinealidad en regresión múltiple". *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 18(1), pp. 9-20. CIMPA – UCR.

Índice de ilustraciones

Ilustración 1	Billete de 1.000 pesetas de 1936	10
Ilustración 2	Billete de 50 euros de la serie 2	10
Ilustración 3	Gráfica solar de los ejes de la Calidad 4.0	13
Ilustración 4	Esquema de composición de los conceptos ligados a la inteligencia artificial	14
Ilustración 5	Esquema de composición de una red neuronal artificial	16
Ilustración 6	Imagen que ilustra la transformación que conlleva la inteligencia artificial en su objetivo de asemejarse a la mente humana	18
Ilustración 7	Esquema de la inspección de billetes por parte de Banco de España	19
Ilustración 8	Ejemplo de control por variables relacionado con la posición de un elemento en un billete de 50 euros de la serie 2	21
Ilustración 9	Imagen que ilustra el control visual realizado en la producción de billetes de euro	21
Ilustración 10	Construcción del hipercono a partir de un billete de 50 euros de la serie 2	24
Ilustración 11	Imagen que ilustra la amplitud de campos que comprende el Internet de las cosas o <i>IoT</i>	25
Ilustración 12	<i>Plug-In Hyperspectral Viewer</i> del programa MATLAB® para el tratamiento de imágenes hiperespectrales	27
Ilustración 13	<i>Plug-In Classification Learner</i> del programa MATLAB® para el tratamiento de volúmenes de datos mediante métodos de regresión e inteligencia artificial	27
Ilustración 14	Captura de un análisis comparativo de una banda del hipercono (línea amarilla) con respecto a una referencia creada (líneas azul y roja)	28
Ilustración 15	Captura de un pliegue virtual creado	30
Ilustración 16	Imagen que ilustra la seguridad de las redes <i>blockchain</i>	31
Ilustración 17	Imagen que ilustra las conexiones a nivel de imprentas de los distintos sistemas de control de calidad con inteligencia artificial	32
Ilustración 18	Esquema del módulo de alimentación y salida del sistema	34
Ilustración 19	Imagen del sistema de visión artificial (VAS)	36
Ilustración 20	Imagen del sistema de análisis hiperespectral mediante inteligencia artificial (HAIS)	37
Ilustración 21	Esquema de composición del sistema <i>dual-line</i> completo	37
Ilustración 22	Gráfico de la implantación de la inteligencia artificial en los sectores industriales de España	42
Ilustración 23	Gráfico sobre la necesidad de empleados de la inteligencia artificial en la industria española según los profesionales de esta	42
Ilustración 24	Gráfico sectorial de la experiencia en inteligencia artificial de los profesionales de la industria española	42
Ilustración 25	Gráfico sobre la formación en inteligencia artificial de los ingenieros de la industria española según estos mismos	43

Anejo 1 Estudio sobre la implantación de la inteligencia artificial

La analítica inteligente es la familia formada por las tecnologías emergentes en la Industria 4.0 ligadas al análisis de datos.

Existen tres niveles de analítica inteligente:

- Analítica inteligente particular: especializada en un área de aplicación.
- Analítica inteligente general: una computadora que es inteligente como un ser humano.
- Superanalítica inteligente: su capacidad es mucho mayor que la de cualquier ser humano.

Cabe destacar el desarrollo del mercado *IoT* asociado a estos campos de analítica inteligente. La previsión para el incremento de ingresos y de actividades ligadas a esto es pasar de los mil millones en 2015 a más de cien billones en 2025.

A continuación se presentan algunas cifras y tendencias que permiten cuantificar la aceleración digital:

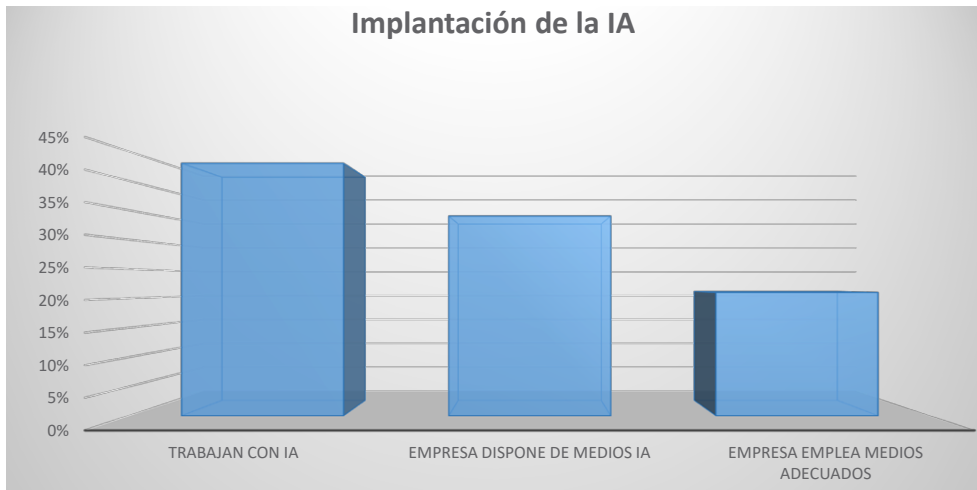
- En 2025, los dispositivos conectados generarán un total de 180 *ZettaBytes* de datos.
- España es el quinto país europeo en desarrollo de *IoT* y crece de media por encima del 15 % anual.
- El gasto en transformación digital crece en torno a un 18 % anual.
- El mercado nacional de macrodatos o análisis inteligente tiene un crecimiento del 6 %.

Entrando ahora en materia del estudio realizado por el Instituto de Ingeniería de España²⁵ en 2021 en relación con la implantación de la IA en España, se detallan gráficamente a continuación las conclusiones ejecutivas del informe.

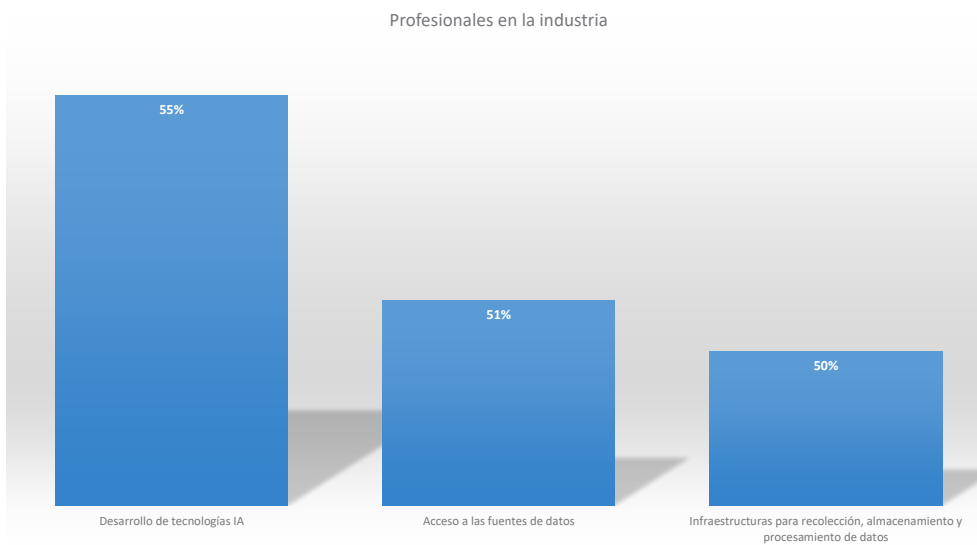
Los resultados acerca de la consulta sobre la necesidad de trabajadores formados en IA por las empresas se muestran en la ilustración 23.

También se preguntó por la experiencia que los ingenieros tenían en IA, y los resultados se ofrecen en la ilustración 24.

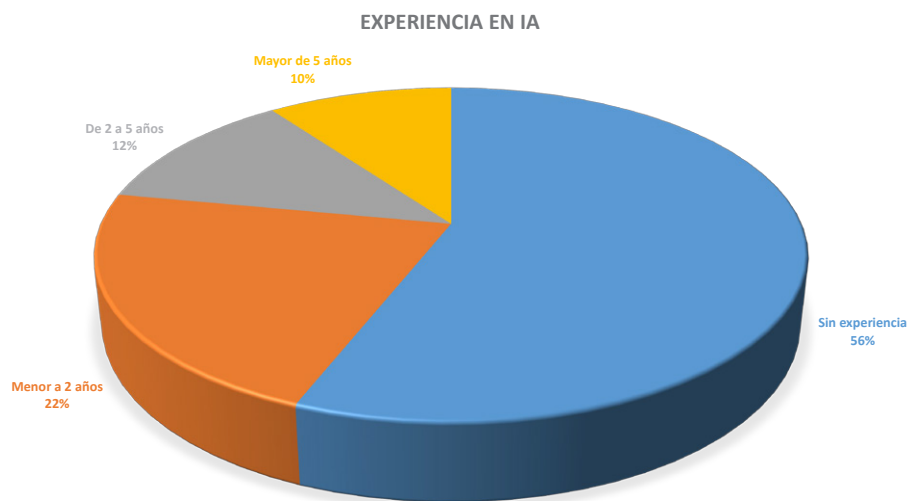
²⁵ Instituto de Ingeniería de España (2021).



22 Gráfico de la implantación de la inteligencia artificial en los sectores industriales de España. Fuente: Elaboración propia.

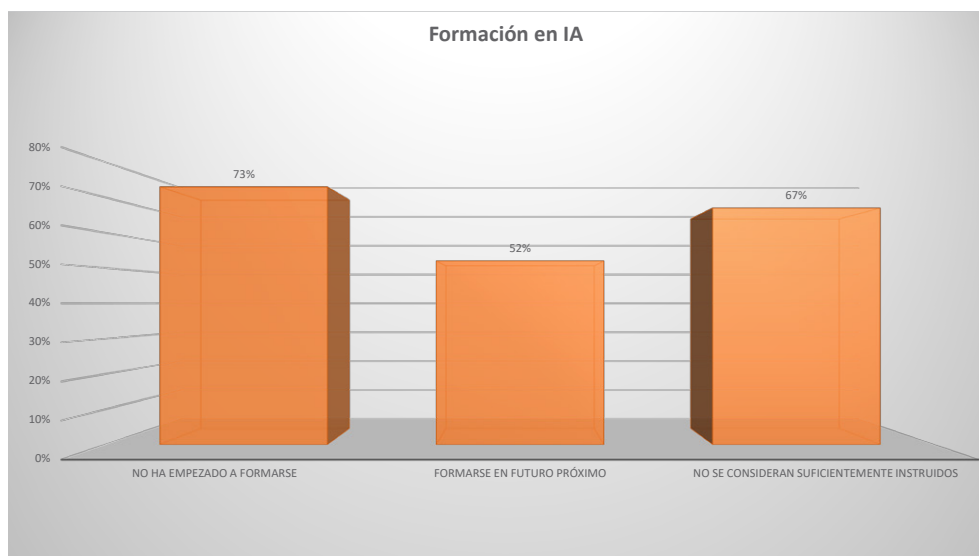


23 Gráfico sobre la necesidad de empleados de la inteligencia artificial en la industria española según los profesionales de esta. Fuente: Elaboración propia.



24 Gráfico sectorial de la experiencia en inteligencia artificial de los profesionales de la industria española. Fuente: Elaboración propia.

En un último gráfico, que se muestra en la ilustración 25, vemos la formación de los ingenieros en inteligencia artificial.



25 Gráfico sobre la formación en inteligencia artificial de los ingenieros de la industria española según estos mismos. Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que el 96 % de los encuestados consideran conveniente que los ingenieros españoles se formen en inteligencia artificial y que se deberían incluir asignaturas acerca de ello en las carreras universitarias.

Por último, con vistas al futuro, el 59 % de los ingenieros creen que la inteligencia artificial tendrá un gran impacto en los próximos años, y destacan aquellos que forman parte de los grupos directivos y de mayor responsabilidad.

Anejo 2 Métodos estadísticos PCA y PLS-DA

Las siglas PCA y PLS-DA hacen referencia a los términos en inglés *Principal Component Analysis* («análisis por componentes principales») y *Partial Least Square Discriminant Analysis* («análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales»), respectivamente²⁶.

Estas herramientas de análisis de datos son útiles para el trabajo con grandes volúmenes de datos correlacionados, a fin de facilitar esta operación y reducir el coste computacional del proceso.

En este anejo se van a explicar de una manera breve ambos términos y la relación entre ellos realizada por la Universidad de Puerto Rico²⁷.

Análisis por componentes principales (PCA)

El análisis por componentes principales, como su nombre indica, consiste en encontrar los elementos principales o que mejor explican la relación entre los elementos (x_i, y_i) y el vector de longitudes de onda asociado.

El método consiste en encontrar una matriz formada por las correlaciones de los elementos. Es un procedimiento muy parecido a la descomposición de matrices por autovalores y autovectores, con el objetivo de maximizar la varianza del componente principal haciendo que la transformación satisfaga la condición de ortogonalidad.

Esto permite analizar solo los aspectos más importantes de los datos con una efectividad muy alta, posibilitando comparar los datos sin un coste computacional excesivo.

Análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA)

El análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales es un método algo más novedoso, con mucho desarrollo aún por delante. Sin embargo, sus excelentes resultados han provocado que su aplicación en los últimos años se extienda como sustituto de muchos de los métodos anteriormente empleados.

El método consiste en una transformación inicial de la matriz de predictores (matriz que contiene la situación espacial) con ayuda del vector de respuestas (vector que contiene las longitudes de onda), para obtener una matriz T de componentes no relacionados, llamados «componentes PLS». Aquí radica una de las diferencias con el PCA, y es que este solo hace uso de la matriz de predictores.

Tras esto, se calcula el modelo de regresión estimado usando el vector de respuesta original y como nuevos predictores los PLS. La reducción dimensional puede ser aplicada directamente, debido a que los componentes son ortogonales.

²⁶ Vega-Vilca y Guzmán (2011).

²⁷ Vega-Vilca (2004).

Como dato destacable, el número de elementos necesarios para el análisis de regresión debe ser mucho menor que el número de predictores, lo que se cumple para el *DataCube* y para el análisis de un billete.

Comparativa de los métodos matemáticos

Para explicar la comparativa y la elección de uno de los métodos, se ha empleado el estudio —ya comentado— de la Universidad de Puerto Rico (Estados Unidos) publicado en la revista *Matemática Aplicada*²⁸. Se han extraído las conclusiones de este, donde se detallan las principales diferencias entre uno y otro en el análisis de una misma situación.

De ello se deduce que, pese a que en un primer momento se pueda pensar que el método PCA tiene un coste computacional menor que el PLS-DA, y por tanto sería más rápido, el PLS-DA nos permite hacer un uso de un número muy inferior de componentes para la obtención del modelo de regresión, lo que implica una eficiencia mucho mayor, que se traduce en un significativo menor coste computacional global.

Por otro lado, para el caso del análisis, que cuenta con un número de predictores mucho mayor que el número de componentes del vector respuesta, el modelo PLS-DA puede ser estimado muy eficazmente y da un error mínimo en comparación con el PCA. Es decir, la matriz con la que se va a operar es rectangular, y el número de filas es mucho mayor que el número de columnas, dado que se detalla la situación espacial de todos los puntos de la región de estudio.

28 Vega-Vilca y Guzmán (2011).

PUBLICACIONES DEL BANCO DE ESPAÑA

DOCUMENTOS OCASIONALES

- 2110 DMITRY KHAMETSHIN: High-yield bond markets during the COVID-19 crisis: the role of monetary policy.
- 2111 IRMA ALONSO y LUIS MOLINA: A GPS navigator to monitor risks in emerging economies: the vulnerability dashboard.
- 2112 JOSÉ MANUEL CARBÓ y ESTHER DIEZ GARCÍA: El interés por la innovación financiera en España. Un análisis con Google Trends.
- 2113 CRISTINA BARCELÓ, MARIO IZQUIERDO, AITOR LACUESTA, SERGIO PUENTE, ANA REGIL y ERNESTO VILLANUEVA: Los efectos del salario mínimo interprofesional en el empleo: nueva evidencia para España.
- 2114 ERIK ANDRES-ESCAIOLA, JUAN CARLOS BERGANZA, RODOLFO CAMPOS y LUIS MOLINA: A BVAR toolkit to assess macrofinancial risks in Brazil and Mexico.
- 2115 ÁNGEL LUIS GÓMEZ y ANA DEL RÍO: El impacto desigual de la crisis sanitaria sobre las economías del área del euro en 2020. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2116 FRUCTUOSO BORRALLO EGEA y PEDRO DEL RÍO LÓPEZ: Estrategia de política monetaria e inflación en Japón. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2117 MARÍA J. NIETO y DALVINDER SINGH: Incentive compatible relationship between the ERM II and close cooperation in the Banking Union: the cases of Bulgaria and Croatia.
- 2118 DANIEL ALONSO, ALEJANDRO BUESA, CARLOS MORENO, SUSANA PÁRRAGA y FRANCESCA VIANI: Medidas de política fiscal adoptadas a partir de la segunda ola de la crisis sanitaria: área del euro, Estados Unidos y Reino Unido. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2119 ROBERTO BLANCO, SERGIO MAYORDOMO, ÁLVARO MENÉNDEZ y MARISTELA MULINO: El impacto de la crisis del COVID-19 sobre la vulnerabilidad financiera de las empresas españolas. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2120 MATÍAS PACCE, ISABEL SÁNCHEZ y MARTA SUÁREZ-VARELA: El papel del coste de los derechos de emisión de CO₂ y del encarecimiento del gas en la evolución reciente de los precios minoristas de la electricidad en España. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2121 MARIO ALLOZA, JAVIER ANDRÉS, PABLO BURRIEL, IVÁN KATARYNIUK, JAVIER J. PÉREZ y JUAN LUIS VEGA: La reforma del marco de gobernanza de la política fiscal de la Unión Europea en un nuevo entorno macroeconómico. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2122 MARIO ALLOZA, VÍCTOR GONZÁLEZ-DÍEZ, ENRIQUE MORAL-BENITO y PATROCINIO TELLO-CASAS: El acceso a servicios en la España rural. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2123 CARLOS GONZÁLEZ PEDRAZ y ADRIAN VAN RIXTEL: El papel de los derivados en las tensiones de los mercados durante la crisis del COVID-19. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2124 IVÁN KATARYNIUK, JAVIER PÉREZ y FRANCESCA VIANI: (De-)Globalisation of trade and regionalisation: a survey of the facts and arguments.
- 2125 BANCO DE ESPAÑA STRATEGIC PLAN 2024: RISK IDENTIFICATION FOR THE FINANCIAL AND MACROECONOMIC STABILITY: How do central banks identify risks? A survey of indicators.
- 2126 CLARA I. GONZÁLEZ y SOLEDAD NÚÑEZ: Markets, financial institutions and central banks in the face of climate change: challenges and opportunities.
- 2127 ISABEL GARRIDO: La visión del Fondo Monetario Internacional sobre la equidad en sus 75 años de vida. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2128 JORGE ESCOLAR y JOSÉ RAMÓN YRIBARREN: Las medidas del Banco Central Europeo y del Banco de España contra los efectos del COVID-19 en el marco de los activos de garantía de política monetaria y su impacto en las entidades españolas. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2129 BRINDUSA ANGHEL, AITOR LACUESTA y FEDERICO TAGLIATI: Encuesta de Competencias Financieras en las Pequeñas Empresas 2021: principales resultados. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2130 PABLO HERNÁNDEZ DE COS: Comparecencias ante la Comisión de Presupuestos del Congreso de los Diputados, el 25 de octubre de 2021, y ante la Comisión de Presupuestos del Senado, el 30 de noviembre de 2021, en relación con el Proyecto de Presupuestos Generales del Estado para 2022. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2131 LAURA AURIA, MARKUS BINGMER, CARLOS MATEO CAICEDO GRACIANO, CLÉMENCE CHARAVEL, SERGIO GAVILÁ, ALESSANDRA IANNAMORELLI, AVIRAM LEVY, ALFREDO MALDONADO, FLORIAN RESCH, ANNA MARIA ROSSI y STEPHAN SAUER: Overview of central banks' in-house credit assessment systems in the euro area.

- 2132 JORGE E. GALÁN: CREWS: a CAMELS-based early warning system of systemic risk in the banking sector.
- 2133 ALEJANDRO FERNÁNDEZ CERERO y JOSÉ MANUEL MONTERO: Un análisis sectorial de los retos futuros de la economía española.
- 2201 MANUEL A. PÉREZ ÁLVAREZ: Nueva asignación de derechos especiales de giro. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2202 PILUCA ALVARGONZÁLEZ, MARINA GÓMEZ, CARMEN MARTÍNEZ-CARRASCAL, MYROSLAV PIDKUYKO y ERNESTO VILLANUEVA: Analysis of labor flows and consumption in Spain during COVID-19.
- 2203 MATÍAS LAMAS y SARA ROMANIEGA: Elaboración de un índice de precios para el mercado inmobiliario comercial de España. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2204 ÁNGEL IVÁN MORENO BERNAL y TERESA CAMINERO GARCÍA: Analysis of ESG disclosures in Pillar 3 reports. A text mining approach.
- 2205 OLYMPIA BOVER, LAURA CRESPO y SANDRA GARCÍA-URIBE: El endeudamiento de los hogares en la Encuesta Financiera de las Familias y en la Central de Información de Riesgos: un análisis comparativo. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2206 EDUARDO GUTIÉRREZ, ENRIQUE MORAL-BENITO y ROBERTO RAMOS: Dinámicas de población durante el COVID-19. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2207 JULIO GÁLVEZ: Measuring the equity risk premium with dividend discount models.
- 2208 PILAR CUADRADO, MARIO IZQUIERDO, JOSÉ MANUEL MONTERO, ENRIQUE MORAL-BENITO y JAVIER QUINTANA: El crecimiento potencial de la economía española tras la pandemia. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2209 PANA ALVES, SERGIO MAYORDOMO y MANUEL RUIZ-GARCÍA: La financiación empresarial en los mercados de renta fija: la contribución de la política monetaria a mitigar la barrera del tamaño. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2210 PABLO BURRIEL, IVÁN KATARYNIUK y JAVIER J. PÉREZ: Computing the EU's SURE interest savings using an extended debt sustainability assessment tool.
- 2211 LAURA ÁLVAREZ, ALBERTO FUERTES, LUIS MOLINA y EMILIO MUÑOZ DE LA PEÑA: La captación de fondos en los mercados internacionales de capitales en 2021. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2212 CARLOS SANZ: El peso del sector público en la economía: resumen de la literatura y aplicación al caso español.
- 2213 LEONOR DORMIDO, ISABEL GARRIDO, PILAR L'HOTELLERIE-FALLOIS y JAVIER SANTILLÁN: El cambio climático y la sostenibilidad del crecimiento: iniciativas internacionales y políticas europeas. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2214 CARMEN SÁNCHEZ y JARA QUINTANERO: Las empresas *finotech*: panorama, retos e iniciativas.
- 2215 MARÍA ALONSO, EDUARDO GUTIÉRREZ, ENRIQUE MORAL-BENITO, DIANA POSADA, PATROCINIO TELLO-CASAS y CARLOS TRUCHARTE: La accesibilidad presencial a los servicios bancarios en España: comparación internacional y entre servicios. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2216 BEATRIZ GONZÁLEZ, ENRIQUE MORAL-BENITO e ISABEL SOLER: Schumpeter Meets Goldilocks: the Scarring Effects of Firm Destruction.
- 2217 MARIO ALLOZA, JÚLIA BRUNET, VÍCTOR FORTE-CAMPOS, ENRIQUE MORAL-BENITO y JAVIER J. PÉREZ: El gasto público en España desde una perspectiva europea. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2218 PABLO AGUILAR, BEATRIZ GONZÁLEZ y SAMUEL HURTADO: Carbon tax sectoral (CATS) model: a sectoral model for energy transition stress test scenarios.
- 2219 ALEJANDRO MUÑOZ-JULVE y ROBERTO RAMOS: Estimación del impacto de variaciones en el período de cálculo de la base reguladora sobre la cuantía de las nuevas pensiones de jubilación. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2220 LUIS ÁNGEL MAZA: Una estimación de la huella de carbono en la cartera de préstamos a empresas de las entidades de crédito en España. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2221 SUSANA MORENO SÁNCHEZ: The EU-UK relationship: regulatory divergence and the level playing field.
- 2222 ANDRÉS ALONSO-ROBISCO y JOSÉ MANUEL CARBÓ: Inteligencia artificial y finanzas: una alianza estratégica.
- 2223 LUIS FERNÁNDEZ LAFUERZA, MATÍAS LAMAS, JAVIER MENCÍA, IRENE PABLOS y RAQUEL VEGAS: Análisis de la capacidad de uso de los colchones de capital durante la crisis generada por el COVID-19. (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2224 SONSOLES GALLEGO, ISABEL GARRIDO e IGNACIO HERNANDO: Las líneas del FMI para aseguramiento y prevención de crisis y su uso en Latinoamérica (Existe una versión en inglés con el mismo número).
- 2301 LAURA HOSPIDO, CARLOS SANZ y ERNESTO VILLANUEVA: Air pollution: a review of its economic effects and policies to mitigate them.
- 2302 IRENE MONASTEROLO , MARÍA J. NIETO y EDO SCHETS: The good, the bad and the hot house world: conceptual underpinnings of the NGFS scenarios and suggestions for improvement.
- 2303 ADRIÁN LÓPEZ GONZÁLEZ: Inteligencia artificial aplicada al control de calidad en la producción de billetes.