



**Universidad**  
Zaragoza

1542

## Trabajo Fin de Grado

### SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE ENVASES

Autor

DMYTRO RUBAN

Director

CARMELO JOSÉ BORQUE HORNA

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia  
2015-2016





**eupla**



**Universidad**  
Zaragoza

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA  
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

**MEMORIA**

**SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE  
ENVASES**

**424.16.92**

Autor: DMYTRO RUBAN

Director: CARMELO JOSÉ BORQUE HORNA

Fecha: 28 de Junio de 2016



# INDICE DE CONTENIDO

1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT	2
3. INTRODUCCIÓN	3
3.1. ENUNCIADO	3
3.2. MOTIVACIÓN	3
3.3. OBJETIVO	4
3.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO	5
3.5. ANTECEDENTES	6
3.6. POSIBLES SOLUCIONES Y ALTERNATIVAS	10
3.6.1. <i>Métodos de detección y clasificación</i>	10
3.6.1. <i>Sistemas de control</i>	16
3.7. JUSTIFICACIÓN DE LAS SOLUCIONES ELEGIDAS	18
3.7.1. <i>Métodos de detección y clasificación</i>	19
3.7.1.1. Elección del sensor capacitivo	19
3.7.1.2. Elección del sensor inductivo	19
3.7.1.3. Elección de los sensores de medición	20
3.7.1.4. Elección de la célula de carga	22
3.7.2. <i>Sistema de control</i>	23
3.8. NORMATIVA APLICABLE	25
4. DESARROLLO	26
4.1. ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA	26
4.2. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES	28
4.2.1. <i>Sensor capacitivo e inductivo</i>	29
4.2.2. <i>Sensores de medición</i>	30
4.2.3. <i>Células de carga</i>	31
4.3. PROCESO DE CLASIFICACIÓN	33
4.4. COEFICIENTES DE CLASIFICACIÓN	34
4.4.1. <i>Coeficientes de clasificación para envases plásticos</i>	35
4.4.2. <i>Coeficientes de clasificación para envases tipo Tetrabrick</i>	37
4.4.3. <i>Coeficientes de clasificación para envases de vidrio</i>	38
4.4.4. <i>Coeficientes de clasificación para envases metálicos</i>	39
4.4.5. <i>Criterio de clasificación</i>	40

4.5.	CÓDIGO DE CONTROL .....	41
4.6.	EJEMPLO DE DISEÑO .....	44
5.	CONCLUSIONES.....	52
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	54

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Envases del contenedor amarillo .....	6
Figura 2: Diferentes tipos de envases Tetrabrick.....	7
Figura 3: Diferentes tipos de envases metálicos .....	7
Figura 4: Diferentes tipos de envases de vidrio.....	8
Figura 5: Esquema general de una máquina de clasificación.....	8
Figura 6: Máquina de "reverse vending" .....	9
Figura 7: Estructura básica de un sistema de visión artificial .....	11
Figura 8: Histogramas de intensidad de píxeles de un envase tipo Tetrabrick y de una botella de plástico .....	12
Figura 9: Sistema de clasificación mediante ultrasonidos .....	12
Figura 10: Componentes básicos de un sistema de NIRS .....	14
Figura 11: Diferentes tipos de sensores inductivos .....	15
Figura 12: Placas microcontroladoras Arduino .....	16
Figura 13: PLC de la marca Siemens .....	17
Figura 14: PC industrial .....	18
Figura 15: Sensor capacitivo XT218A1PAL2.....	19
Figura 16: Sensor inductivo DW-AD-513-M30-120 .....	20
Figura 17: Barrera de medición CML-730i, emisor y receptor.....	21
Figura 18: Sensor de distancia óptico ODSL-8 .....	22
Figura 19: Célula de carga AS1 .....	23

Figura 20: Placa microcontroladora Arduino Uno .....	24
Figura 21: Esquema de alimentación general .....	27
Figura 22: Fuente de alimentación PS-230-24DC-1A .....	28
Figura 23: Acondicionamiento de las señales del sensor inductivo y del sensor capacitivo capacitivo .....	29
Figura 24: Relé para el acondicionamiento de señales .....	30
Figura 25: Acondicionamiento de las señales de los sensores de medición .....	31
Figura 26: Acondicionamiento de las señales de las células de carga .....	32
Figura 27: Amplificador para células de carga HX711 .....	33
Figura 28: Envases de muestra empleados para el cálculo de los coeficientes de clasificación .....	35
Figura 29: Envases plásticos empleados para el cálculo de los coeficientes de clasificación .....	36
Figura 30: Envases tipo Tetrabrick empleados para el cálculo de los coeficientes de clasificación .....	37
Figura 31: Envases de vidrio empleados para el cálculo de los coeficientes de clasificación .....	38
Figura 32: Envases metálicos empleados para el cálculo de los coeficientes de clasificación .....	39
Figura 33: Diagrama UML del funcionamiento general del sistema .....	42
Figura 34: Diagrama UML para el cálculo del coeficiente de clasificación .....	43
Figura 35: Plano general del sistema.....	44
Figura 36: Plano de la zona de clasificación.....	45
Figura 37: Detalle de la zona de clasificación.....	46
Figura 38: Disposición de los sensores y las células de carga.....	46
Figura 39: Vista de perfil de la plataforma de clasificación.....	47
Figura 40: Vista de perfil de la disposición de las barreras de medición.....	48
Figura 41: Vista de planta de la disposición de las barreras de medición .....	48
Figura 42: Vista de planta de la disposición del sensor de distancia.....	49
Figura 43: Colocación de componentes dentro de un armario .....	50

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características generales Arduino Uno .....	24
Tabla 2: Tensiones de alimentación de los componentes principales .....	26
Tabla 3: Tensiones de salida de los diferentes sensores.....	28
Tabla 4: Coeficientes de clasificación para envases plásticos .....	36
Tabla 5: Coeficientes de clasificación para envases tipo Tetrabrick .....	37
Tabla 6: Coeficientes de clasificación para envases de vidrio .....	38
Tabla 7: Coeficientes de clasificación para envases metálicos .....	39
Tabla 8: Valores de clasificación de los distintos tipos de envases .....	41

## 1. RESUMEN

En la actualidad la humanidad genera cada vez una mayor cantidad de residuos, por lo que el reciclaje es cada vez más importante para poder tratar toda esa cantidad de residuos. Sin embargo, la cantidad de residuos reciclados es relativamente baja si la comparamos con el volumen de residuos generados, debido principalmente a la baja implicación de la gente, que o bien no quiere reciclar en absoluto o bien lo hace pero de manera incorrecta. Este hecho implica mayores tiempos para reciclar debidamente los residuos, lo que a su vez se traduce en mayores gastos.

Actualmente existen máquinas capaces de separar los residuos según su naturaleza, aunque su principal inconveniente es que generalmente solo pueden separar dos tipos de residuos por vez, por lo que siguen requiriendo de una separación previa, ya sea por parte de un operario o por parte de las personas en sus propios hogares.

El presente trabajo tiene por objetivo diseñar un sistema capaz de clasificar diferentes tipos de envases según la naturaleza de su material en cuatro grupos diferentes: envases plásticos, envases metálicos, envases de vidrio y envases tipo Tetrabrick; de manera que permita facilitar y mejorar el proceso de reciclaje, reduciendo los tiempos de procesamiento y permitiendo obtener material reciclado de mayor pureza.

Para lograrlo, el sistema diseñado hace uso de una serie de sensores con los cuales es capaz de medir y pesar los envases, obteniendo un coeficiente propio para cada tipo de envase que hace que su clasificación sea rápida y sencilla, con un margen de error considerablemente bajo.

La elección de todos los componentes, tales como los sensores y el sistema de control, se realizará teniendo en cuenta que el sistema diseñado debe ser sencillo en sí y además que tenga una implementación sencilla, de manera que su utilización en aplicaciones determinadas no suponga grandes retos tanto técnicos como logísticos.

Palabras clave: residuos, envases, reciclaje, clasificación, automático.

## 2. ABSTRACT

Nowadays mankind generates a huge amount of waste, that's why recycling is more and more important to be able to manage that amount of waste. However, the volume of recycled waste is relatively low compared to all the generated waste, because of the low participation of people, who don't recycle at all or do it in the wrong way. This fact involves more time to properly recycle the rubbish, which in turn results in more expenses.

Today there are lots of machines capable of pulling apart the waste according to the nature of the material, although its major disadvantage is that they can only separate two kinds of materials at the same time, so they still need a previous classification, either by an operator or by people at their homes.

This project aims to design a system that is able to classify different kinds of packaging depending on the nature of its material in four different groups: plastic packaging, metal packaging, glass packaging and Tetrabrick carton packaging; so that it can improve and make the recycling process easier, reducing the processing times and allowing to get better quality recycled materials.

To achieve that goal, the designed system uses a series of sensors with which it can measure and weigh the packaging in order to calculate a coefficient that is particular for each type of packaging, which makes its classification quick and easy, with a very low error range.

The choice of each component, such as the sensors and the control system, will be made taking into account that the designed system must be easy to make and implement, in order that using it in certain applications will not involve major challenges both technical and logistical.

Key words: waste, packaging, recycling, classification, automatic.

## 3. INTRODUCCIÓN

### 3.1. ENUNCIADO

El presente trabajo tiene por finalidad el estudio y desarrollo de un sistema que permita facilitar las labores de reciclado en la primera fase del proceso de reciclaje, es decir, aquella que es realizada por los ciudadanos en sus hogares y/o lugares de trabajo. Se entiende por labores de reciclado el proceso de separar correctamente los diferentes tipos de residuos reciclables (plástico, vidrio, envases Tetrabrick, latas, etc.) y depositarlos en sus correspondientes contenedores de reciclado.

Para ello, se estudiarán todas las soluciones existentes que tengan relación con el problema planteado, así como todas aquellas posibles soluciones cuya implementación, ya sea de manera individual o de manera conjunta con otras soluciones, permita resolver de manera viable el problema planteado. Una vez analizadas todas las alternativas, se escogerán aquellas que mejor se adapten a las necesidades del sistema y cuya utilización sea lo más viable posible, lo que implica que deberá poseer un coste lo más asequible posible, que no suponga grandes retos de implementación tanto a nivel técnico como logístico, y sobretodo que no suponga ningún tipo de riesgo para todas aquellas personas con las cuales tendrá contacto durante su funcionamiento.

Tras la elección de sistemas de detección adecuados, se estudiará la forma de implementarlos de forma conjunta en el sistema, comprobando que no haya incompatibilidades entre ellos y que su uso conjunto es factible. Una vez se haya logrado un sistema de clasificación funcional, se diseñará el código de control que permitirá realizar el proceso de clasificación y además comunicarse con el sistema de control del sistema en el cual se implemente.

### 3.2. MOTIVACIÓN

La sociedad actual genera cada vez una mayor cantidad de residuos en el desarrollo de su vida diaria. Dentro de dichos residuos, una parte considerable está formada por residuos reciclables, aquellos que tras un correcto tratamiento pueden volver a ser utilizados en procesos de fabricación. Una amplia cantidad de gobiernos tratan de fomentar e impulsar el reciclaje, habilitando puntos de reciclaje para residuos muy variados así como llevando a cabo numerosas campañas informativas con el fin de concienciar a los ciudadanos de la importancia del reciclaje.

Sin embargo, a día de hoy, siguen siendo muchas las personas que no reciclan o que no lo hacen de manera correcta, ya sea por falta de tiempo, falta de motivación, falta de conocimiento o simplemente porque consideran que es una práctica innecesaria y que por lo tanto no merece la pena malgastar su tiempo en ella.

Surge por lo tanto la necesidad de diseñar un sistema capaz de contribuir a la labor del reciclaje a nivel público al mismo tiempo que motivar y ayudar a los ciudadanos a llevarla a cabo, consiguiendo que sea una tarea rápida y sencilla, que pueda ser realizada por cualquier persona, desde niños hasta personas mayores.

### 3.3. OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es diseñar un sistema de clasificación de envases, capaz de clasificar diferentes tipos de envases sin la necesidad de ayuda por parte de terceros en el propio proceso de clasificación, cuya utilización vaya dirigida principalmente a aplicaciones en entornos públicos.

El sistema deberá ser capaz de clasificar los envases en cuatro grupos diferentes: botellas y envases de plástico, botellas y envases de vidrio, latas y envases metálicos, y envases estilo Tetrabrick.

La clasificación será totalmente automática, es decir, que tras la colocación por parte del usuario de un envase en la zona de clasificación, el sistema estudiará el envase y lo clasificará en una de las categorías posibles, informando posteriormente de la naturaleza del envase al sistema principal que llevará a cabo las acciones pertinentes para guardarlo.

El objetivo del trabajo es el estudio y diseño del sistema de sensores para poder clasificar los envases, así como el código de control que permitirá a dicho sistema realizar la tarea de clasificación. Ni el lugar ni la forma de implementación del sistema diseñado en aplicaciones concretas serán objeto de estudio, sin embargo, para poder diseñar el sistema de manera correcta, se planteará una hipotética situación de aplicación, de manera que desde este momento todas las decisiones se tomarán suponiendo que el sistema final forma parte de la supuesta aplicación.

La supuesta aplicación consiste en una máquina de reciclado destinada al público, para instalarse en supermercados y/o centros comerciales con el fin de facilitar las labores de reciclado a aquellas personas que o bien no disponen de tiempo para reciclar debidamente o bien aquellas que tienen dificultades para ubicar un envase concreto en su grupo correspondiente.

Se supondrá que la aplicación final consta de una zona de clasificación cuyas dimensiones son 300 milímetros de largo por 300 milímetros de largo y 500 milímetros de alto. La zona de clasificación consta de una placa de material rígido que posee movimiento articulado por una de sus aristas, actuando como una trampilla una vez el proceso de clasificación ha finalizado. La función de dicha placa será además la de soportar las células de carga encargadas de realizar el pesaje de los envases, que a su vez soportarán otra placa de material rígido, que servirá de soporte a los sensores capacitivo e inductivo, así como a los envases que se coloquen en la zona de clasificación. Los envases se colocan en el centro de la plataforma de forma manual, por lo que no hay ningún tipo de actuador que intervenga en esta parte del proceso.

El sistema diseñado actuará como esclavo del sistema de control principal, de manera que su única función será la de determinar la naturaleza del envase y comunicar dicha información al sistema principal. Una vez el sistema principal conozca el tipo de envase del que se trata, realizará las acciones pertinentes para depositar el envase en su contenedor correspondiente, dependiendo del tipo de sistema de recogida del que disponga la aplicación final.

En el caso de que algún aspecto relevante en el diseño del sistema final no se haya indicado en este apartado, se indicará debidamente en el momento en el que dicha información sea necesaria.

### 3.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El desarrollo del trabajo se dividirá en cuatro partes.

La primera parte estará formada por la investigación previa, donde se estudiarán todas las soluciones posibles al problema planteado así como la justificación razonada de la elección de las soluciones escogidas. Se tendrán en cuenta en este apartado todos los antecedentes relacionados con el tema del trabajo, con el fin de conocer el estado actual del problema así como encontrar ideas para posibles soluciones.

La segunda parte del trabajo será aquella dedicada al desarrollo del sistema final, donde se estudiarán las mejores formas de implementar todas las soluciones escogidas con el fin de obtener un sistema que cumpla los objetivos del trabajo.

La tercera parte tendrá como objetivo el diseño del código de control que deberá emplear el sistema de control para que el proceso de clasificación se realice de manera correcta.

La última parte del trabajo consistirá en la aportación de toda la información complementaria necesaria para la comprensión y el desarrollo del sistema final, como pueden ser presupuestos, esquemas eléctricos, pliego de condiciones, etc.

### 3.5. ANTECEDENTES

En la actualidad, el ser humano genera una gran cantidad de residuos, tanto orgánicos como inorgánicos, para el desarrollo de su vida diaria. Dentro de los residuos generados, una parte considerable de los mismos son residuos reciclables y/o reutilizables, como pueden ser el papel, el vidrio, el plástico o los envases metálicos.

Sin embargo, si bien es cierto que los gobiernos están haciendo grandes esfuerzos por fomentar el reciclaje, como puede ser colocando contenedores específicos para cada tipo de residuo o construyendo grandes centros de gestión de residuos, la cantidad de residuos reciclados es relativamente baja. Por ejemplo, según un informe del Instituto Nacional de Estadística publicado el 7 de diciembre de 2015, en España, en el año 2013, tan solo el 55.3% de los residuos generados fue reciclado.

Una de las principales causas de la reducida tasa de reciclaje, es que ante la elevada variedad de residuos que pueden reciclarse, algunos son reciclados de forma incorrecta, mezclándolos con otros tipos de residuos, o no son reciclados directamente, por lo que acaban en el contenedor de residuos orgánicos.

Uno de los mayores grupos de residuos reciclables, que engloba una amplia variedad de tipos de envases, es el de los comúnmente denominados "plásticos" (Figura 1), aquellos que se depositan en el contenedor amarillo. Este grupo engloba residuos tales como envases de plástico, envases compuestos de varios materiales, como por ejemplo los Tetrabriks, y envases metálicos como pueden ser latas de refresco o botes de conserva.



Figura 1: Envases del contenedor amarillo

Para separar estos tipos de residuos unos de los otros, existen diversos métodos, como por ejemplo, separar en primer lugar los envases plásticos de los metálicos (Omar, Oscar, Andres, & Francisco, 2013). El siguiente paso consistiría en clasificar por un lado los envases fabricados íntegramente con plástico, como pueden ser botellas y envases, y por otro lado aquellos que están fabricados por una mezcla de materiales, como son los Tetra Bricks (Figura 2) (House, Capson, & Schuurman, 2011) (Nawrocky, Schuurman, & Fortuna, 2010).



Figura 2: Diferentes tipos de envases Tetrabrick

Incluso una vez separados por grupos de material, es posible separar aún más los residuos reciclables. Los envases de plástico por ejemplo, pueden separarse según el tipo de plástico empleado (Shahbudin, Hussain, Wahab, Marzuki, & Ramli, 2010), de manera que tras el reciclado el material posea la mayor pureza posible. Y al igual que los plásticos, los residuos metálicos también pueden clasificarse según la naturaleza del metal utilizado (Figura 3) (Gonzalez & Woods, 1993).



Figura 3: Diferentes tipos de envases metálicos

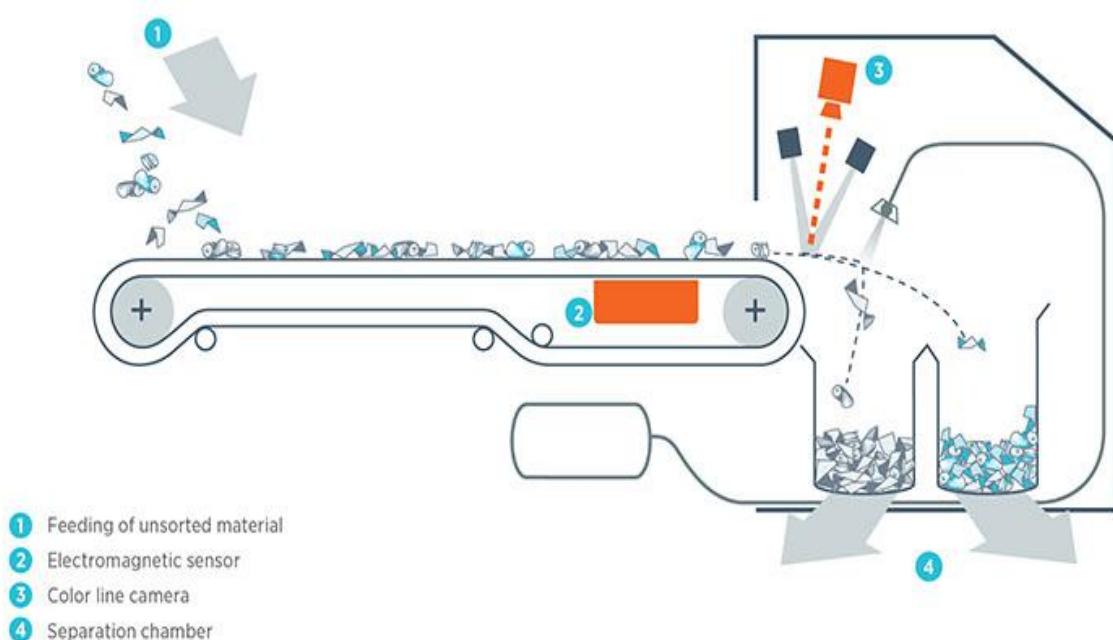
El grupo de los vidrios engloba principalmente todo tipo de envases y botellas de cristal, aunque es muy frecuente encontrar también objetos como vajillas rotas, espejos o bombillas (Figura 4). Existen en la actualidad aparatos que se emplean para

comprobar el estado de las botellas recicladas para su posible reutilización (Duan, Wang, Liu, & Tan, 2004), por lo que podría estudiarse la posibilidad de modificar dichas máquinas para que fuesen capaces de detectar los diferentes tipos de envases y separarlos según el tipo de material, es decir, vidrio u otros.



*Figura 4: Diferentes tipos de envases de vidrio*

La gran mayoría de los sistemas de reciclado automático actuales, son sistemas industriales, encargados de procesar gran cantidad de residuos a una elevada velocidad.



*Figura 5: Esquema general de una máquina de clasificación*

Por lo general, todas las máquinas de clasificación de residuos poseen una estructura similar a la de la Figura 5. Los residuos a clasificar se introducen en la máquina generalmente a través de una cinta transportadora (1), cuya anchura depende de la capacidad de procesamiento del sistema. Los residuos de la cinta pasan por una serie de sensores (2 y 3), diferentes en cada caso según la naturaleza del residuo que

se clasifique, y en función de la información aportada por los sensores los residuos se separan en diferentes contenedores (4) con ayuda de varios inyectores de aire a presión.

La principal limitación de este tipo de sistemas se halla en la necesidad de una clasificación previa antes de la entrada de los residuos a la máquina. Al estar diseñadas para clasificar materiales muy determinados, por ejemplo, diferentes tipos de plásticos o diferentes tipos de metales, su funcionamiento con dicho tipo de material es óptimo, sin embargo, si en una máquina de clasificación de plásticos se cuela por error un envase metálico o de vidrio, el sistema es incapaz de clasificarlo. Por lo tanto se precisa una clasificación previa, que en muchas ocasiones es realizada por personal humano, que implica un incremento en el coste del proceso de reciclaje así como en el tiempo que tarda este en llevarse a cabo.

Además del método convencional de clasificación de residuos, el industrial mencionado anteriormente, se está implantando en los últimos años un sistema de reciclaje con incentivos. Conocido también como Sistema de Depósito, Devolución y Retorno (SDDR) o "reverse vending", plantea crear un sistema de reciclado en el cual se incentive al usuario por el reciclaje de envases. Implantado desde hace años en países como Alemania, Suecia, Estados Unidos, ha demostrado elevar considerablemente el porcentaje de envases que se reciclan al año.

Este sistema hace uso de unas máquinas diseñadas especialmente para el caso, cuya estructura es similar a la de la Figura 6.



Figura 6: Máquina de "reverse vending"

Se pueden diferenciar dos partes importantes en este tipo de máquinas. La primera es la encargada de recoger los envases y es la que se encuentra a la vista del público. Incorpora los sensores y actuadores necesarios para recoger el envase que se le introduce, identificarlo y enviarlo a la parte de clasificación. También es el encargado de calcular y proporcionar el incentivo adecuado por cada tipo de envase.

La segunda parte de la máquina consta del sistema de clasificación y almacenaje. Una vez el envase llega a esta zona, ya ha sido identificado por el sistema de sensores por lo cual solamente queda depositarlo en el contenedor adecuado.

Por lo general, este tipo de sistemas trabajan únicamente con dos tipos de envases, los reutilizables y los reciclables. Dentro del primer grupo entran todas las botellas de refrescos y bebidas que pueden volver a utilizarse sin la necesidad de destruir el envase, que son casi exclusivamente los envases de vidrio. En el segundo grupo entrar todos aquellos envases que son susceptibles de reciclarse para producir unos nuevos, como son las botellas de plástico y las latas de aluminio.

La limitación de este tipo de máquinas reside en la poca variedad de envases que gestionan, puesto que han sido diseñadas para identificar envases plásticos, metálicos y de vidrio destinados a bebidas. Por lo tanto quedan excluidos todo el resto de envases que se emplean en la industria alimenticia, como pueden ser envases tipo Tetrabrick, latas de conservas o botes de vidrio.

La idea principal es por lo tanto buscar una manera de aunar estos dos métodos de reciclaje, el industrial y el de incentivos, con el fin de crear un sistema capaz de clasificar cualquier tipo de envase y que pueda ser empleado por cualquier ciudadano.

## 3.6. POSIBLES SOLUCIONES Y ALTERNATIVAS

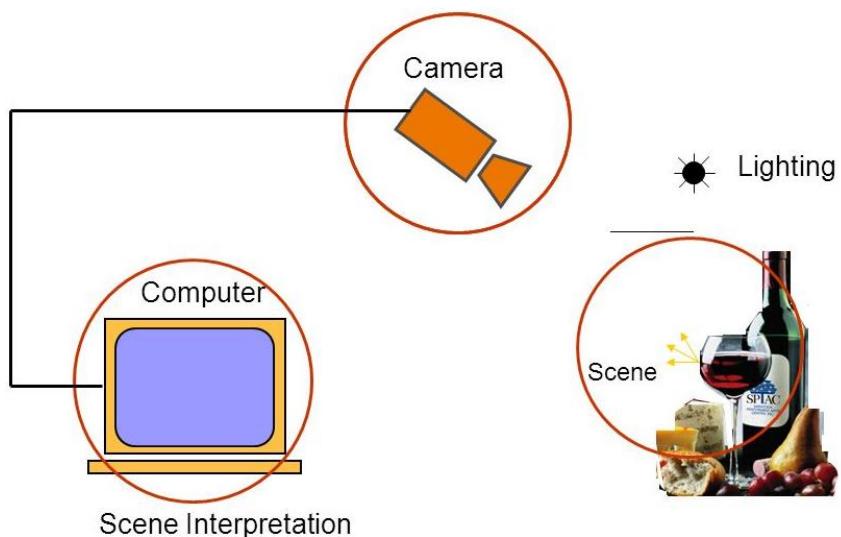
### 3.6.1. *Métodos de detección y clasificación*

Con el fin de poder obtener un sistema capaz de clasificar una amplia variedad de materiales, es necesario conocer todas aquellas tecnologías existentes capaces de clasificar de manera precisa diferentes tipos de materiales. Estas tecnologías pueden estar dirigidas a la clasificación de materiales dentro de un grupo específico, como por ejemplo diferentes tipos de plásticos, o pueden incluso ser capaces de distinguir materiales de diferente naturaleza, como por ejemplo distinguir entre plásticos y metales.

Una de las primeras técnicas de las cuales podría hacerse uso es la visión artificial. La visión artificial consiste en el procesamiento de imágenes captadas por una cámara, generalmente en tiempo real, para extraer de dichas imágenes algún tipo de información relevante para el proceso productivo en el cual se encuentra implementada. Por lo general, este tipo de técnicas se emplean en procesos productivos para la detección de contornos y formas así como para llevar a cabo controles de calidad.

Los componentes básicos de un sistema de visión artificial (Figura 7) son una cámara, un sistema de iluminación adecuado y un sistema capaz de procesar las imágenes y tomar decisiones en función de los resultados obtenidos. Se trata por lo tanto de un sistema cuya implementación es relativamente sencilla y cuyo uso es igual de fácil ya que se trata de una técnica muy perfeccionada a lo largo de los años.

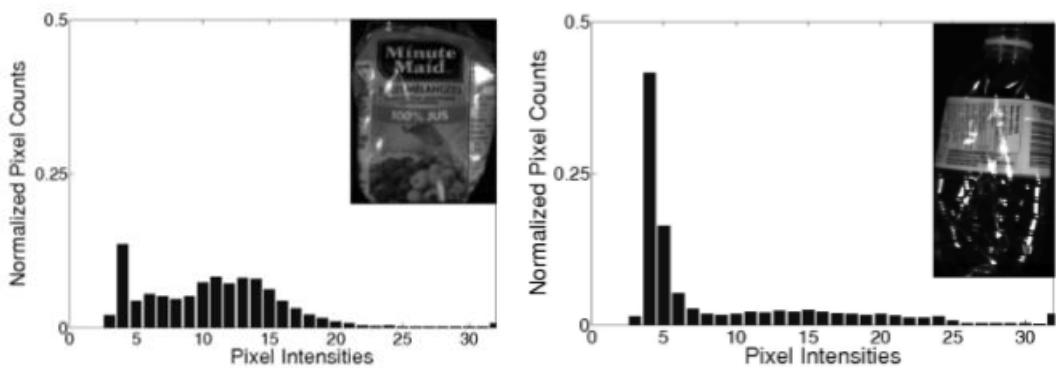
El principal inconveniente que presenta dicha tecnología en la aplicación a nuestro caso de uso es que, debido a la amplia variedad en cuanto a formas de los envases que deseamos clasificar, el nivel computacional requerido podría ser algo elevado, lo cual implicaría usar sistemas de procesamiento potentes, lo cual daría lugar a un mayor coste de implementación.



*Figura 7: Estructura básica de un sistema de visión artificial*

Un método similar al anterior consiste en el estudio de los histogramas de la intensidad de los píxeles de una imagen en escala de grises para determinar la naturaleza de un envase. Esta técnica se basa en el principio de que una imagen tomada de los diferentes envases expuestos a una misma fuente de luz contiene variaciones de intensidad en función del tipo de material del cual esté fabricado el envase.

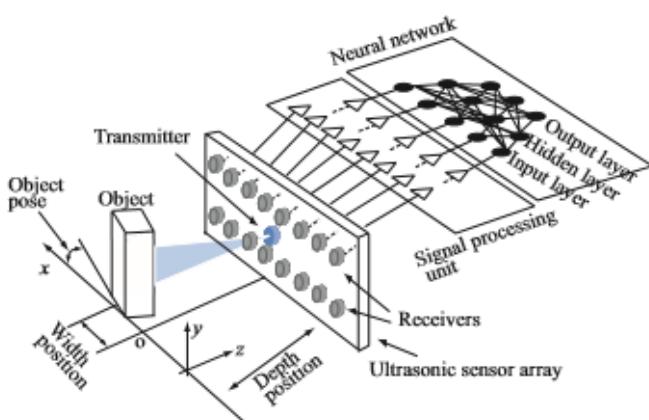
De esta manera, los envases plásticos, al ser en gran parte transparentes, presentan una alta cantidad de píxeles cuya intensidad es baja, mientras que por su parte, los envases tipo Tetrabrick, al ser totalmente opacos, presentan una distribución más uniforme de intensidades, que depende en gran medida del tipo de decoración y etiquetado del que disponga el envase (Figura 8).



*Figura 8: Histogramas de intensidad de píxeles de un envase tipo Tetrabrick y de una botella de plástico*

Entre las ventajas de este método encontramos que se trata de un método cuya implementación es sencilla y barata, pues solo requiere de una cámara con una buena resolución, un buen sistema de iluminación y ordenador capaz de procesar las imágenes. Además, este método ofrece resultados fiables sea cual sea la orientación o el tamaño de los envases. Sin embargo, también presenta numerosos inconvenientes, y es que su eficacia depende en gran medida del aspecto del envase a tratar, de manera que un Tetrabrick con colores claros o con gran capacidad de reflexión podría ser clasificado como una botella y de igual manera una botella translúcida u opaca con un diseño colorido podría ser clasificada como un Tetrabrick. Por otra parte, la clasificación de otros tipos de envases como pueden ser envases de vidrio o envases metálicos sería una labor difícil, ya que los envases de vidrio, por sus características visuales, son bastante similares a los envases plásticos, mientras que los envases metálicos, dependiendo del tipo de etiquetado que lleven, no tienen unas características visuales fijas que sirvan de punto de partida.

Otra técnica de identificación posible es el uso de los ultrasonidos. Haciendo uso de una red de sensores de ultrasonidos (Figura 9), y con la programación adecuada, es posible estudiar la forma, tamaño e incluso material de un objeto determinado.



*Figura 9: Sistema de clasificación mediante ultrasonidos*

El principio en el que se basa dicho sistema para identificar el tamaño y la forma de los objetos es el tiempo transcurrido entre la emisión de un haz ultrasónico y la recepción del mismo. Midiendo el tiempo transcurrido para cada uno de los receptores es posible calcular la trayectoria y distancia recorrida por el haz, de manera que combinando los resultados de cada receptor se puede conocer la forma y tamaño del objeto estudiado con bastante precisión.

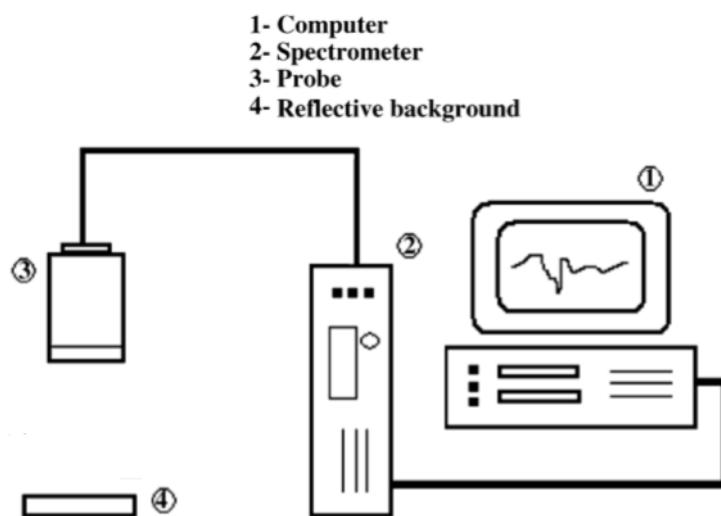
En cuanto a la detección del material, el principio que se aplica es el de atenuación de la potencia del pulso emitido. Conociendo la potencia inicial del pulso, calculado las atenuaciones que se producen a lo largo del trayecto de este y midiendo la potencia del pulso a la llegada de los receptores, es posible calcular la potencia que ha sido atenuada por el objeto a analizar. Dicha potencia atenuada depende, entre otros factores, del material del objeto, de manera que conociendo todos los factores anteriormente nombrados, es posible hacer una estimación de la naturaleza del objeto estudiado.

Si bien se trata de un método relativamente sencillo, su mayor dificultad a la hora de implementarlo reside en la necesidad de programar correctamente todas las fórmulas matemáticas implicadas en los cálculos. Sin embargo, se trata de un método poco práctico, ya que su fiabilidad depende estrechamente de la posición y distancia a la que se coloque el objeto, ya que esto puede dar falsas lecturas de datos, así como en los materiales a analizar, ya que ciertos materiales atenúan de manera excesiva el pulso ultrasónico, pudiendo de igual manera aportar datos erróneos al análisis.

El siguiente método de clasificación de materiales es la denominada "Espectroscopia del Infrarrojo Cercano" o NIRS, de sus siglas en inglés. Esta técnica consiste en la emisión de un haz infrarrojo con una longitud de onda comprendida entre 800 y 2500 nanómetros, que se hace impactar sobre la muestra a analizar, ya sea sólido, líquido o gaseoso, y recoger la onda reflejada para su posterior análisis. Dicho análisis consiste en observar que frecuencias del rango han sido absorbidas por la muestra tras la incidencia del haz, con el fin de poder identificar la composición de la misma.

Dicha identificación es posible gracias a que cada tipo de molécula y unión intermolecular absorbe una energía determinada cuando el haz infrarrojo impacta sobre ellos. Al tratarse de energía electromagnética, una vez la muestra ha absorbido todas las longitudes de onda características de cada material de su composición, el haz reflejado está formado por todas las longitudes de onda iniciales, excepto aquellas que fueron absorbidas. Por lo tanto, conociendo la frecuencia característica que absorbe cada tipo de material, es posible determinar su composición con extremada precisión.

Un sistema de NIRS está formado principalmente por los componentes indicados en la Figura 10. Consta de un ordenador capaz de analizar los datos, un espectrómetro, que se encarga de medir el haz infrarrojo reflejado por la muestra, el emisor y receptor de rayos infrarrojos y un fondo reflectante, diseñado para no absorber ninguna de las longitudes de onda del espectro en el cual se trabaja.



*Figura 10: Componentes básicos de un sistema de NIRS*

Entre las ventajas que aporta este método, encontramos que se trata de un método no invasivo y no destructivo, por lo que la muestra a analizar por lo general no requiere de ningún tratamiento previo. Otra ventaja es que se trata de un método muy rápido, ya que la muestra es irradiada y el rayo es analizado en apenas unos segundos. Además su coste, debido a los avances que se han dado en el campo y en las tecnologías implicadas, no es muy elevado, lo que incrementa su viabilidad de implantación. En cuanto a las desventajas, la principal de ellas a la hora de aplicarlo a nuestro caso, es que este método no es efectivo con todos los tipos de enlaces y materiales. Su gran eficacia reside en el análisis y estudio de materiales plásticos y derivados del petróleo, y por lo general cualquier material en cuya constitución estén implicados grupos C-H, O-H o N-H, por lo tanto el uso de este método para clasificar materiales metálicos o cerámicos no sería útil en absoluto.

Un posible método de clasificación podría basarse en métodos de detección de materiales. Por ejemplo, para los envases metálicos, pueden emplearse sensores inductivos (Figura 11), que se activarían al detectar dicho material, permitiendo de esta manera una clasificación rápida y fiable.

Sin embargo, los envases metálicos están fabricados principalmente con tres tipos de materiales: hojalata electrolítica, acero libre de estaño (TFS) o aluminio. El principal inconveniente de los sensores inductivos es que cuanto más conductor es el material a

detectar, la distancia de detección es menor. Esto quiere decir que para detectar los envases metálicos, será necesario acercarlos lo más posible al sensor, lo cual puede suponer dificultades a la hora de diseñar el soporte del conjunto del sistema y de establecer la colocación de los sensores.

El principal inconveniente de este tipo de sensores es que solo podrían utilizarse para la detección de materiales metálicos, quedando excluidos tanto los plásticos, como los vidrios, como los envases tipo Tetrabrick.



Figura 11: Diferentes tipos de sensores inductivos

Otra forma muy cómoda de clasificar los materiales puedes ser atendiendo a alguna de sus propiedades físicas. De entre las propiedades físicas que más podrían ser de utilidad en nuestra aplicación, destacan la densidad, la resistividad o la permitividad.

Todas estas propiedades físicas son diferentes en cada material, de manera que conociendo los valores de alguna de ellas, sería posible clasificar cualquier envase de forma rápida y precisa. El principal inconveniente reside en que dichas magnitudes no son fácilmente medibles. La densidad por ejemplo, se podría determinar midiendo el volumen exterior de un envase determinado y su peso, pero al ser los envases huecos en su interior, el valor obtenido de la densidad no sería exacto y podría dar lugar a clasificaciones incorrectas.

En cuanto a la resistividad y a la permitividad, actualmente existen equipos técnicos capaces de medir dichos parámetros en cuestión de segundos. Su principal inconveniente es que se trata por lo general de equipos de laboratorio, que analizan muestras estandarizadas y normalizadas en condiciones controladas. Una solución posible podría residir en adaptar dichos instrumentos para que pudiesen operar en entornos no controlados y ser capaces de analizar muestras de diferentes tamaños y formas.

### 3.6.1. Sistemas de control

Puesto que el sistema a diseñar debe tener la capacidad de tomar decisiones, al deber ser capaz de clasificar un envase en una de las cuatro posibilidades posibles, es preciso que disponga de un sistema de control capaz de procesar la información aportada por los sensores y tomar las decisiones y acciones pertinentes.

El primer elemento de control al cual se puede recurrir es una placa microcontroladora (Figura 12). Su principio de funcionamiento se basa en un microcontrolador, al cual se han añadido una serie de módulos adicionales, tales como puertos E/S, módulo de comunicaciones, módulo de batería, etc., de forma que pueda ser empleado de manera sencilla y rápida.

Entre sus ventajas destacan el coste relativamente bajo, comparado con la cantidad de opciones que ofrece, así como su facilidad de programación e implementación. Esto se debe a que se puede programar directamente en lenguaje C++ y con ayuda de un ordenador con el programa adecuado, sin necesidad de componentes o periféricos adicionales.

Las principales limitaciones de estas placas residen en el relativamente escaso número de entradas y salidas que son capaces de manejar sin necesidad de expansiones de puertos E/S, así como las tensiones de trabajo que por lo general son de máximo 5 voltios de tensión continua, tanto para entradas como para salidas, ya sean digitales o analógicas.

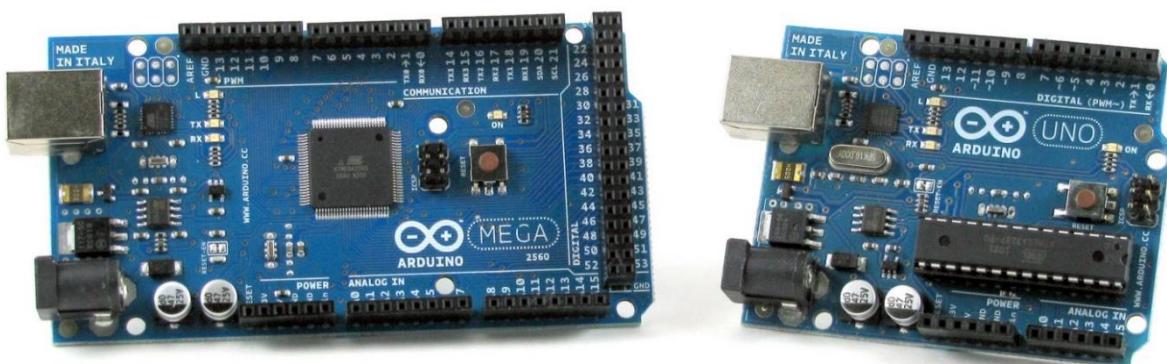


Figura 12: Placas microcontroladoras Arduino

Otro posible método de control es el controlador lógico programable o PLC (Figura 13). Su principio de funcionamiento es algo similar al de las placas microcontroladoras, ya que también dispone de microcontrolador, puertos E/S, módulos de comunicación y similares. Su principal diferencia radica en que está destinado a usos más industriales.

Se trata de sistemas más simples y robustos, con mayor facilidad de expansión de entradas y salidas y capaces de trabajar a una tensión superior que una placa microcontroladora.

Sus principales inconvenientes residen en que trabajan en un lenguaje de programación algo más bajo que los anteriores, por lo que para que sean capaces de realizar tareas relativamente complejas, es necesario igualmente un código de ejecución complejo. Otro inconveniente considerable es su precio, ya que al estar dirigido a usos industriales, es bastante superior al de una placa microcontroladora.



Figura 13: PLC de la marca Siemens

Por último, encontramos entre los posibles métodos de control el PC industrial (Figura 14). La esencia de un PC industrial es la de combinar las posibilidades computacionales de un ordenador convencional con la robustez y el reducido tamaño de un PLC. Son por lo tanto ordenadores de reducido tamaño diseñados específicamente para trabajar en entornos industriales, es decir, que son menos susceptibles a los ruidos electromagnéticos y demás perturbaciones generadas en un proceso industrial que un ordenador convencional.

Son ideales para controlar procesos productivos con una amplia cantidad de componentes, incluidos PLCs, además de que permiten mayores opciones de control, ya que a diferencia de los métodos de control mencionados anteriormente, el PC industrial es capaz de realizar varias tareas de forma simultánea, por lo que la carga de trabajo e información que es capaz de generar es considerablemente superior.

Entre sus inconvenientes, destacan el precio, ya que el coste de este tipo de equipos es muy elevado y además requieren de un elevado conocimiento de informática para su configuración y uso.



*Figura 14: PC industrial*

### 3.7. JUSTIFICACIÓN DE LAS SOLUCIONES ELEGIDAS

Tras estudiar las diferentes posibilidades de detección y clasificación que existen para dar solución al problema planteado, se ha decidido plantear y desarrollar un sistema de clasificación formado por tres partes o etapas.

En la primera etapa, se plantea emplear un sensor capacitivo como punto de inicio del proceso de clasificación. La principal razón para emplear dicho sensor para tal efecto es que son capaces de detectar la presencia de cualquier material, por lo cual son idóneos para tal caso.

La segunda etapa forma parte del proceso de clasificación. En dicha etapa, se plantea emplear un sensor inductivo para materiales no ferreos. Dicho sensor servirá como primer filtro del envase a clasificar, ya que si se trata de un envase metálico, se detectara directamente, y en caso de no serlo las posibilidades de clasificación del envase se reducirán a tres opciones (plástico, Tetrabrick o vidrio).

En la última etapa del proceso se llevará a cabo la clasificación final del envase en caso de que este no sea metálico. Para tal caso, se plantea el diseño de un sistema basado en sensores de distancia y sensores de peso, con el fin de determinar un coeficiente característico para cada envase. Con ayuda de dicho coeficiente será posible clasificarlo dentro de uno de los tres grupos posibles, ya que cada grupo tendrá unos valores similares de dicho coeficiente.

En lo referente al método de control, se ha optado por emplear una placa microcontroladora Arduino, debido principalmente a su reducido coste. Además, con la placa Arduino disponemos de las suficientes entradas y salidas como para poder conectar todos los sensores implicados en el sistema. Otro punto a favor de Arduino es que emplea como lenguaje de programación C++, un lenguaje muy sencillo e intuitivo que facilitará en gran medida el diseño del proceso de control y toma de decisiones del sistema final.

Una vez escogidas las tecnologías a emplear, el siguiente paso es escoger adecuadamente todos los componentes que van a formar parte del sistema. A continuación se detalla la elección de los componentes más importantes del sistema, que son el sistema de control, el sensor capacitivo, el sensor inductivo, los sensores de medición y la célula de carga.

### 3.7.1. *Métodos de detección y clasificación*

#### 3.7.1.1. *Elección del sensor capacitivo*

Para la elección del sensor capacitivo, las características requeridas no son muy elevadas. En primer lugar es preferible que trabaje a una tensión similar a la del Arduino, con el fin de poder compartir fuente de alimentación y simplificar el esquema eléctrico. Por otra parte, y teniendo en cuenta que algunos envases tiene formas irregulares, se buscará un sensor cuya distancia de detección sea de unos 5 milímetros, para que sea capaz de detectar aquellos objetos que tengan algún tipo de hendidura en el fondo. Por último, sopesando la posibilidad de que el sensor escogido podría en algún momento de su uso verse expuesto a algún tipo de líquido o suciedad, se escogerá un sensor que cuente con un índice de protección adecuado.

Teniendo en cuenta todas las consideraciones mencionadas, el sensor capacitivo escogido es un sensor de la marca *Telemecanique*, modelo XT218A1PAL2 (Figura 15). Se trata de un sensor con cuerpo de plástico, con un alcance de 8mm y que puede trabajar con una tensión continua de entre 12 y 24 voltios. Cuenta además con un índice de protección IP67, lo que garantiza protección tanto contra polvo como contra cualquier clase de líquidos.



Figura 15: Sensor capacitivo XT218A1PAL2

#### 3.7.1.2. *Elección del sensor inductivo*

En el caso del sensor inductivo, las características que se buscan son similares a las del capacitivo, tanto en tensión de trabajo, como en protección y distancia de detección. Sin embargo, en este último aspecto hay un detalle a tener en cuenta. Los sensores inductivos son capaces de detectar todo tipo de metales, aunque según el tipo de metal que vaya a detectar, la distancia de detección cambia en función de un determinado factor, característico de cada metal. Por lo tanto, se deberá contemplar el

peor escenario posible a la hora de establecer la distancia de detección. Tras revisar varios catálogos de diferentes fabricantes de sensores inductivos, se ha observado que el peor metal para ser detectado es el aluminio. Para detectar dicho material debe aplicarse un factor de 0.1 a la distancia de detección nominal, es decir, que la distancia de detección para un envase de aluminio es 10 veces menor que para un envase de acero.

Tras comparar varios sensores y aplicar como filtro las características mencionadas en el párrafo anterior, el sensor inductivo escogido es un sensor del fabricante Contrinex, modelo DW-AD-513-M30-120 (Figura 16). Se trata de un sensor con cuerpo de latón cromado, capaz de trabajar con tensiones de entre 10 y 30 voltios y que posee un índice de protección IP67. El modelo escogido tiene un alcance nominal de 40 milímetros, por lo que si aplicamos el factor para el metal más desfavorable, el aluminio, se obtiene una distancia de detección de 4 milímetros. Se considera que es distancia suficiente ya que los envases metálicos no suelen tener hendiduras muy pronunciadas en sus bases, exceptuando las latas de refrescos que igualmente entrarían dentro del rango de detección.



*Figura 16: Sensor inductivo DW-AD-513-M30-120*

### 3.7.1.3. Elección de los sensores de medición

La elección de los sensores de medición es, junto con la elección de la célula de carga, uno de los puntos más importantes de todo el sistema. Esto es así debido a que van a ser los componentes encargados de la tarea más compleja y relevante de todo el proceso, la de distinguir los envases plásticos de los envases de vidrio y de los envases tipo Tetrabrick. Deben ser por lo tanto sensores precisos y fiables además de rápidos, para que el proceso de clasificación del envase se lleve a cabo en el menor tiempo posible.

Una de las primeras características que deben cumplir los sensores de medición es, al igual que en los casos anteriores, que trabajen a una tensión similar a la del Arduino. Otro aspecto importante relacionado con el sistema de control es que deben tener preferiblemente salida analógica en tensión, con el fin de que su lectura sea rápida y que su implementación no implique gran cantidad de código. En cuanto a la resolución,

no se busca que sea extremadamente pequeña, será suficiente con una resolución igual o menor a cinco milímetros, cuanto más pequeña mejor.

Tras estudiar diferentes alternativas y teniendo en cuenta las especificaciones mencionadas, se ha optado por emplear dos tipos diferentes de sensores para la tarea de determinar el volumen de los envases. Por una parte, para la medición del ancho y el largo del envase, se emplearán barreras de medición, un par (emisor y receptor) para cada dimensión. Las barreras escogidas son de la empresa *Leuze electronic*, modelo CML-730i (Figura 17). Dicho sensor puede trabajar con tensiones de entre 18 y 30 voltios, proporciona una salida analógica en tensión de entre 0 y 10 voltios, tiene una resolución de 5 milímetros, un tiempo de medición de 1 milisegundo y cuenta con un índice de protección IP65. Además está diseñado de manera que permite la medición de envases transparentes, lo cual es de gran importancia en la aplicación.

El principal inconveniente de este sensor, y de prácticamente todos los de su estilo del mercado, es que tanto la tensión de trabajo como la tensión de salida son superiores a las tensiones máximas soportadas por el Arduino, tanto para alimentación como para entradas. Por lo tanto será necesario disponer de dos ramas de alimentación diferentes y de adaptar la tensión de salida del sensor con el fin de no estropear el sistema de control.

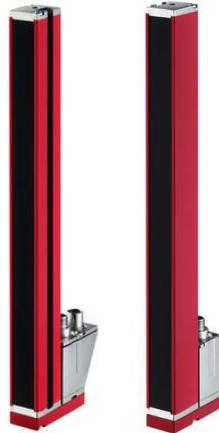


Figura 17: Barrera de medición CML-730i, emisor y receptor

Puesto que las barreras vienen en longitudes determinadas, con el fin de garantizar que el sistema es capaz de tratar con la mayor cantidad de envases posibles, dichas barreras tendrán una longitud de 320 milímetros. De esta manera se asegura que incluso los envases más grandes, como pueden ser garrafas de agua o aceite, se podrán clasificar sin ningún tipo de problemas.

Para la medición de la altura de los envases, se ha optado por emplear un sensor de distancia óptico láser, del fabricante *Leuze electronic*, modelo ODSL-8 (Figura 18).

Precisa de una tensión de alimentación de entre 18 y 30 voltios, proporciona una salida analógica entre 0 y 10 voltios, tiene una resolución de 0.5 milímetros, un tiempo de medición entre 2 y 7 milisegundos y cuenta con un índice de protección IP67.

Al igual que ocurría con las barreras, las tensiones tanto de alimentación como de salida no son compatibles con Arduino, por lo que habrá que adaptarlas de igual manera.



*Figura 18: Sensor de distancia óptico ODSL-8*

De la misma manera que ocurría con las barreras, este tipo de sensores tiene amplios rangos de medición. En este caso, por los mismos motivos que en el caso anterior, se ha elegido un sensor con un rango de entre 20 y 500 milímetros, permitiendo así al sistema trabajar con envases de grandes dimensiones.

#### *3.7.1.4. Elección de la célula de carga*

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la célula de carga es, junto a los sensores de medición, el elemento más importante del sistema. Dicha célula de carga debe tener la sensibilidad suficiente como para poder medir el peso de los envases ligeros (envases plásticos, envases metálicos y envases Tetrabrick) y al mismo tiempo tener una capacidad máxima lo suficientemente elevada como para poder soportar la plataforma de pesado junto con los sensores. Además deberá ser capaz de trabajar a tensiones similares a las del resto de sensores con el fin de que el circuito de alimentación sea lo más sencillo posible.

Tras una exhaustiva búsqueda, se ha comprobado que en el mercado de las células los rangos de pesado más comunes empiezan en 5 y 10 kilogramos, y a partir de ahí van en aumento, mientras que las células de carga más pequeñas y con los menores rangos tan solo admiten cargas de hasta 1 kilogramo. Ninguna de las dos opciones es aplicable a la aplicación ya que las primeras apenas tienen sensibilidad para medir cargas pequeñas, mientras que las segundas serían una restricción a la hora de poder manejar todo tipo de envases, ya que algunos envases grandes de vidrio pueden llegar a pesar más de un kilogramo, por lo que quedarían fuera de rango si tenemos además en cuenta el peso de la plataforma de pesaje y el peso de los sensores.

Por lo tanto, se ha decidido emplear dos células de carga idénticas, de un kilogramo de capacidad cada una, con el fin de poder medir una carga máxima de dos kilogramos con una sensibilidad relativamente elevada. Las células de carga escogidas pertenecen a la empresa *Laumas Elettronica* y corresponden al modelo AS1 (Figura 19). Estas células admiten una tensión de alimentación máxima de 15 voltios, tienen una sensibilidad de 2 mV/V y cuentan con un índice de protección IP65.



Figura 19: Célula de carga AS1

El principal problema que plantean las células de carga es que proporcionan una tensión de salida muy pequeña, por lo que la placa Arduino no será capaz de ofrecer una lectura clara de la carga que soportan. Será necesario por lo tanto adaptar las señales de salida de las células a unos niveles de tensión lo suficientemente elevados para que el controlador pueda leerlos, o en su defecto convertir dicha señal analógica en una señal digital con ayuda de un convertidor AD.

### 3.7.2. Sistema de control

Tal y como se ha mencionado en el punto 3.7, el sistema de control escogido se basará en una placa microcontroladora Arduino. Esta decisión se debe principalmente al reducido coste que tiene dichas placas, comparado con el de otras placas similares y los otros sistemas de control posibles, y a la gran facilidad de implementación y programación que dichas placas ofrecen.

Sin embargo, existen diferentes modelos de placas Arduino, por lo que será necesario escoger aquella que mejor se adapte a nuestras necesidades. El punto más importante para escoger adecuadamente es asegurar que la placa cuente con entradas suficientes para poder recibir información de todos los sensores. En nuestro caso, la placa deberá contar, como mínimo, con dos entradas digitales, para los sensores capacitivo e inductivo, así como con cinco entradas analógicas, para los sensores de medición y las células de carga.

Teniendo en cuenta estas condiciones, la placa que mejor se adapta es la placa Arduino Uno (Figura 20). Entre sus características relevantes para la aplicación, cuenta

con un total de 14 puertos digitales, que pueden configurarse tanto como entradas como salidas, y 6 entradas analógicas, a las cuales puede aplicarse una tensión máxima de 5V. Además permite obtener tensiones de salida de 3.3V y 5V en caso de que se requieran, evitando así la necesidad de añadir fuentes de alimentación adicionales al sistema eléctrico. Un resumen del resto de las características de la placa Arduino Uno puede verse en la Tabla 1.



*Figura 20: Placa microcontroladora Arduino Uno*

<b>Microcontrolador</b>	ATmega328P
<b>Tensión de trabajo</b>	5V
<b>Tensión de alimentación (recomendada)</b>	7-12V
<b>Tensión de alimentación (límite)</b>	6-20V
<b>Entradas/salidas digitales</b>	14 (de las cuales 6 pueden proporcionar salida PWM)
<b>Entradas analógicas</b>	6
<b>Corriente en los pines de Entradas/salidas</b>	20 mA
<b>Corriente en el pin de 3.3V</b>	50 mA
<b>Memoria Flash</b>	32 KB de los cuales 0.5 se emplean para el bootloader
<b>SRAM</b>	2 KB
<b>EEPROM</b>	1 KB
<b>Velocidad de reloj</b>	16 MHz
<b>Dimensiones y peso</b>	68.6x53.4 mm y 25 g

*Tabla 1: Características generales Arduino Uno*

## 3.8. NORMATIVA APLICABLE

Con el fin de que el sistema diseñado cumpla todas las normas establecidas dentro de los diferentes ámbitos a los que pertenece, se aplicarán y seguirán a lo largo del desarrollo del mismo las normas, leyes y/o directivas nombradas a continuación.

En primer lugar, puesto que el sistema diseñado contará con componentes eléctricos y electrónicos, deberá atenerse al Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, Real Decreto 842/2002.

Al tratarse de un sistema que contará con un sistema electrónico programable, deberá atenerse a las normas e informes técnicos de la Comisión Electrotécnica Internacional para la estandarización de los sistemas programables, IEC-61131.

Puesto que el fin último del sistema a desarrollar será la manipulación y clasificación de envases, deberá tenerse a las diferentes normativas y leyes, tanto europeas como nacionales, creadas para tal uso, entre las cuales se encuentra la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases, así como la Directiva 2004/12/CE por la que se modifica la Directiva anterior. En el ámbito nacional encontramos la Ley 11/1997 de envases y residuos de envases, con su correspondiente reglamento, desarrollado por el Real Decreto 782/1998, para el desarrollo y la ejecución de la ley nombrada.

Debido a que el sistema a diseñar no será una máquina por sí sola, si no que formará parte de otras cuya finalidad y lugar de instalación se desconocen, dicho sistema se diseñará ateniéndose a la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, Ley 31/1995, con el fin de que su implementación en cualquier quiera que sea su destino no suponga ningún peligro para los trabajadores y personas que vayan a estar en contacto con el mismo.

## 4. DESARROLLO

### 4.1. ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA

Como hemos visto en el apartado 3.8, tanto la placa microcontroladora como los sensores tienen tensiones de alimentación diferentes, por lo que es necesario que cada uno de los componentes reciba la tensión adecuada para garantizar su correcto funcionamiento.

El primer paso es buscar todos aquellos componentes que puedan ser alimentados a la misma tensión, permitiendo de esta manera simplificar al máximo posible el circuito eléctrico y reduciendo el número de componentes adicionales necesarios. Para ello, se recogen todas las tensiones de trabajo de todos los componentes, que pueden verse en la Tabla 2.

COMPONENTE	TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN (V)
<i>Arduino</i>	7 - 12
<i>Sensor capacitivo</i>	12 - 24
<i>Sensor inductivo</i>	10 - 30
<i>Barrera de medición</i>	18 – 30
<i>Sensor de distancia</i>	18 - 30
<i>Célula de carga</i>	Máximo 15

Tabla 2: Tensiones de alimentación de los componentes principales

Tras analizar los datos recogidos, se opta por establecer dos grupos diferentes, que serán alimentados cada uno a la misma tensión. El primer grupo lo forman la placa microcontroladora Arduino, el sensor capacitivo, el sensor inductivo y las dos células de carga, que serán alimentados todos a 12 voltios. En el segundo grupo quedan por lo tanto las barreras de medición y el sensor de distancia, que se alimentarán a 24 voltios.

Suponiendo que el sistema diseñado se empleará en una aplicación que trabaje con la red doméstica de energía, es decir, 230V/50Hz, el esquema de alimentación del sistema será el que puede verse en la Figura 21. El primer paso es emplear una fuente de alimentación que nos permita obtener una tensión continua de 24 voltios, con la cual

se podrán alimentar directamente los componentes del segundo grupo. En el caso del primer grupo, en lugar de tomar directamente la tensión de salida del rectificador, se hará uso de un regulador LM7812, lo cual permitirá obtener una tensión continua de 12 voltios.

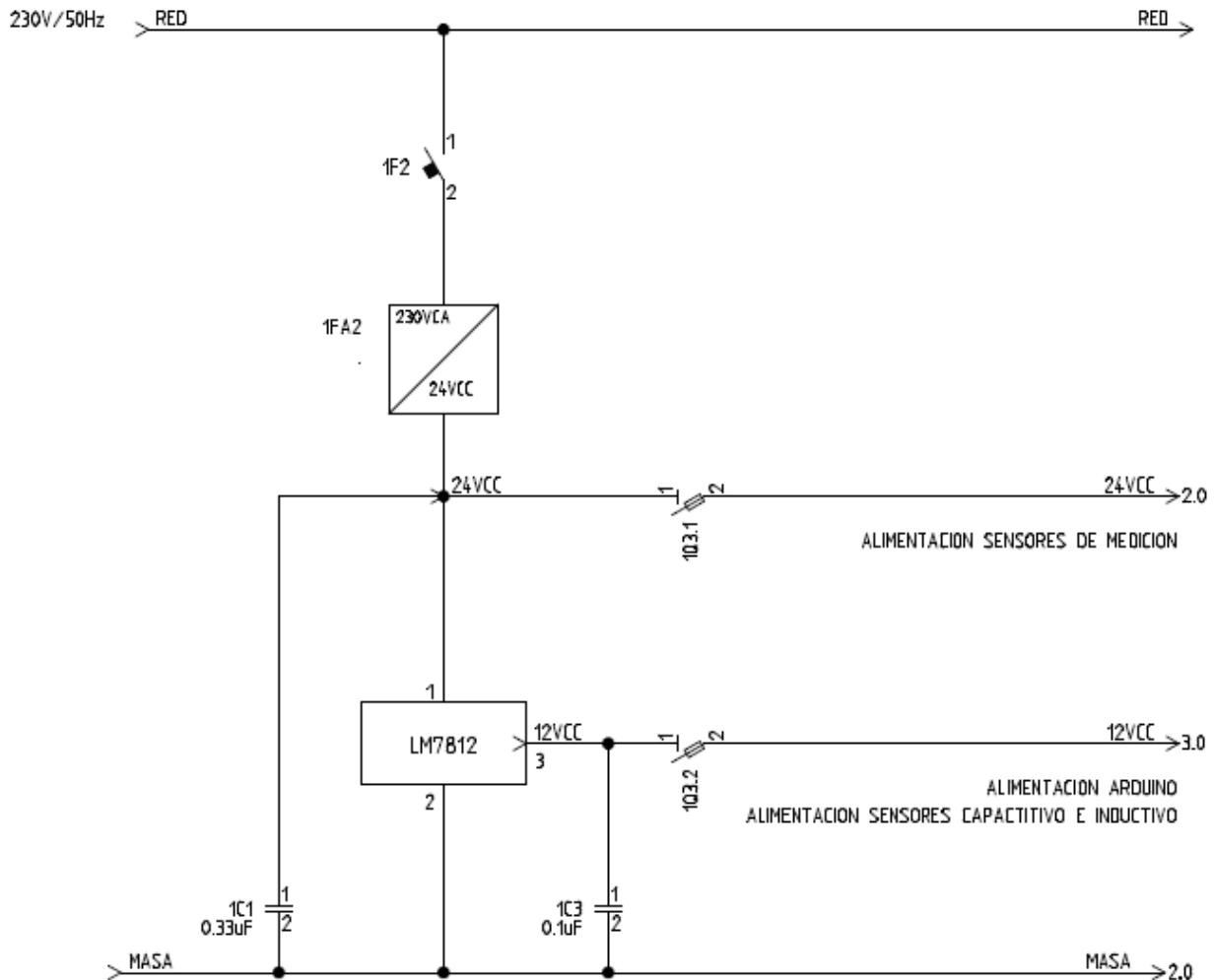


Figura 21: Esquema de alimentación general

La fuente a emplear será de la marca *Sontay*, modelo PS-230-24DC-1A (Figura 22). Se trata de una fuente capaz de convertir 230 voltios de tensión alterna en 24 voltios de tensión continua, tal y como se necesita. Proporciona una corriente de 1 amperio, lo que garantiza que todos los componentes recibirán la alimentación adecuada. Cuenta de manera integrada con protección contra sobretensiones y sobreintensidades, garantizando de esta manera la protección de todos los componentes conectados a dicha fuente de alimentación.



Figura 22: Fuente de alimentación PS-230-24DC-1A

## 4.2. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

Una vez solucionado el problema de alimentar todos los componentes, el siguiente paso es adaptar todas las tensiones de salida proporcionadas por los diferentes sensores para que la placa Arduino pueda trabajar con ellas. La tensión de entradas máxima que admite la placa es de 5 voltios, tanto para entradas digitales como para analógicas, por lo que en primer lugar es necesario conocer las tensiones de salida de cada sensor para decidir cuáles deben adaptarse y cuáles no. Dichas tensiones se recogen en la Tabla 3.

COMPONENTE	TENSIÓN DE SALIDA (V)
<i>Sensor capacitivo</i>	12
<i>Sensor inductivo</i>	12
<i>Barrera de medición</i>	0 - 10
<i>Sensor de distancia</i>	0 - 10
<i>Célula de carga</i>	0 - 24 mV

Tabla 3: Tensiones de salida de los diferentes sensores

Observando la tabla podemos comprobar como todos los sensores, a excepción de la célula de carga, tienen tensiones de salida demasiado elevadas como para conectarlos directamente al Arduino, por lo tanto será necesario acondicionarlas con el fin de no dañar la placa microcontroladora. La célula de carga por su parte, ofrece una tensión demasiado baja, que si bien puede ser detectada por el Arduino, al ser de una magnitud tan pequeña no ofrece resolución suficiente como para aportar una lectura precisa de la

carga que soporta, por lo que dicha señal deberá ser igualmente adaptada, aunque en este caso sea con el fin de aumentar la precisión del sistema.

#### 4.2.1. Sensor capacitivo e inductivo

La función de estos dos sensores es la de detectar presencia o ausencia de envases, por lo que su señal puede considerarse como una señal digital, que proporciona un 0 (0V) cuando no hay presencia de envase y un 1 (12V) cuando si hay presencia. Sin embargo, como acabamos de ver, la tensión de salida que proporcionan es demasiado elevada como para conectarlos directamente a la placa microcontroladora, ya que de hacerlo se podría dañar de forma irreversible.

Para evitar dicha situación, la señal de salida de ambos sensores se hará llegar al Arduino de forma indirecta, con la ayuda de un relé (Figura 23). Cada sensor tendrá conectado a su salida un relé, que se activará cada vez que su respectivo sensor detecte presencia de envase. Al activarse el relé, se cerrará un contacto normalmente abierto que mandará una señal de 5 voltios, suministrada por el propio Arduino, a una de las entradas del mismo, permitiendo de esta manera que el controlador detecte la señal enviada por los sensores sin peligro de provocar daños en la placa.

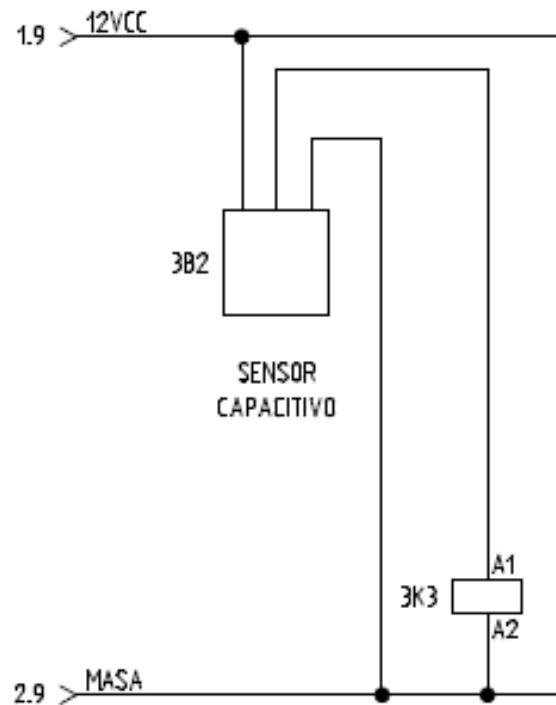


Figura 23: Acondicionamiento de las señales del sensor inductivo y del sensor capacitivo

El relé a emplear pertenece a la marca *Finder* y la Serie 30 (Figura 24). Se trata de un relé de reducidas dimensiones y bajo consumo, cuenta con dos contactos, los

cuales pueden emplearse tanto en posición normalmente abierta como normalmente cerrada. Existen diferentes modelos dentro de la serie, que varían según la tensión máxima admitida. En este caso es escoge uno capaz de soportar hasta 12 voltios, ya que el siguiente inferior, capaz de soportar 9, podría quemarse al aplicarle los 10 voltios de salida de ambos sensores.



*Figura 24: Relé para el acondicionamiento de señales*

#### 4.2.2. Sensores de medición

En el caso de los sensores de medición, tanto las barreras como el sensor de distancia, la señal de salida que proporcionan es de tipo analógico. En el caso de las barreras, proporcionan 0 voltios cuando no hay ningún objeto en su rango de medición y 10 voltios cuando el objeto ocupa todo el rango de medición, por lo tanto, la salida es proporcional al tamaño del objeto. En el caso del sensor de distancia, proporciona una tensión de 0 voltios cuando el objeto está por debajo del límite inferior de medición y 10 voltios cuando el objeto se encuentra por encima del límite superior, por lo que en este caso la salida es proporcional a lejanía del objeto del sensor.

En ambos casos, la tensión máxima proporcionada es superior a la tensión máxima admitida por la placa, por lo que es necesario adaptar dichas señales para que proporcionen una tensión máxima de 5 voltios pero sin perder sensibilidad. Esto se puede conseguir recurriendo una vez más a un divisor de tensión formado por dos resistencias con un mismo valor (Figura 25). De esta manera, la tensión recibida por el Arduino será siempre la mitad de la tensión de salida de los sensores, por lo que no se pierde precisión en las mediciones y al mismo tiempo la placa queda protegida de recibir una tensión excesivamente elevada.

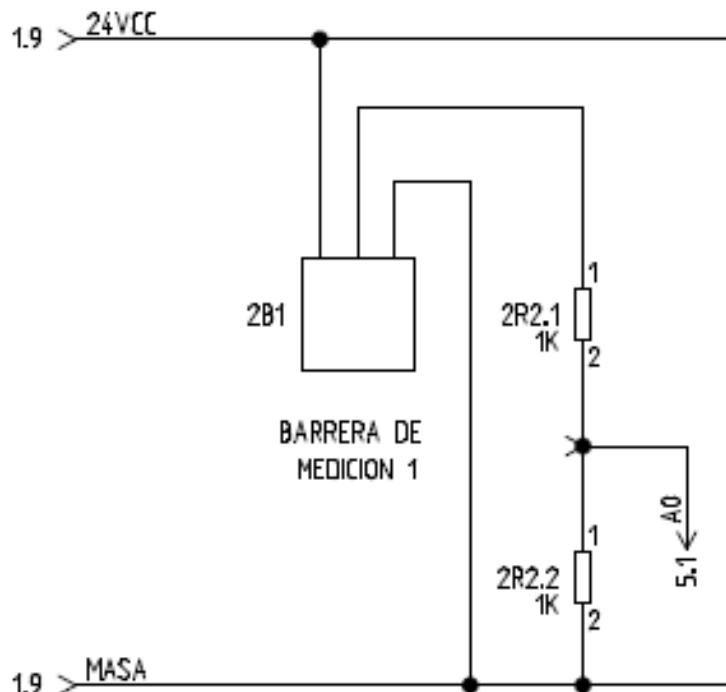


Figura 25: Acondicionamiento de las señales de los sensores de medición

#### 4.2.3. Células de carga

El problema que encontramos con la señal de las células de carga es totalmente opuesto a los casos anteriores. La tensión de salida de las células es tan pequeña, 24 milivoltios a carga máxima en nuestro caso, que la placa Arduino, si bien es capaz de detectar niveles de tensión tan bajos, no es capaz de obtener mucha precisión de una lectura analógica de tan poco rango. Esto se debe a que el controlador dispone de un convertidor ADC de 10 bits, lo que significa que proporciona 1024 niveles digitales tras la conversión. Puesto que el Arduino admite como máximo tensiones de entrada de 5 voltios, el cambio de nivel se detecta con una tensión mínima de aproximadamente 5 milivoltios, lo que en el caso de nuestras células implicaría únicamente 5 niveles de medición posibles.

Para poder solucionar este problema se puede optar por tres soluciones diferentes. La primera consiste en emplear un amplificador operacional con una ganancia muy elevada para incrementar la tensión de salida de las células hasta un valor que proporcione una sensibilidad suficiente. La segunda opción implicaría emplear un convertidor ADC externo, con una resolución superior a 10 bits, lo cual implicaría más niveles de detección, y por lo tanto sería capaz de detectar variaciones de tensión más pequeñas. La última opción consiste en recurrir a un híbrido de las dos primeras, es decir, emplear un amplificador operacional con una ganancia media y un convertidor

ADC externo con mayor capacidad de conversión que el convertidor incorporado en la placa Arduino.

En nuestro caso, para adaptar la señal de las células de carga se ha optado por la última de las opciones, para lo cual se empleará el amplificador para células de carga HX711 (Figura 27). Se trata de un convertidor ADC de 24 bits, que puede conectarse tanto en las entradas analógicas como en las digitales, y que cuenta internamente con un amplificador con tres valores de ganancia posibles, 32, 64 y 128, que pueden emplearse con dos canales de lectura diferentes, el primero con ganancia variable de 64 o 128 y el segundo con ganancia fija de 32. Además, se puede alimentar a 5 voltios, proporcionados directamente por la placa Arduino y al mismo tiempo es capaz de alimentar las células de carga, por lo que se podrá prescindir de alimentarlas a 12 voltios tal y como se fijó en el apartado 4.2 (Figura 26).

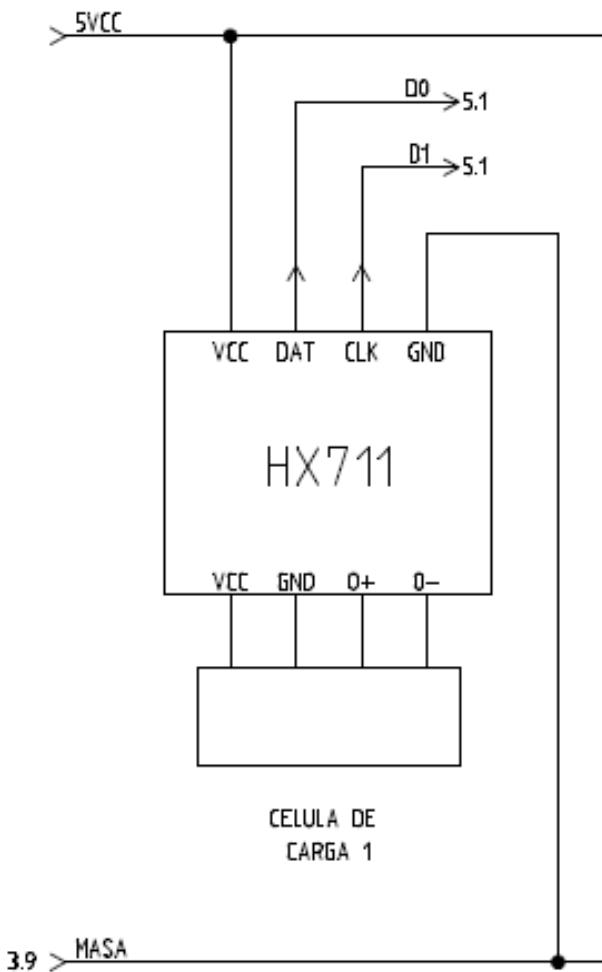


Figura 26: Acondicionamiento de las señales de las células de carga

Si bien sería posible conectar las dos células a un único amplificador, estas tendrían ganancias diferentes, lo que implicaría generar código adicional para corregir dicha diferencia con el fin de que las lecturas ofrecidas tuvieran la misma magnitud. Por

lo tanto, para simplificar el código se empleará un amplificador por cada célula, de manera que el peso total a considerar será la suma de las cargas soportadas por cada una de las células de manera individual.

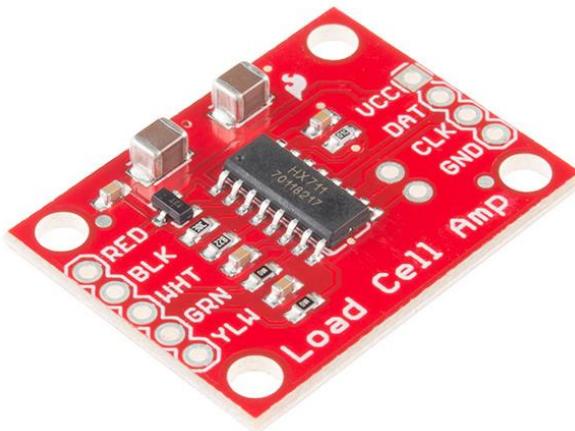


Figura 27: Amplificador para células de carga HX711

### 4.3. PROCESO DE CLASIFICACIÓN

Una vez el circuito eléctrico está adaptado en su totalidad para que no haya ningún problema de incompatibilidad de señales, el siguiente paso es definir el proceso de clasificación. Tal y como se mencionó en el apartado 3.7, este proceso consistirá en tres partes principales.

La primera parte se podría considerar como la señal de inicio para el proceso de clasificación. El sensor capacitivo es el encargado de realizar esta primera parte, ya que su función es detectar la presencia de cualquier envase que se coloque en la zona de clasificación. La principal finalidad de esta primera etapa es evitar que el código de control se esté ejecutando de forma completa continuamente. De esta manera, cuando no haya ningún envase que clasificar, se ejecutará únicamente la orden de detección de envase, de manera que el controlador no se verá obligado a ejecutar la totalidad del código. También cabe la posibilidad de emplear la señal del sensor capacitivo para controlar la alimentación del resto de sensores, de manera que si no hubiese ningún envase, estos dejarían de alimentarse, lo que se traduce en un ahorro del consumo energético.

La segunda etapa ya forma parte del proceso de clasificación propiamente dicho, en la cual interviene únicamente el sensor inductivo. Esta etapa se da únicamente si el sensor capacitivo detecta presencia de envase, y consiste en establecer un primer punto de separación de los envases. Si el envase colocado en la zona de clasificación es metálico, el sensor inductivo lo detectará, enviando una señal a la placa Arduino, que

anotará la naturaleza del envase y pondrá fin al ciclo de control. En caso de que el sensor capacitivo detecte un envase pero el sensor inductivo no detecte que es metálico, el sistema de control ejecutará la última etapa del proceso de clasificación.

La tercera y última etapa del proceso de clasificación es la encargada de distinguir los tres tipos restantes de envases, plásticos, vidrio y Tetrabrick. En esta etapa intervienen de forma conjunta las barreras de medición, el sensor de distancia y las células de carga. La idea es emplear estos sensores para calcular el volumen prismático que ocupa el envase, es decir, teniendo en cuenta sus dimensiones máximas, y medir el peso de dicho envase, con el fin de poder calcular un coeficiente de clasificación que permita distinguir un tipo de envase de los otros. A grandes rasgos, podría considerarse que cada envase es tratado como un prisma macizo cuyas dimensiones son el ancho, largo y alto del envase y cuyo peso es el peso del envase vacío, de manera que se calcula su densidad para saber de qué material se trata.

#### 4.4. COEFICIENTES DE CLASIFICACIÓN

Puesto que en el proceso de medición no conocemos el volumen exacto de material empleado en el envase, no podemos recurrir a los valores conocidos de densidades para clasificar los envases. Por lo tanto, para poder clasificar los envases según el método descrito, es preciso establecer unos valores de clasificación.

Para ello, se han escogido diferentes tipos de envases tanto en materiales como en dimensiones y formas (Figura 28) y se han medido y pesado de forma manual con el fin de obtener los coeficientes de clasificación y conocer si dichos valores son significativos para distinguir un tipo de envases de otro o no.

En el proceso de medición y pesado se han seguido una serie de pautas para garantizar que todos los envases eran tratados de igual manera.

- Todos los envases se han pesado en vacío, sin ningún tipo de contenido en su interior.
- Aquellos envases que pueden volver a cerrarse mediante algún tipo de tapa o que cuentan con algún tipo de cierre adicional se han pesado sin retirar dichos componentes.
- Aquellos envases que una vez abiertos no pueden volver a cerrarse (como por ejemplo las latas de conserva) se han pesado sin el elemento de cierre.
- La altura de los envases se ha medido hasta el punto más alto del mismo.

- El ancho y largo de los envases se han medido a la altura a la que supuestamente se encontrarían las barreras de medición, a aproximadamente 10-15 milímetros de la base.
- El coeficiente calculado se expresará en gramos partido por centímetro cúbico.



*Figura 28: Envases de muestra empleados para el cálculo de los coeficientes de clasificación*

#### 4.4.1. Coeficientes de clasificación para envases plásticos

Aplicando las pautas de medición nombradas con los envases de la Figura 29, los cuales están fabricados con diferentes tipos de plásticos, se han obtenido los diferentes coeficientes recogidos en la Tabla 4.



*Figura 29: Envases plásticos empleados para el cálculo de los coeficientes de clasificación*

	Peso (g)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Coeficiente (g/cm <sup>3</sup> )
Envase 1	86	13,5	13,0	32,5	5,704	<b>15,08</b>
Envase 2	46	9,0	9,0	35,0	2,835	<b>16,23</b>
Envase 3	44	8,0	8,0	32,5	2,080	<b>21,15</b>
Envase 4	27	6,5	6,5	27,5	1,162	<b>23,24</b>
Envase 5	35	8,0	8,0	27,0	1,728	<b>20,25</b>
Envase 6	43	6,5	4,0	21,3	0,554	<b>77,65</b>
Envase 7	40	7,5	5,0	21,0	0,788	<b>50,79</b>
Envase 8	74	7,5	7,5	16,0	0,900	<b>82,22</b>
Envase 9	16	5,5	5,5	18,8	0,569	<b>28,13</b>
Envase 10	20	12,0	7,0	7,0	0,588	<b>34,01</b>
Envase 11	19	11,0	5,5	5,5	0,333	<b>57,10</b>

*Tabla 4: Coeficientes de clasificación para envases plásticos*

Observando los resultados obtenidos se puede comprobar que son bastante dispares, con valores que van desde los 15.08 g/cm<sup>3</sup> hasta los 82.22 g/cm<sup>3</sup>. Estas diferencias pueden deberse a que diferentes tipos de plásticos tienen densidades diferentes, así como puede haber envases con paredes más gruesas que otros, por lo que su peso es significativamente superior. También puede deberse a casos como el del envase 8, que a diferencia del resto cuenta con una tapa metálica, lo cual también puede suponer un considerable incremento de peso.

Por el momento, será necesario conocer los coeficientes de los otros tipos de envases para conocer si los resultados son significativos o no.

#### 4.4.2. Coeficientes de clasificación para envases tipo Tetrabrick

Igual que en el caso anterior, se han seguido las pautas de medición sobre los envases de la Figura 30 obteniendo los resultados recogidos en la Tabla 5.



Figura 30: Envases tipo Tetrabrick empleados para el cálculo de los coeficientes de clasificación

	Peso (g)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)	Volumen (cm3)	Coeficiente (g/cm3)
Envase 1	36	7,0	6,5	25,5	1,160	31,03
Envase 2	40	7,5	7,0	24,0	1,260	31,75
Envase 3	38	9,0	6,0	21,0	1,134	33,51
Envase 4	16	7,5	4,5	14,8	0,500	32,03
Envase 5	26	7,5	7,0	11,6	0,609	42,69
Envase 6	17	6,5	4,5	13,5	0,395	43,05
Envase 7	7	6,0	4,0	8,5	0,204	34,31

Tabla 5: Coeficientes de clasificación para envases tipo Tetrabrick

En este caso, podemos observar como los resultados obtenidos son más próximos entre sí, con un rango de valores que va desde los 31,03 g/cm3 hasta los 43,05 g/cm3. El hecho de que los coeficientes tengan valores similares implicará que será más fácil distinguirlos del resto de envases.

#### 4.4.3. Coeficientes de clasificación para envases de vidrio

De la misma manera que en los casos anteriores, se han medido y pesado los envases de la Figura 31, siguiendo las pautas establecidas, obteniendo los valores recogidos en la Tabla 6.



Figura 31: Envases de vidrio empleados para el cálculo de los coeficientes de clasificación

	Peso (g)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Coeficiente (g/cm <sup>3</sup> )
Envase 1	692	11,5	11,5	17,5	2,314	<b>299,00</b>
Envase 2	356	8,5	8,5	16,5	1,192	<b>298,63</b>
Envase 3	264	7,0	7,0	17,0	0,833	<b>316,93</b>
Envase 4	280	7,0	7,0	15,4	0,755	<b>371,06</b>
Envase 5	280	6,0	6,0	25,0	0,900	<b>311,11</b>
Envase 6	166	5,0	5,0	19,5	0,488	<b>340,51</b>
Envase 7	157	6,0	6,0	11,5	0,414	<b>379,23</b>
Envase 8	104	4,0	4,0	11,7	0,187	<b>555,56</b>
Envase 9	101	6,5	6,5	5,0	0,211	<b>478,11</b>
Envase 10	39	3,0	3,0	7,5	0,068	<b>577,78</b>

Tabla 6: Coeficientes de clasificación para envases de vidrio

Estudiando los valores obtenidos, se puede observar como estos tiene una rango relativamente amplio, desde los 299.90 g/cm<sup>3</sup> hasta los 577.78 g/cm<sup>3</sup>. Sin embargo, la magnitud de los coeficientes es significativamente superior a los vistos hasta ahora, en torno a 10 veces más grandes, por lo que será muy sencillo separar estos envases de los demás.

#### 4.4.4. Coeficientes de clasificación para envases metálicos

Si bien la clasificación de los envases metálicos ya está resuelta con ayuda del sensor inductivo, se ha decidido calcular también los coeficientes de estos envases con el fin de comprobar si aportar resultados significativos, con lo cual se podría prescindir del sensor con la consiguiente simplificación tanto del circuito eléctrico como del código de control. Para el cálculo de los coeficientes se han empleado los envases de la Figura 32 obteniendo los resultados de la Tabla 7 tras seguir las pautas de medición y pesaje establecidas.



Figura 32: Envases metálicos empleados para el cálculo de los coeficientes de clasificación

	Peso (g)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Coeficiente (g/cm <sup>3</sup> )
Envase 1	90	5,5	5,5	24,7	0,747	120,45
Envase 2	78	5,0	5,0	23,3	0,583	133,91
Envase 3	19	6,0	6,0	16,7	0,601	31,60
Envase 4	96	7,5	5,0	16,0	0,600	160,00
Envase 5	47	6,5	6,5	10,8	0,456	103,00
Envase 6	33	6,0	6,0	13,0	0,468	70,51
Envase 7	29	6,0	6,0	7,0	0,252	115,08
Envase 8	21	6,0	6,0	3,5	0,126	166,67

Tabla 7: Coeficientes de clasificación para envases metálicos

En el caso de los envases metálicos, los coeficientes obtenidos son bastante similares, a excepción de dos valores, con un rango de 103 g/cm<sup>3</sup> hasta 166.67 g/cm<sup>3</sup>. Estos valores son superiores a los de los envases plásticos y tipo Tetrabrick, y al mismo tiempo menores que los de los envases de vidrio, por lo que sería posible emplear el método de medición y pesaje para los envases metálicos.

#### 4.4.5. *Criterio de clasificación*

Una vez calculados los coeficientes de los diferentes tipos de envases, es necesario establecer el criterio por el cual se clasificará un envase en una categoría u otra. Los dos tipos de envases más sencillos de clasificar atendiendo a los resultados obtenidos son los envases de vidrio y los envases tipo Tetrabrick. Los primeros poseen coeficientes muy elevados, consecuencia de su elevado peso, por lo que cualquier envase que se trate y tenga un coeficiente de clasificación superior a 280 g/cm<sup>3</sup> será de forma casi inequívoca un envase de vidrio. En cuanto a los envases tipo Tetrabrick, si bien sus coeficientes no son muy elevados, su rango de variación es bastante reducido, de manera que aquellos envases que posean coeficientes de entre 30 g/cm<sup>3</sup> y 45 g/cm<sup>3</sup> serán casi seguramente envases de este tipo.

En cuanto a los envases metálicos y plásticos, aplicar un criterio extremadamente fiable es complicado. En el caso de los primeros, los coeficientes son relativamente semejantes, salvo los obtenidos con los envases 3 y 6. Estos envases corresponden a envases de bebidas gaseosas, que generalmente están fabricados en aluminio y poseen un espesor extremadamente pequeño, lo que se traduce en un peso muy reducido, motivo por el cual sus coeficientes de clasificación tienen valores de 31.60 g/cm<sup>3</sup> y 70.51 g/cm<sup>3</sup> respectivamente. A raíz de esto, en caso de querer prescindir del sensor inductivo y emplear el método de medición y pesaje para clasificar los envases metálicos, el rango de clasificación debería establecerse entre 100 g/cm<sup>3</sup> y 200 g/cm<sup>3</sup>, teniendo siempre en cuenta que con este método habrá siempre presente un error de clasificación de envases metálicos que no acabarán en su contenedor correspondiente.

Por su parte, los envases plásticos son los que más incertidumbre aportan en este método, ya que el rango de valores que abarcan sus coeficientes es muy amplio. Sin embargo, tras estudiar detenidamente los valores obtenidos, se observa que estos pueden clasificarse en dos grupos. En primer lugar están aquellos envases cuyo coeficiente es menor de 30 g/cm<sup>3</sup>, que corresponden a los envases 1, 2, 3, 4, 5 y 9, y por otro lado aquellos cuyo coeficiente es mayor que 50 g/cm<sup>3</sup>, que corresponden a los envases 6, 7, 8 y 11. El único envase que no entraría en ninguna de las categorías es el envase 10, cuyo coeficiente entraría en el rango de los Tetrabricks. En este caso por lo tanto, se puede proceder igual que en el caso de los envases metálicos, estableciendo los rangos mencionados y asumiendo que una pequeña parte de los envases plásticos acabarían en el contenedor incorrecto.

Tras analizar todos los valores obtenidos, se decide que el método de clasificación mediante medición de volumen y pesaje es viable para la clasificación de los envases, estableciendo los rangos de clasificación de la Tabla 8 y teniendo en cuenta que existirá

siempre un ligero error de clasificación tanto en los envases metálicos, sobre todo las latas de bebidas gaseosas, y los envases plásticos.

TIPO DE ENVASE	RANGO DE CLASIFICACIÓN
ENVASES DE VIDRIO	Superior a 280 g/cm3
ENVASES METÁLICOS	Entre 100 y 200 g/cm3
ENVASES PLÁSTICOS	Menor a 30 g/cm3 y entre 50 y 100 g/cm3
ENVASES TIPO TETRABRICK	Entre 30 y 50 g/cm3

Tabla 8: Valores de clasificación de los distintos tipos de envases

## 4.5. CÓDIGO DE CONTROL

El último paso para completar el funcionamiento del sistema es el desarrollo del código de control. El código de control es el conjunto de instrucciones que se deben transferir al sistema de control, en este caso la placa Arduino, con el fin de que el proceso del sistema se desarrolle de la manera deseada. Para ello, es necesario especificar el tipo de señales que va a recibir, así como la manera de tratarlas y emplearlas con el fin de desarrollar el proceso.

En el caso de nuestro sistema, el proceso de funcionamiento normal seguirá el orden de acciones descrito por el diagrama UML de la Figura 33. La primera acción a realizar es comprobar el estado del sensor capacitivo, de manera que si no detecta presencia estará constantemente comprobando el estado del sensor y si detecta presencia procederá al proceso de clasificación del envase.

La segunda acción del sistema, que puede considerarse como al primera del proceso de clasificación, es comprobar el estado del sensor inductivo. Si el sensor inductivo detecta presencia, significa que el envase colocado en la zona de detección es un envase metálico, mientras que si no detecta presencia, implica que será necesario llevar a cabo el proceso de medición y pesaje con el fin de calcular el coeficiente de clasificación del envase y poder de esta manera determinar la naturaleza del envase según los límites establecidos en la Tabla 8.

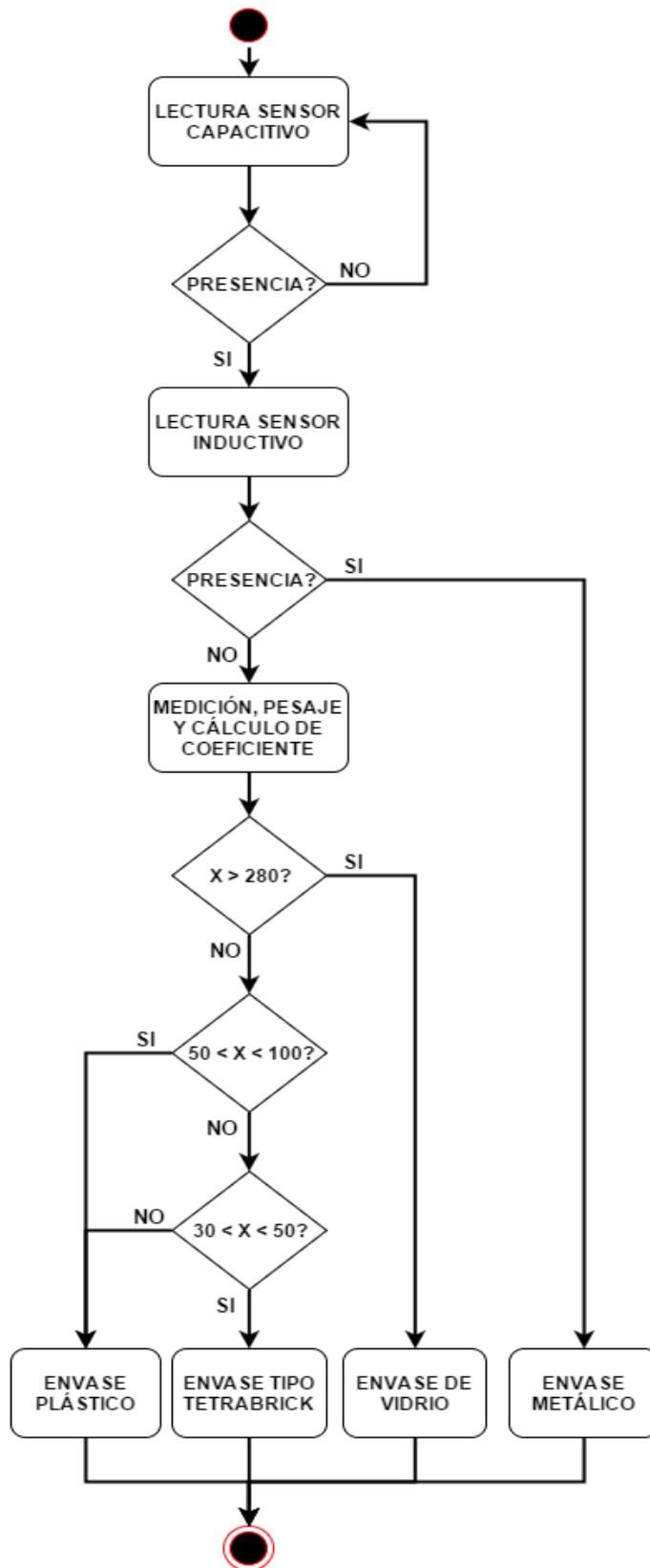


Figura 33: Diagrama UML del funcionamiento general del sistema

El proceso de medición, pesaje y cálculo del coeficiente de clasificación es la parte más compleja y larga del código de control, ya que precisa de la lectura de numerosos

sensores así como de la realización de varios cálculos. Para la correcta realización de esta tarea, el sistema de control deberá realizar las operaciones indicadas en el diagrama UML de la Figura 34.

Si bien es la parte más compleja del código, el procedimiento es muy sencillo. En primer lugar se toman las medidas del envase con ayuda de las señales de los sensores de medición, y se calcula el volumen del envase en centímetros cúbicos. A continuación se mide el peso del envase sumando las señales de las dos células de carga y por último se calcula el coeficiente de clasificación dividiendo el peso obtenido entre el volumen calculado anteriormente.

Una vez calculado el coeficiente, el código de control lo clasifica el envase según su valor siguiendo el orden de comprobación visto en la Figura 33.

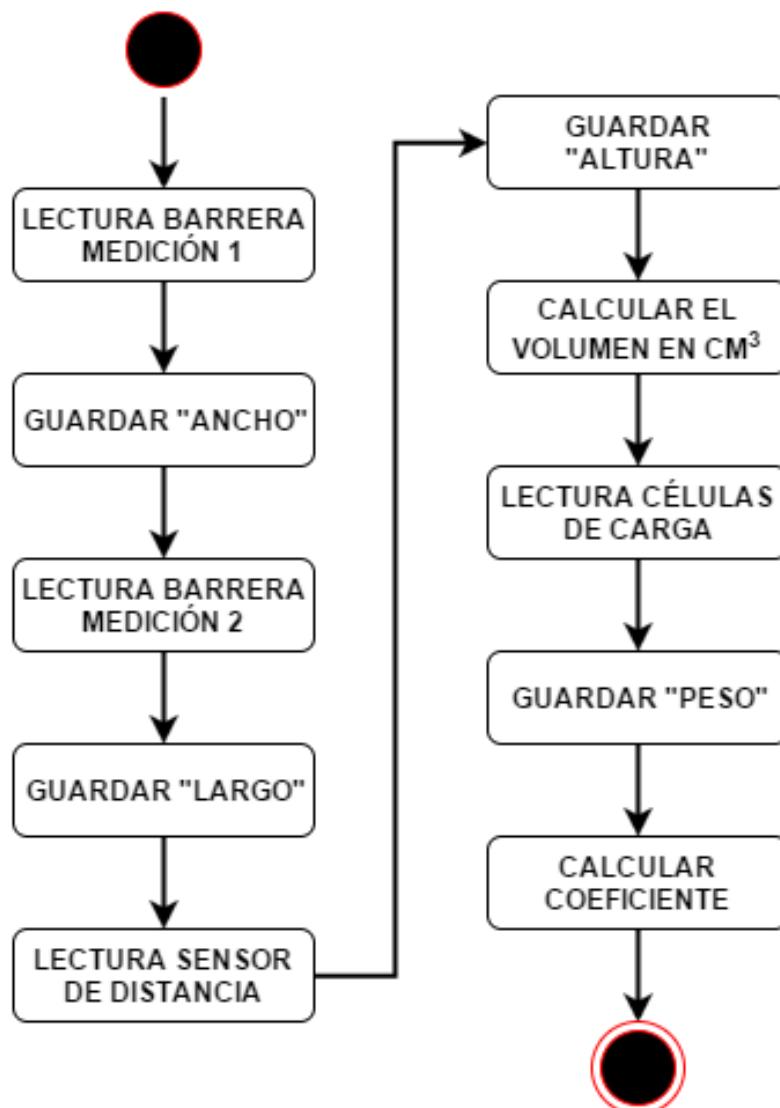


Figura 34: Diagrama UML para el cálculo del coeficiente de clasificación

## 4.6. EJEMPLO DE DISEÑO

Con el fin de poder tener una visión más clara del funcionamiento del sistema diseñado, a continuación se plantea un diseño hipotético del sistema dentro de una aplicación indefinida. La finalidad de dicho diseño es facilitar la comprensión del sistema, permitiendo visualizar la colocación de los diferentes sensores así como su interacción con el sistema.

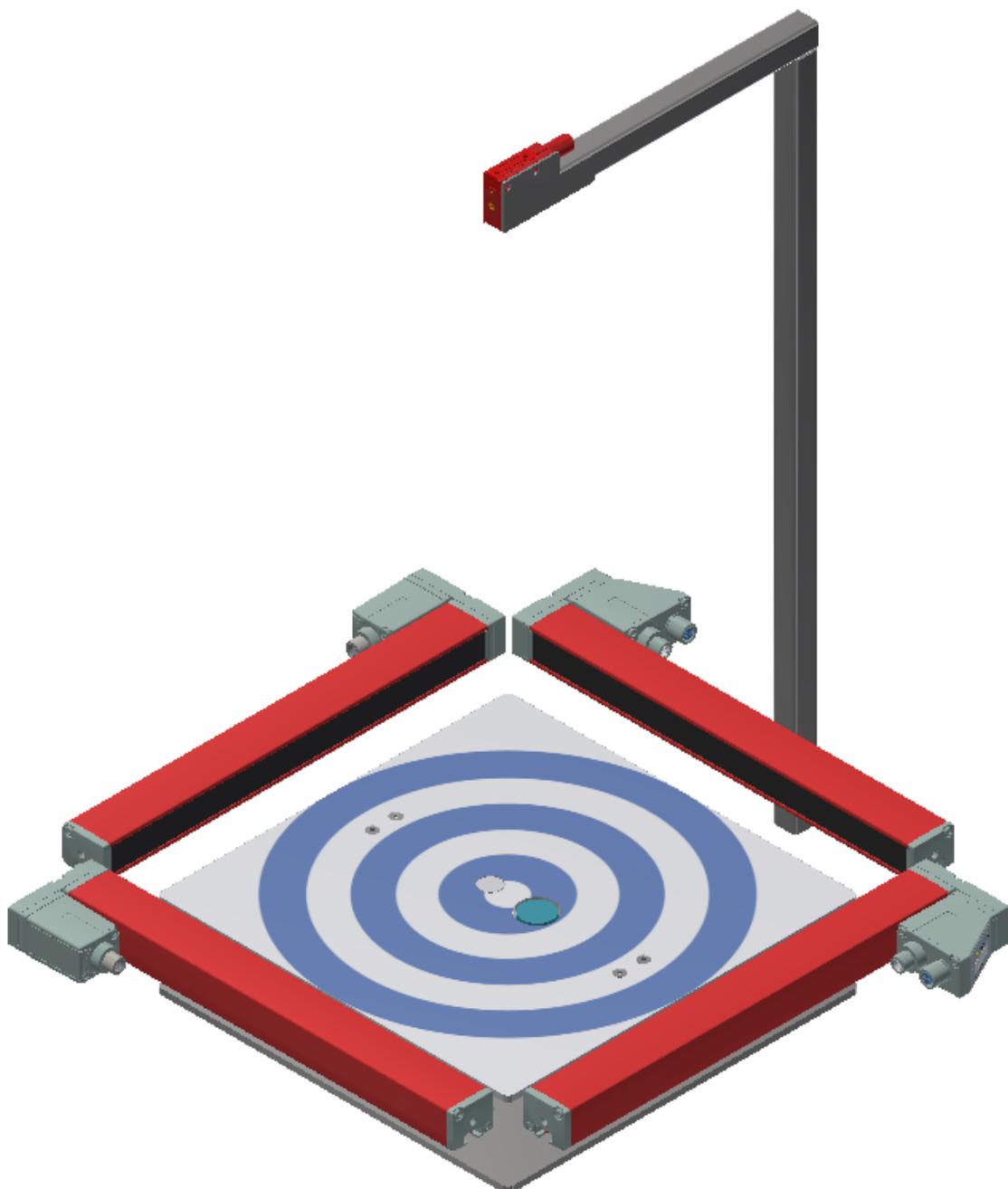


Figura 35: Plano general del sistema

En la Figura 35 podemos ver un plano general del sistema. En este plano se pueden observar las dos barreras de medición, formadas cada una por un emisor y un receptor, que se encargan de medir el ancho y el largo de los envases. Vemos también el sensor de distancia en la parte superior, que es el encargado de medir la altura de los envases. En cuanto a la zona de clasificación, presenta un diseño de círculos concéntricos con el fin de facilitar a los usuarios la colocación de los envases en el centro de la misma, para que el proceso de clasificación sea lo más preciso posible.

En esta representación, las barreras de medición no presentan ningún tipo de soporte ya que irían montadas sobre la estructura de la máquina en la cual se implementaría el sistema. Del mismo modo, el soporte del sensor de distancia es meramente representativo, ya que su montaje final sería similar al de las barreras, haciendo uso de la estructura general de la máquina.

En la Figura 36 se observa de manera más detallada la zona de clasificación, permitiendo ver la disposición del resto de sensores.

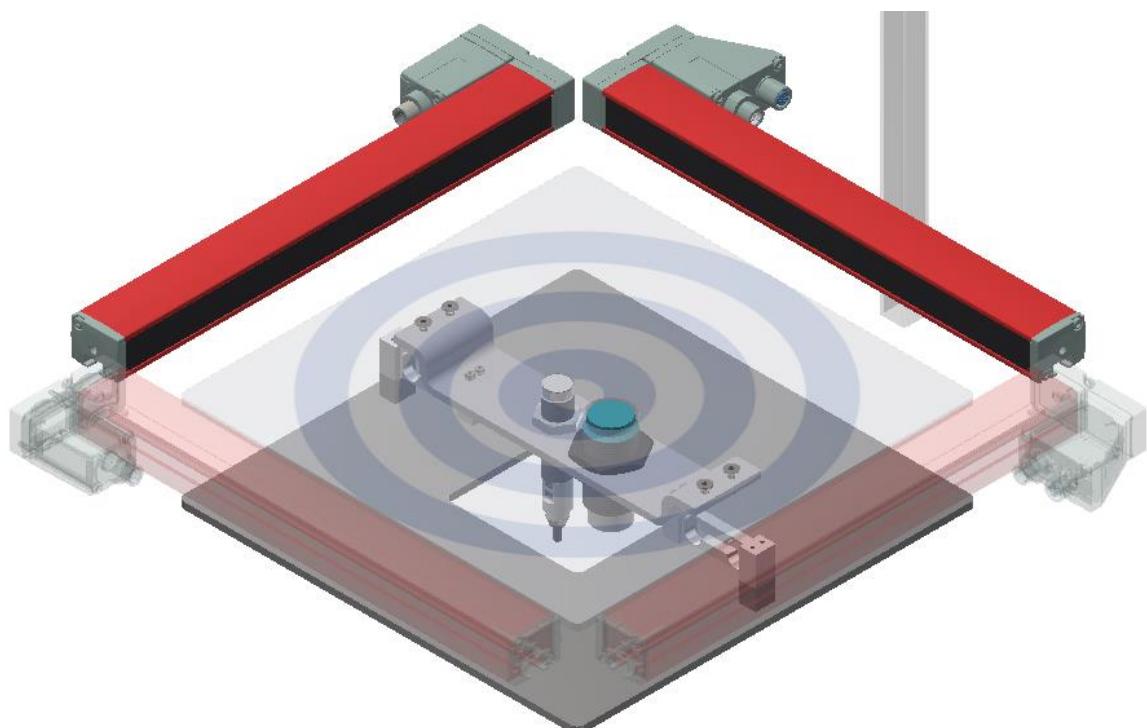
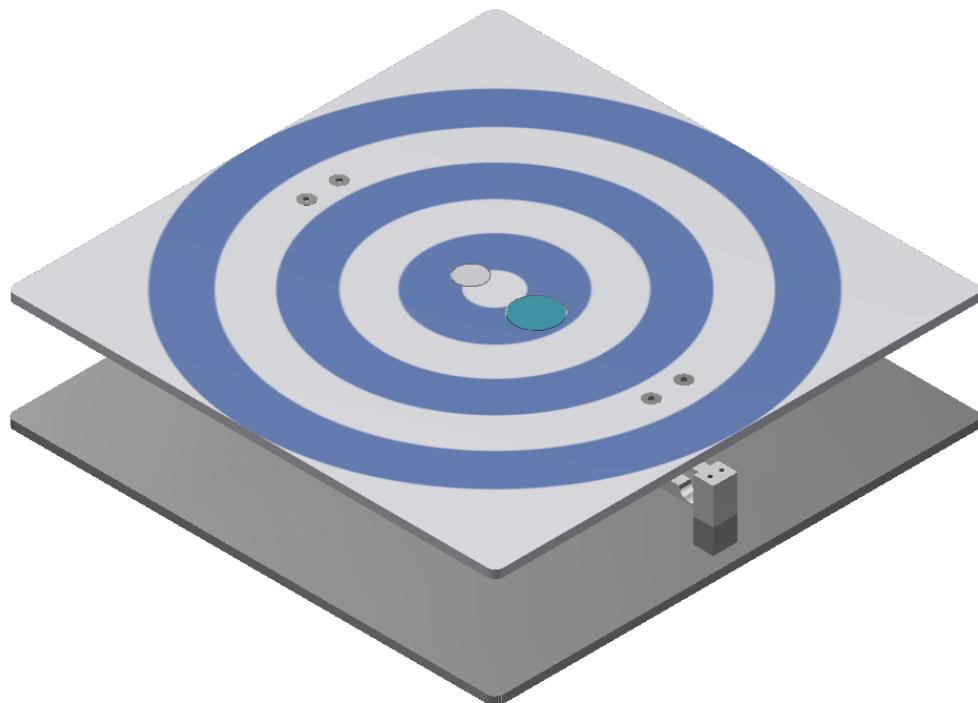


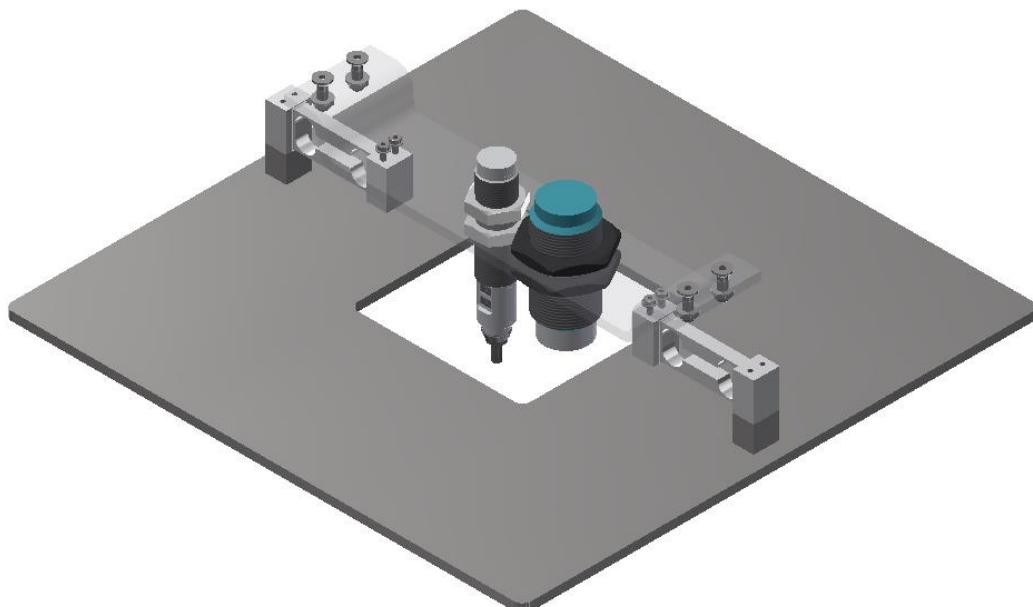
Figura 36: Plano de la zona de clasificación

Tal y como se puede apreciar, la plataforma de clasificación es soportada por una chapa plegada que sirve a su vez de soporte a los sensores capacitivo e inductivo, al mismo tiempo que sirve de punto de apoyo a todo el conjunto sobre las dos células de carga.



*Figura 37: Detalle de la zona de clasificación*

Como puede verse en la Figura 37, la plataforma en la cual se depositan los envases para su clasificación presenta dos ranuras que permiten introducir los sensores capacitivo e inductivo. Ambos sensores se encuentran colocados lo más cerca posible del centro de la plataforma, garantizando de esta manera la detección de envases de pequeñas dimensiones.



*Figura 38: Disposición de los sensores y las células de carga*

En la Figura 38 se puede observar de manera más clara la disposición tanto de los sensores como de las células de carga. Las células de carga se encuentran colocadas la una en frente de la otra y a distancias iguales del centro de la plataforma de clasificación, con el fin de que ambas soporten en todo momento cargas similares para un mejor funcionamiento del sistema. Están además montadas sobre unos pequeños separadores para garantizar que disponen de espacio suficiente para flexionarse durante su utilización sin llegar a tocar la plataforma inferior, lo que de producirse daría lugar a lecturas de peso erróneas.

La plataforma inferior cuenta con un escote en su centro que permite la colocación de sensores de distintas longitudes, de manera que la elección de los mismos no se vea limitada por el espacio disponible.

Esta plataforma sería además el punto de unión de la plataforma de clasificación con el mecanismo de almacenamiento de los envases, de manera que dispone de espacio suficiente para la colocación de cualquier acotador que pueda intervenir en dicha operación.

En cuanto a las dimensiones de la zona de clasificación, tal y como se ha mencionado anteriormente es de 300 milímetros de ancho por 300 milímetros de alto. Sin embargo, dadas las reducidas dimensiones de los componentes y al diseño planteado para los soportes de todos los componentes (Figura 39), el conjunto tiene una altura de tan solo 72 milímetros, lo que facilita su implementación considerablemente.



Figura 39: Vista de perfil de la plataforma de clasificación

Un punto clave en la disposición de los componentes es la situación de las barreras de medición y del sensor de distancia respecto a la plataforma de clasificación. Tal y como se puede ver en la Figura 40, las barreras de medición deben estar colocadas a la altura de la plataforma de clasificación, para garantizar que miden las dimensiones máximas de los envases en todo momento. Con el fin de que se puedan colocar las barreras a la misma altura, todas se encuentran separadas de la plataforma principal una distancia de 30 milímetros (Figura 41).

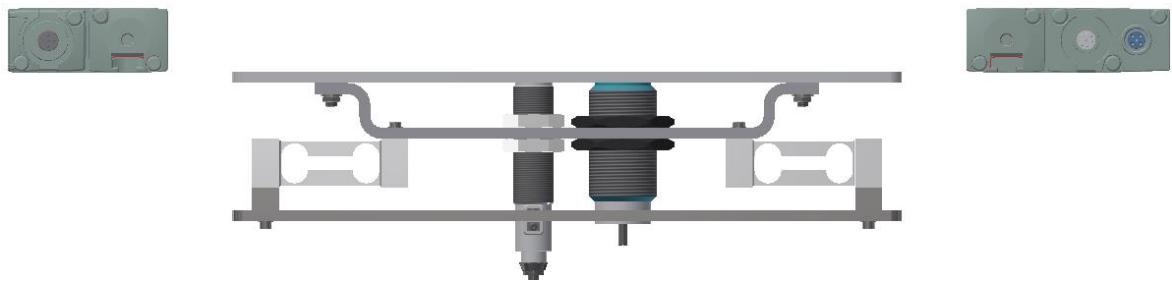


Figura 40: Vista de perfil de la disposición de las barreras de medición

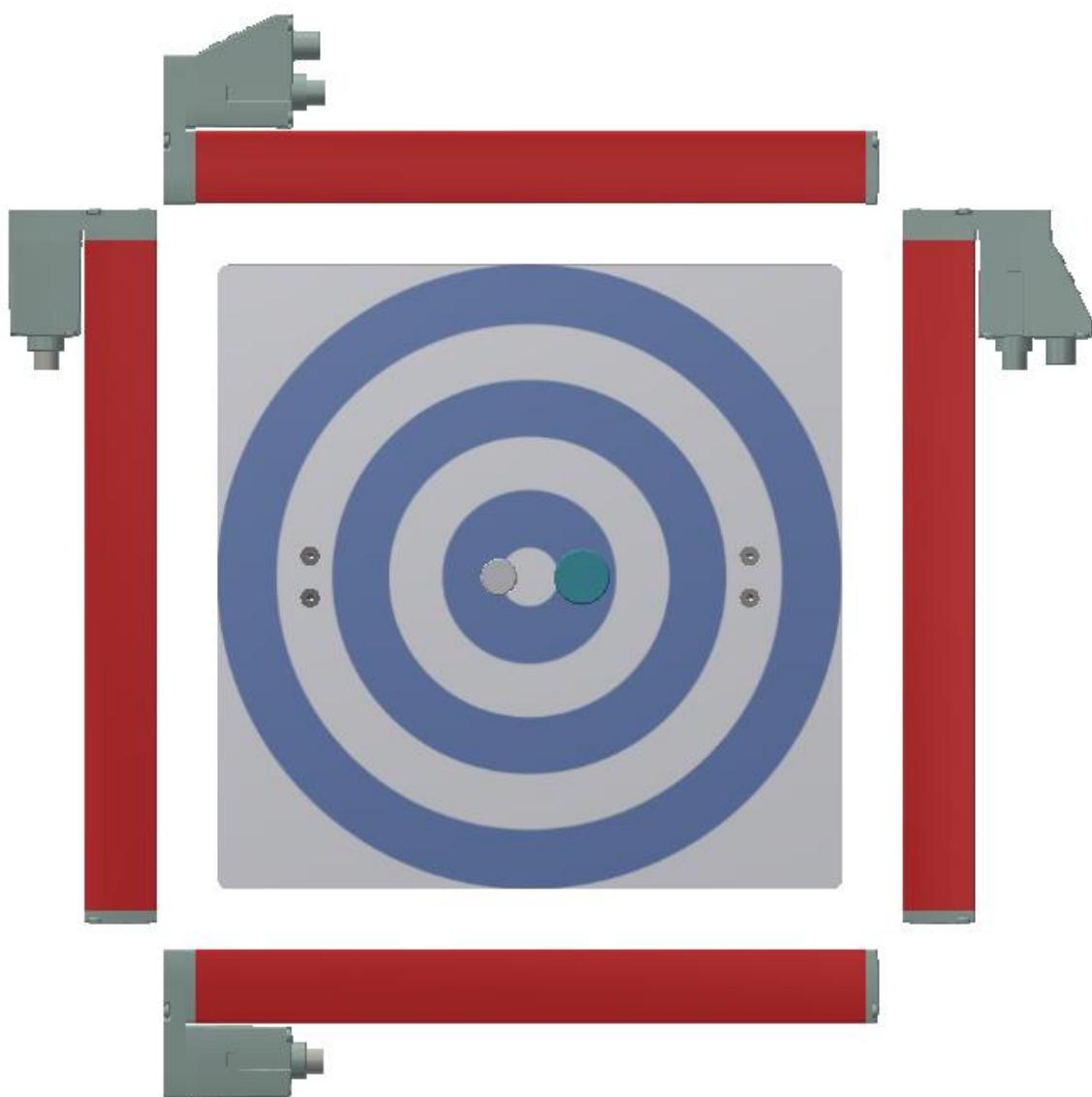


Figura 41: Vista de planta de la disposición de las barreras de medición

En lo que respecta al sensor de distancia, se sabe que debe estar colocado a una altura de 500 milímetros sobre la plataforma de clasificación. Además de eso, para

garantizar lecturas de altura correctas, deberá estar situado sobre el centro de la plataforma, tal y como se puede ver en la Figura 42.

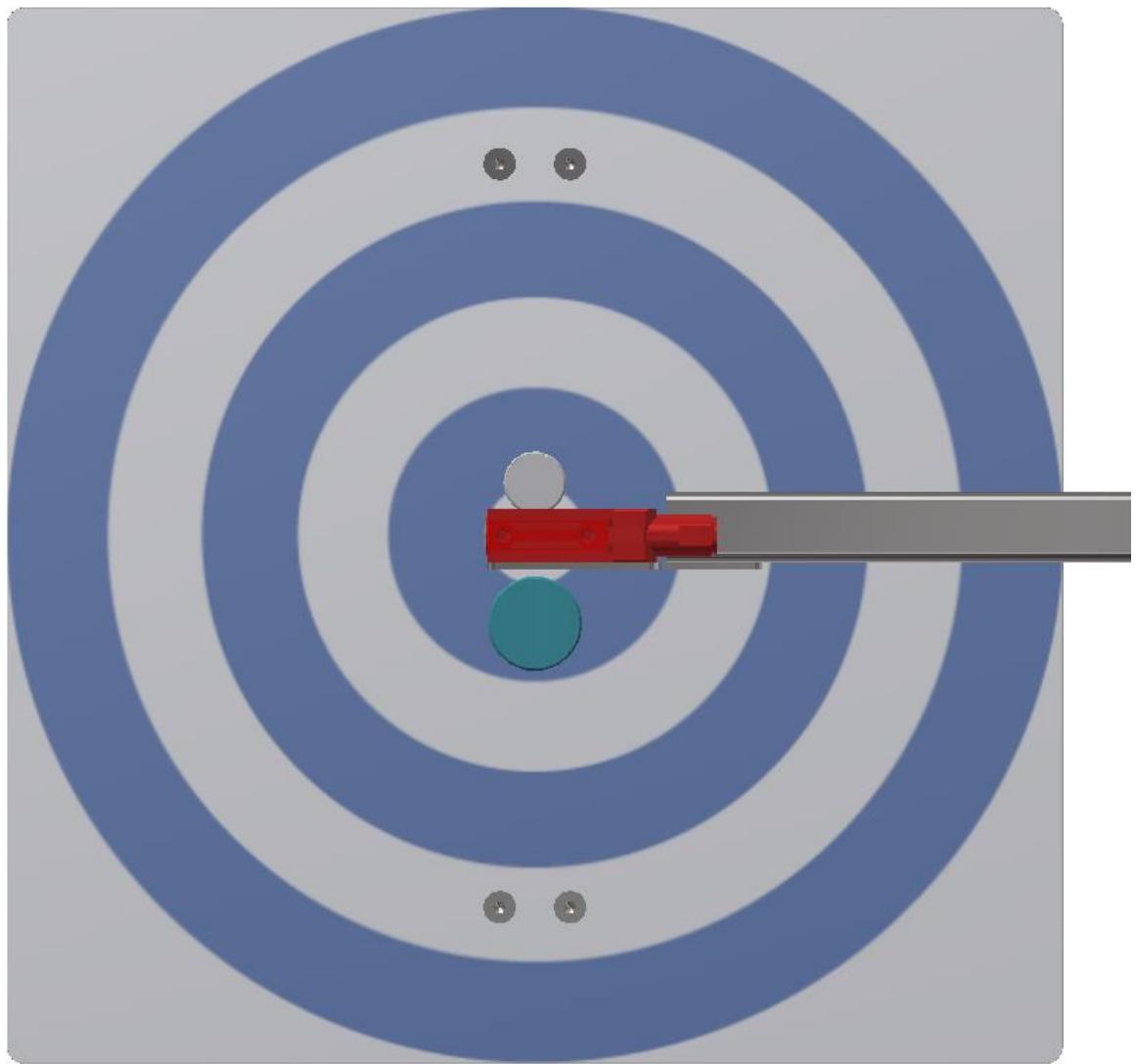
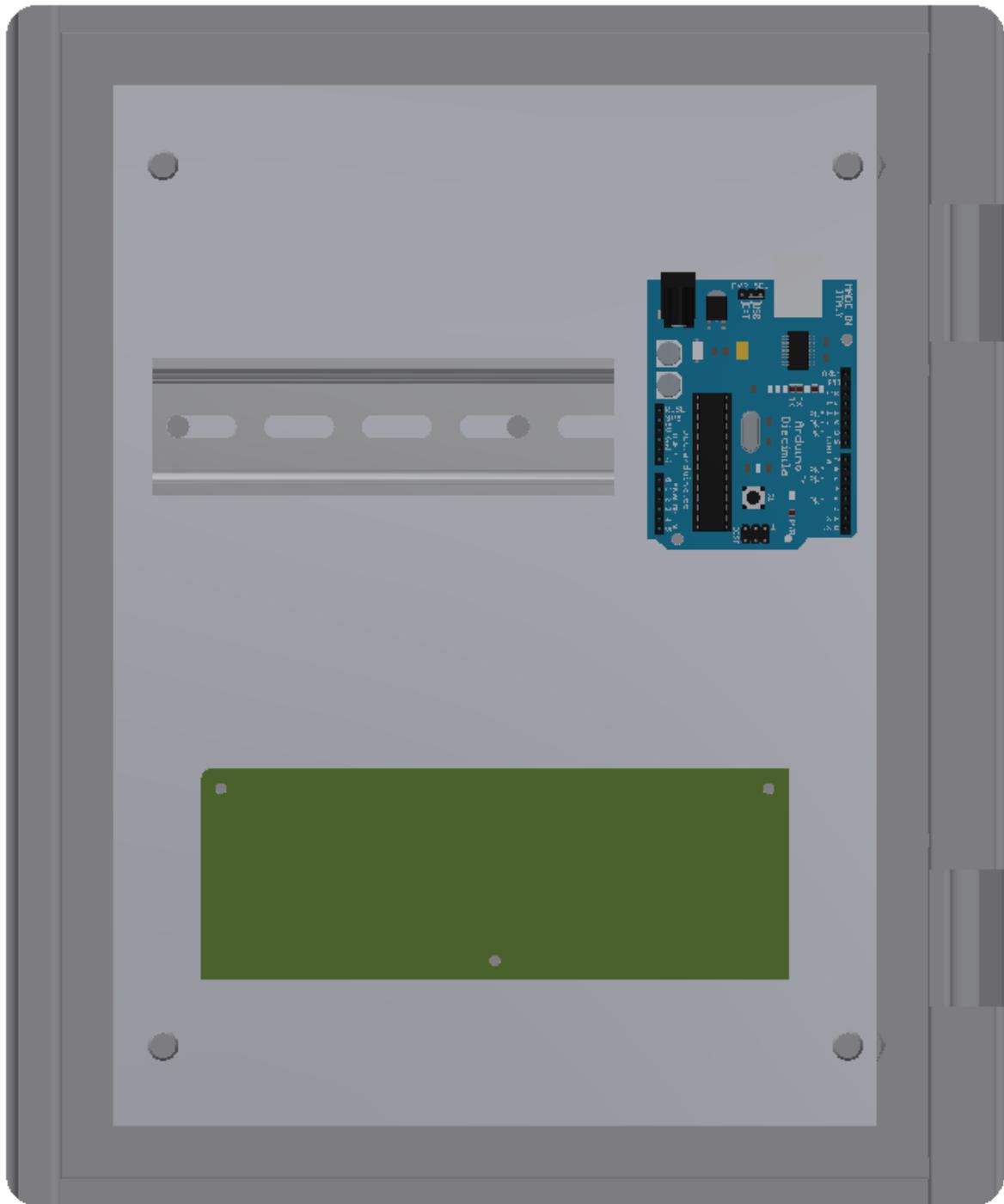


Figura 42: Vista de planta de la disposición del sensor de distancia

En cuanto al resto de componentes que completan el sistema (sistema de alimentación, sistemas de acondicionamiento y sistema de control), su situación dentro de la aplicación final no es de vital importancia. Puesto que dichos componentes no interactúan directamente con los envases, a diferencia de los sensores, pueden estar colocados por ejemplo en el cuadro eléctrico general de la máquina en la cual se implementa el sistema, facilitando de esta manera su mantenimiento y su reparación en caso de alguna avería o fallo. Otra opción posible es colocarlos todos en un cuadro independiente cerca de los sensores, reduciendo de esta manera el cableado necesario para conectar todos los componentes y aislando el sistema de control de posibles fuentes de ruido electromagnético que pudieran hallarse presentes en el cuadro general. En este último caso, la distribución de los componentes podría ser como en la Figura

43, donde la fuente de alimentación iría montada sobre un perfil DIN, la placa Arduino se montaría con ayuda de los agujeros que vienen incorporados y el resto de componentes electrónicos irían colocados sobre una placa PCB diseñada para la ocasión.



*Figura 43: Colocación de componentes dentro de un armario*

La placa PCB, tal y como se ha mencionado, sería la encargada de soportar y conectar los componentes más pequeños del sistema, como son el regulador de tensión, las resistencias y los relés de los circuitos de acondicionamiento, los amplificadores de

las dos células de carga, además de pines de conexión para que la placa pueda conectarse con la fuente de alimentación, el Arduino, y el resto de sensores del sistema.

El plano de mecanizado del armario eléctrico, así como la distribución de componentes y pistas en la placa PCB se encuentran adjuntos en el documento *Planos y esquemas*.

## 5. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo era diseñar un sistema capaz de clasificar de manera rápida y sencilla un envase determinado según la naturaleza de su material. A lo largo del desarrollo del mismo se ha podido comprobar cómo, el resultado final, cumple casi a la perfección con el objetivo fijado ya que el sistema diseñado es capaz de decidir si el envase colocado en la zona de clasificación es metálico, plástico, de vidrio o estilo Tetrabrick en cuestión de segundos y con un posible error de clasificación relativamente bajo. Dicho error de clasificación, que se debe principalmente al coeficiente de clasificación, puede disminuirse o incluso eliminarse, llevando por ejemplo a cabo un estudio con mayor cantidad de envases de muestra para estrechar más los rangos de clasificación, o empleando sensores capaces de medir el volumen real que ocupa el envase, eliminando de esta manera la necesidad de tratarlo como un prisma, lo que daría lugar a coeficientes de clasificación más precisos.

Otro posible error de clasificación que podría darse es en aquellos casos en los cuales los envases no se coloquen de manera correcta dentro de la zona de clasificación. Este hecho podría producirse con aquellos envases que no son circulares, ya que si se colocan girados, sus dimensiones de ancho y largo se tomarían de manera incorrecta, lo que daría lugar a un coeficiente de clasificación erróneo. Este hecho puede evitarse simplemente indicando instrucciones precisas sobre como colocar el envase dentro de la zona de clasificación a los usuarios que vayan a hacer uso de la máquina en la cual se encuentre el sistema diseñado.

El sistema final además permite solventar los problemas relacionados con otros sistemas de clasificación similares ya existentes, que eran capaces de manipular tan solo dos tipos de envases, y teniendo en cuenta que los componentes empleados no poseen elevadas dimensiones, es posible implementarlo en máquinas de relativamente reducidas dimensiones con el fin de que puedan ser usadas en lugares públicos por toda clase de personas.

En cuanto a las aplicaciones del sistema, como se ha mencionado en casos anteriores, podría emplearse en máquinas de "reverse-vending", ampliando el rango de envases que pueden emplearse y por lo tanto ofreciendo una mayor aportación a las tareas de reciclaje. Para dicha aplicación, cabría tener en cuenta la posibilidad de que el sistema tuviese un coste menor, por ejemplo escogiendo sensores de menor coste, siempre y cuando dicha elección no comprometa la eficacia del sistema, o eliminando la placa microcontroladora como intermediaria entre los sensores y el sistema de control principal de la aplicación final.

También cabe la posibilidad de adaptar el sistema a máquinas de clasificación continuas, como las que existen actualmente en diferentes centros de tratamiento de residuos, sustituyendo tanto los sensores de medición como las células de carga por sensores capaces de realizar mediciones dinámicas, lo que permitiría clasificar una amplia variedad de envases y un elevado volumen de los mismos en un tiempo considerablemente menor, facilitando de esta manera las labores de reciclado y clasificación.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

02 de diciembre de (último), Clemente Álvarez. (n.d.). ¿Hay que importar el sistema de recogida de envases de Alemania? Retrieved April 21, 2016, from <http://blogs.elpais.com/eco-lab/2010/12/hay-que-importar-el-sistema-de-recogida-de-envases-de-alemania.html>

Duan, F., Wang, Y.-N., Liu, H.-J., & Tan, W. (2004). Empty bottle inspector based on machine vision. In *Machine Learning and Cybernetics, 2004. Proceedings of 2004 International Conference on* (Vol. 6, pp. 3845–3850). IEEE. Retrieved from [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=1380507](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1380507)

Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (1993). *Digital image processing* (Reprinted with corrections). Reading, Mass.: Addison-Wesley.

House, B. W., Capson, D. W., & Schuurman, D. C. (2011). Towards real-time sorting of recyclable goods using support vector machines. In *Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2011 IEEE International Symposium on* (pp. 1–6). IEEE. Retrieved from [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5936845](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5936845)

Nawrocky, M., Schuurman, D. C., & Fortuna, J. (2010). Visual sorting of recyclable goods using a support vector machine. In *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2010 23rd Canadian Conference on* (pp. 1–4). IEEE. Retrieved from [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5575231](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5575231)

Omar, L.-G., Oscar, R.-A., Andres, T.-G., & Francisco, S.-G. (2013). Multimedia inorganic waste separator. In *Multimedia and Expo Workshops (ICMEW), 2013 IEEE International Conference on* (pp. 1–4). IEEE. Retrieved from [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6618314](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6618314)

Shahbudin, S., Hussain, A., Wahab, D. A., Marzuki, M. M., & Ramli, S. (2010). Support vector machines for automated classification of plastic bottles. In *6th*

*International Colloquium on Signal Processing and Its Applications (CSPA)* (pp. 1–5). Retrieved from [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5545265](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5545265)



## Relación de documentos

(X) Memoria .....	55	páginas
(_) Planos y esquemas .....	8	páginas
(_) Presupuesto.....	3	páginas
(_) Pliego de condiciones .....	2	páginas
(_) Anexos .....	29	páginas

La Almunia, a 28 de Junio de 2016

Firmado: DMYTRO RUBAN