



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Física

**MEDIDA EN LÍNEA DE ESPESORES DE
ALUMINIO MEDIANTE TECNOLOGÍA RX**

Autora: María Simal San José
Tutores: Eusebio Solórzano y Suset Barroso
2023

Índice

1. INTRODUCCIÓN	5
2. OBJETIVOS	7
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	8
3.1. ¿Qué son los rayos x?	8
3.2. Producción de Rayos X	9
3.3. Detectores de Rayos X	10
4. MATERIALES Y MÉTODOS	11
4.1 Zonas de medida	12
4.2 Sistema RX	13
4.3 Calibración	18
4.4 Obtención y tratamiento de imágenes	20
4.5 Pruebas con el segundo prototipo	22
4.5.1. Calibración de espesores	22
4.5.2. Medidas de larga duración	22
4.5.3. Defectos Puntuales	23
4.5.4. Variación de la velocidad de la línea	24
5 RESULTADOS	25
5.1 Parámetros sistema RX	25
5.2 Validación del método con la calibración	26
5.3 Pruebas segundo prototipo	32
5.3.1. Calibración de espesores	32
5.3.2. Medidas de larga duración	33
5.3.3. Defectos puntuales	34
5.3.4. Variación de la velocidad de la línea	35
6 CONCLUSIONES	37
7 BIBLIOGRAFIA	39
8. LISTA DE FIGURAS Y TABLAS	40

RESUMEN

El proyecto de Novadep consistía en la comprobación de un método de medida del espesor de las bases de envases de aluminio con tecnología de Rayos X y en la fabricación de un equipo que pudiera realizar esta medida en una etapa temprana de la línea de producción de dichos envases y así descartar los defectuosos. Este trabajo muestra el éxito de la validación del método, consistente en la toma de imágenes de Rayos X y la aplicación de una calibración adecuada, pueden detectarse fallos en los espesores en una línea de producción a una velocidad constante. También se muestra cómo se pone a prueba un prototipo, más parecido a la línea de producción real, para la comprobación de su validez en situaciones que se pueden dar durante la producción y el estudio de posibles cambios para su mejora.

ABSTRACT

The Novadep project aimed to validate a method for measuring the thickness of aluminium can bases using X-ray technology. The main objective was to develop equipment capable of conducting this measurement at an early stage of the production line, thereby allowing the identification and rejection of defective cans. The work demonstrated the successful validation of this method, involving the capture of X-ray images and the application of appropriate calibration. This combination enabled the detection of thickness flaws in a production line operating at a constant speed. Additionally, it outlined the testing of a prototype more akin to the real production line, aimed to confirm its validity in scenarios that could occur during manufacturing. This encompassed the study of potential modifications to enhance its performance.

RELACIÓN CON EL GRADO DE FÍSICA

Durante el grado en física, pasamos por un gran número de asignaturas que abarcan desde la teoría pura hasta aplicaciones prácticas. Mi experiencia en la empresa Novadep Scientific me dejó ver la fascinante intersección entre la física teórica y la aplicación práctica de la tecnología de Rayos X en sistemas personalizados de medida, tema central de este trabajo, y así poder ver aplicaciones reales de lo estudiado en el grado.

El fundamento de los Rayos X se encuentra en los principios fundamentales del Electromagnetismo y la Electrodinámica, asignaturas que en el grado exploran el espectro electromagnético al cual pertenecen los Rayos X. Estos campos de

estudio nos ayudan a comprender fenómenos como la absorción de la radiación, esencial para interpretar las imágenes obtenidas. Además, la Física de Materiales desempeña un papel crucial en este proyecto, ya que el conocimiento detallado de propiedades del material resulta fundamental para comprender la interacción entre los Rayos X y los materiales, permitiendo así determinar con precisión los espesores.

El proceso de ensayo de prototipos durante este proyecto implica la aplicación práctica de los conocimientos adquiridos en asignaturas como Técnicas de Laboratorio que nos permitió trabajar en la toma de medidas sistemática calcular los errores de las medidas entre otras muchas cosas.

La relevancia de la Física Experimental en este proyecto es innegable. Las prácticas realizadas y las habilidades adquiridas en diferentes asignaturas, a parte del laboratorio, donde pudimos utilizar técnicas de Física Experimental brindaron la perspectiva y destreza necesarias para llevar a cabo mediciones precisas, realizar calibraciones adecuadas y garantizar la fiabilidad de los datos recolectados en el desarrollo de sistemas de medida basados en tecnología de Rayos X.

Esta experiencia práctica, junto con un enfoque teórico sólido, demuestra la aplicabilidad de los conceptos estudiados durante el grado en situaciones reales. En resumen, este proyecto representa la aplicación de la teoría estudiada en el grado en el mundo empresarial real.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo surge a raíz del proyecto de Novadep para crear un equipo que permita medir el espesor de la base de envases de aluminio después de la extrusión, en la que los envases pueden alcanzar más de 400 °C [1], y por tanto en el momento de la medida se trabajaría con temperaturas de 100-200 °C. Para ello se utiliza un método de toma de imágenes con tecnología RX. Esta tecnología se basa en los Rayos X, descubiertos por Roentgen en 1895[2].

En un principio utilizados para aplicaciones médicas por su cualidad de que un objeto colocado entre el emisor de RX y el receptor de imagen atenúa la radiación dependiendo de su densidad o estructura [3]. Este principio se ha extendido más allá de la medicina y ha llegado a la industria donde se utiliza cada vez más. En este sentido tenemos ejemplos como su uso en la industria alimentaria, usado para la inspección de los alimentos y así eliminar posibles objetos que hayan contaminado el producto como cristales, piedras etc. Como veremos en este trabajo es una tecnología que no interactúa físicamente con el producto por lo que no lo contamina, importante en el caso alimentario, por ejemplo, y permite hacer una inspección a todas las unidades del producto y no a unas pocas.

También existe un aumento de la demanda, o de la mejora, de esta tecnología para uso en controles de seguridad, no solo para aspecto del día a día como la seguridad de los aviones o trenes si no también existe una demanda por parte de las autoridades para poder realizar inspecciones a todo tipo de mercancías muchas veces buscando equipos personalizados para detectar elementos específicos. Otro campo donde este tipo de tecnología es muy demanda es a la hora de examinar circuitos electrónicos y comprobar que cumple con el diseño. Este principio se ha extendido más allá de la medicina y ha llegado a la industria donde se utiliza cada vez más en la para detectar poros, cavidades u otros defectos en metales[4].

Como hemos dicho, esta tecnología cada vez se extiende a más campos y hay muchos mercados donde se está incluyendo como en la industria de nuevos materiales, donde es una herramienta muy útil para su estudio, en el área militar se está implementando esta tecnología para la comprobación del hardware que poseen. El mercado aeroespacial tiene aproximadamente el 25% del mercado de la inspección con tecnología RX [5].

Esta tecnología de toma de imágenes con RX ya se utiliza en muchas áreas y la medida de espesores de aluminio o la detección de defectos en este material es

una de ellas. Un ejemplo es el estudio de el espesor de oxido en aleaciones de aluminio y en diferentes cristales para lo que se usa reflectividad de Rayos X y espectroscopía fotoelectrónica de rayos X. Se encuentra una excelente coincidencia para los espesores entre los dos métodos con tecnología RX, aunque pequeñas discrepancias con el EIS, Electrochemical Impedance Spectroscopy.[6]

La tecnología utilizada para crear los envases con los que trabajamos puede ayudarnos un poco a entender la necesidad de un equipo como este. El método utilizado para fabricar los envases de aluminio, con los que se trabaja en este proyecto, es la extrusión indirecta, más concretamente la extrusión por impacto. En este proceso, el material fluye en dirección contraria del empuje. En la extrusión por impacto (Figura 1 izquierda) el pistón en vez de empujar el material progresivamente lo golpea de forma súbita con mucha intensidad. Se utilizan monedas de aluminio (Figura 1 derecha) para crear los envases como vemos en la Figura X la parte más crítica es en la base de lo que va a ser nuestro envase que es la que recibe el impacto y donde podemos observar lo que denominamos válvula y que suele presentar los mayores defectos de espesor.[1]

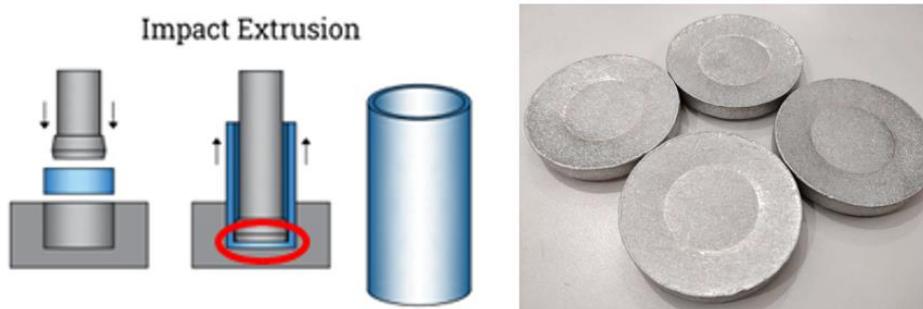


Figura 1: Método por el que se forman los envases y monedas de aluminio de las que se parte.

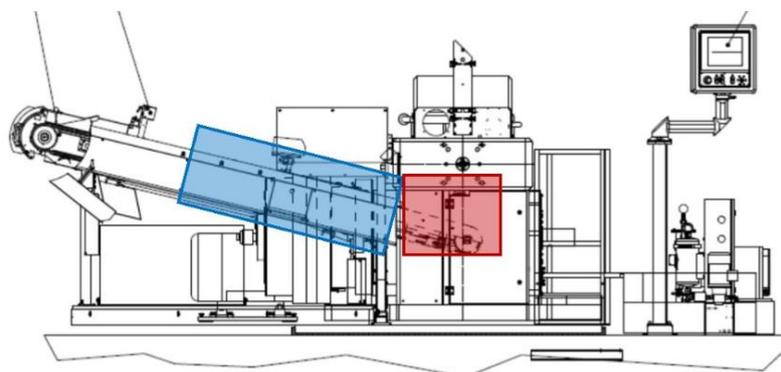


Figura 2: Esquema de la posición del equipo, color azul, respecto a donde se realiza la extrusión, color rojo.

En el caso de este proyecto el equipo es uno personalizado para un cliente en específico. En lo que se basa este trabajo es en la comprobación y validez de la detección de defectos de espesor en una línea de producción activa con imágenes de RX, para lo que se trabaja en un primer momento con un prototipo muy básico (Figura 3 izq.) que permite la validación del método, viendo que los espesores calculados con los RX coinciden con los espesores medidos manualmente, y el testeo de un prototipo más avanzado (Figura 3 derecha) para comprobar su buen funcionamiento en situaciones reales como cambios en la velocidad de la línea de producción, su comportamiento tras horas de funcionamiento entre otros.

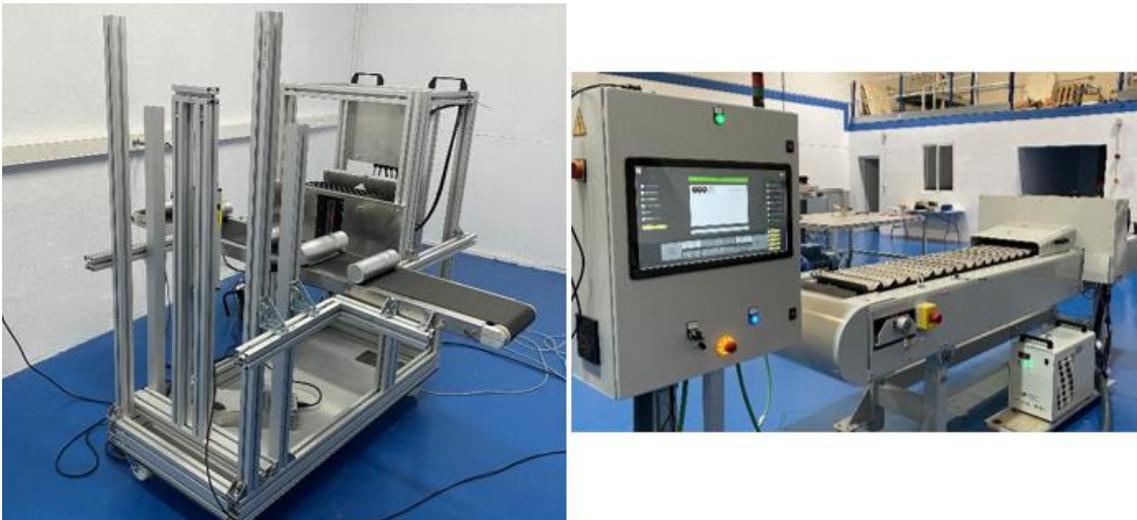


Figura 3: Prototipos utilizados durante la realización de este trabajo.

En este trabajo se pueden ver aplicaciones reales de conceptos tan utilizados durante el grado como la radiación electromagnética, en este caso en forma de Rayos X, en la estructura que se sigue se habla brevemente de los fundamentos teóricos de esta radiación, los métodos utilizados, los resultados obtenidos y finalmente las conclusiones derivadas en el proceso.

2. OBJETIVOS

Los objetivos clave de este trabajo son en primer lugar la comprobación de la validez de la medida de espesores de diferentes objetos, en este caso de las bases de envases de aluminio, tomando imágenes con Rayos X, realizando un procesamiento de las imágenes para elegir las zonas de estudio y haciendo una calibración del sistema para llegar al espesor en mm. En segundo lugar, tendremos la comprobación del funcionamiento del método con toma de imágenes RX a mayor escala y con situaciones que se puedan dar cuando el equipo esté instalado como cambios de velocidades de producción, estudio de la

Compton entre otros[6]. Que se produzca una u otra interacción dependerá de la energía de la radiación.

Para la toma de imágenes hay que centrarse en la absorción ya que dependiendo del tipo de material absorberá de una u otra manera y esto se verá reflejado en la imagen que se toma. Esta absorción se rige por la ley de Bouguer-Beer-Lambert, ecuación (1), que muestra el coeficiente de atenuación en función de la energía de la radiación. En la ecuación identificamos I_0 como la intensidad del haz incidente I la intensidad con la que sale tras atravesar la muestra y d la distancia que recorre la radiación dentro del material que es lo que nosotros llamamos espesor.

$$I(d) = I_0 e^{-\mu d} \quad (1)$$

No se consideran pérdidas por absorción en la atmósfera, dado que su índice de refracción es muy cercano a 1, lo que permite considerar que la transmisión es completa por lo que no tenemos que preocuparnos del aire situado entre la muestra y el origen de los Rayos X o el detector.[7]

Tenemos que tener en cuenta que la ecuación (1) es válida para radiaciones monocromáticas y materiales homogéneos, cosa que no ocurre casi nunca, por eso recurrimos a el coeficiente de atenuación másico efectivo, $\mu_{m,eff}$, que depende a su vez directamente del material como $\mu = \mu_{m,eff} * \rho$.

Durante todo el trabajo trabajaremos con los resultados de esta ley ya que conociendo la intensidad de la radiación emitida y midiendo la que llega al detector podremos hacer una calibración que nos pase esa intensidad a valores de espesor en mm.

3.2. Producción de Rayos X

Cuando partículas cargadas con suficiente energía chocan con un material producen Rayos X. Podemos distinguir entre si se generan con electrones o iones positivos. Nos centramos en el primer caso ya que la forma de generar RX utilizada en este proyecto.

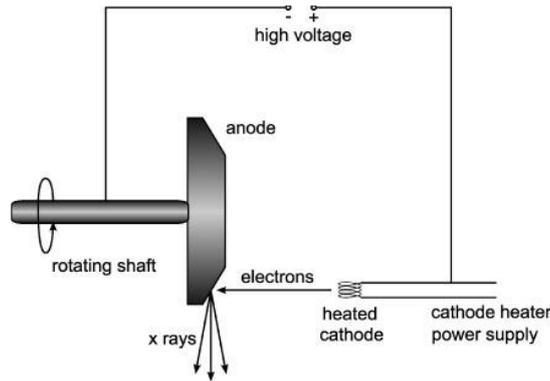


Figura 5: esquema de fuente de Rayos X con ánodo giratorio.[6]

Los Rayos X generados por electrones se producen en Tubo de RX (Figura 5), la forma más antigua de generar esta radiación. En este tubo se aceleran electrones, obtenidos del cátodo, hasta el ánodo con un voltaje de unos 100kV y una vez que chocan se forman los Rayos X. Cuando se produce este choque podemos ver dos procesos de creación de Rayos X: la emisión característica, si el electrón tiene la suficiente energía puede sacar un electrón de las capas internas y electrones de niveles más energéticos llenan los huecos emitiendo en este proceso Rayos X produciendo un espectro de emisión a unas frecuencias discretas. En cambio, cuando los electrones son difractados por el fuerte campo eléctrico de los núcleos con Z alto producen un espectro continuo llamado radiación de frenado o radiación de Bremsstrahlung. Podemos ver un ejemplo de estas dos emisiones en la Figura 6.

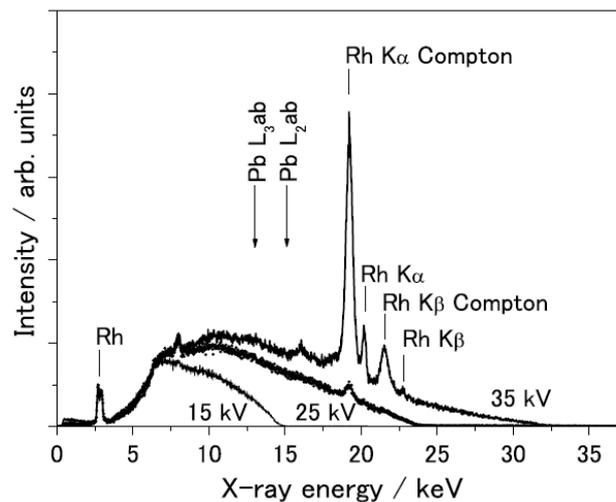


Figura 6: Espectros de placas acrílicas medidos variando el voltaje del tubo de rayos X a 15, 25 y 35 kV donde se pueden ver tanto el espectro continuo como el discreto. [8]

3.3. Detectores de Rayos X

Podemos distinguir diferentes tipos de detectores para medir la intensidad de los Rayos X tras haber atravesado la muestra:

Fósforos fotoestimulables: Este proceso utiliza la luminiscencia fotoestimulada para obtener la radiografía, se usa una placa de fosforo fotoestimulable. Los electrones excitados en el material de fosforo permanecen atrapados en centros de color, que son un tipo de defecto. Se pasa un láser sobre la superficie de la placa y estos electrones, que estaban atrapados, salen en forma de luz que se recoge en un tubo fotomultiplicador y la señal se convierte en una imagen digital. A este proceso se le conoce como radiografía computarizada (RC).

Detectores de semiconductores[9]: Hay dos tipos, directos e indirectos. Los directos convierten los fotones de los Rayos X directamente en carga eléctrica, es decir, en la imagen digital. Los indirectos tienen pasos intermedios, como convertir los Rayos X en luz visible.

- Detectores directos: Los fotones de Rayos X se convierten en pares electrón-hueco en el semiconductor y se recogen para detectar los Rayos X Cuando la temperatura es suficientemente baja (se utiliza el efecto Peltier[10] o nitrógeno líquido para enfriarlo) se puede conseguir directamente el espectro energético.
- Detectores indirectos: Los detectores indirectos convierten, con un centelleador, los Rayos X en luz visible. Este tipo de detectores son los más usados en aplicaciones médicas, dentales, veterinarias e industriales. La luz visible se lee por una hoja de vidrio cubierta con una fina capa de silicio, que está en un estado amorfo o desordenado, en el que se han impreso millones de transistores en una matriz ordenada. Cada uno de estos está conectado a un fotodiodo absorbente de luz que forma un píxel individual. Los fotones que golpean el fotodiodo se convierten en pares electrón-hueco. Dicho número de portadores depende de la intensidad de la luz que llega al fotodiodo por lo que convirtiendo este patrón eléctrico en voltaje y luego en una señal digital se consigue la imagen.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Durante todo el proceso se trabaja con las mismas muestras, 3 tipos de envases de aluminio (Figura 7), suministrados por la empresa ALUCAN ENTEC S.A. Por cada tipo de envase tenemos dos cajas con 10 envases aproximadamente cada una.

Cada tipo de envase presenta un diámetro (\emptyset) diferente y contamos con los datos de los espesores nominales de las bases, es decir, espesores por debajo de estos indicarían un envase defectuoso.

- Envase $\emptyset 59\text{mm}$ \rightarrow fondo 0,5-0,6mm
- Envase $\emptyset 66\text{mm}$ \rightarrow fondo 1,65-1,75mm
- Envase $\emptyset 74\text{mm}$ \rightarrow fondo 1,18-1,25mm



Figura 7: envases de diferentes diámetros.

Los envases están clasificados como OK (envases que cumplen los requisitos de medidas) y NOK (con un espesor por debajo de la tolerancia necesaria para la fabricación, el espesor nominal).

Se han catalogado los envases con la codificación “ \emptyset -NOK-n” o alternativamente “ \emptyset -OK-n” donde \emptyset es el diámetro del tubo, n se refiere al número de envase de una misma caja con el mismo diámetro y la validez del espesor de la base OK/NOK. Por ejemplo, la muestra 59-NOK-7 correspondería al envase número siete de la caja de envases con diámetro de 59 mm con espesor por debajo del nominal y por tanto defectuoso.

4.1 Zonas de medida

Se realizan tres tipos de medidas del espesor de las bases de los envases a lo largo del proceso, una primera medida manual con un comparador, unas medidas con el primer prototipo utilizado y medidas con el segundo prototipo. Para los dos primeros tipos se eligen unas zonas fijas en tres puntos de interés de la base, donde se suelen producir los defectos en el espesor. Con las indicaciones de INGENET y TECJ PRO PACK, empresas colaboradoras de Novadep, se sabe que la zona más crítica de la base de los envases es la de la válvula, correspondiente a la zona B de la Figura 8. El objetivo es entonces poder medir esa zona con el

dispositivo de rayos X. Para tener más referencias, además de esa zona mediremos otras dos, también indicadas en la Figura 8.

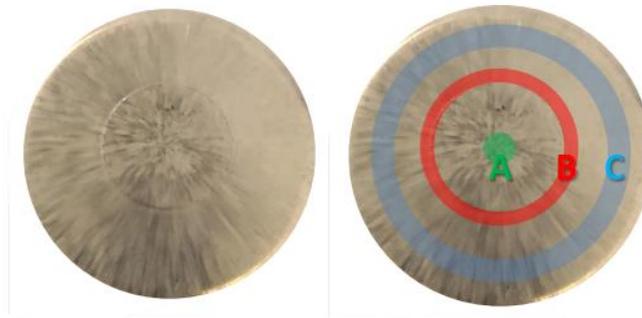


Figura 8: Base de uno de los envases y las zonas de medida elegidas superpuestas en esa base.

Para las medidas con el segundo prototipo, Novadep ha desarrollado un software que elige unas ROI, Region Of Interest, automáticamente cuando se realiza el análisis de imagen, escogiendo una circular que coincida con la base del envase y otra que, como veremos más adelante, podrá seleccionar el usuario.

4.2 Sistema RX

Para los primeros pasos del proyecto se trabajó con un primer prototipo de toma de imagen RX (Figura 9 izquierda) y se realizaron unas medidas manuales de los espesores (Figura 9 derecha) con equipo proporcionado por Novadep.



Figura 9: Diseño del primer prototipo con el que se trabajó y comparador con el que se hicieron las medidas manuales.

En la Figura 9 izquierda podemos ver indicadas las posiciones de:

- **Fuente de Rayos X:** Se ha utilizado un equipo de la marca Spellman mod. XRBD100PN210HR con capacidad de emisión de hasta 100kV y 210W. El rango de parámetros disponibles en el equipo es 35-100 kV y 0.5-4 mA.

- Detector: utilizamos dos diferentes para elegir el más adecuado.
- Cinta que transporta los envases.

En este prototipo tan temprano, mi trabajo consistió en medir los espesores manualmente con el comparador (Figura 9 centro) y tomar imágenes de diferentes envases con dos tipos de detectores Hamamatsu (en concreto se evaluaron los modelos C14300-12U y C14300-05UL) y diferentes parámetros para elegir los más adecuados, para más tarde tratar estas imágenes y comprobar si el método con RX coincide con el método manual de medida.

Para medir los espesores de forma manual se utilizó un reloj comparador, MITUTOYO mod 2046SB, con una resolución de medida de 0,01mm. Compuesto de dos bolas de acero, como la que se muestra en la Figura 9 derecha, de tal forma que cuando están enfrentadas la medida del dispositivo es 0.00mm, lo que permite moviendo la parte superior del dispositivo alojar el envase para realizar las medidas de los espesores de la base.

En la parte de toma de imágenes RX los parámetros que se estudian son:

- Energía: Facilitará una mejor percepción de las diferencias en espesores y el contraste de la muestra. Se emplean valores entre 35 kV y 55 kV después de realizar cálculos preliminares. Por cuestiones de seguridad radiológica, se recomienda usar los valores más bajos que sean efectivos.
- Corriente: Es proporcional a la cantidad de fotones que emite la fuente. Para obtener la mejor calidad de imagen, se sugiere utilizar el amperaje más alto posible, aunque por razones de protección radiológica, se aconseja utilizar el mínimo viable. Trabajaremos en el rango de mA.
- Tiempo de exposición: Se ajusta a una velocidad específica y solo hay un tiempo de exposición en el que la imagen permanece sin deformaciones. Por ende, el tiempo de exposición se mantiene constante debido a esta velocidad y no puede ser modificado.
- Ganancia: Permite optimizar la relación señal/ruido. Dado que el tiempo de exposición es constante, este parámetro posibilita mejorar los valores de la señal dentro del rango dinámico del detector.

Luego se pasó a trabajar en un prototipo mucho más cercano a la línea de producción real con el detector C14300-12U. Como podemos ver en la Figura 10 este segundo prototipo está compuesto por una cinta con velocidad controlable, frente a la anterior que era fija, una zona con protección incorporada, lo que

permite trabajar fuera del bunker, donde encontramos la fuente de Rayos X, el detector y también donde se coloca la pieza que se utiliza para realizar las calibraciones. También cuenta con una consola para el control del equipo con el que el usuario puede interactuar y controlar todo el proceso.

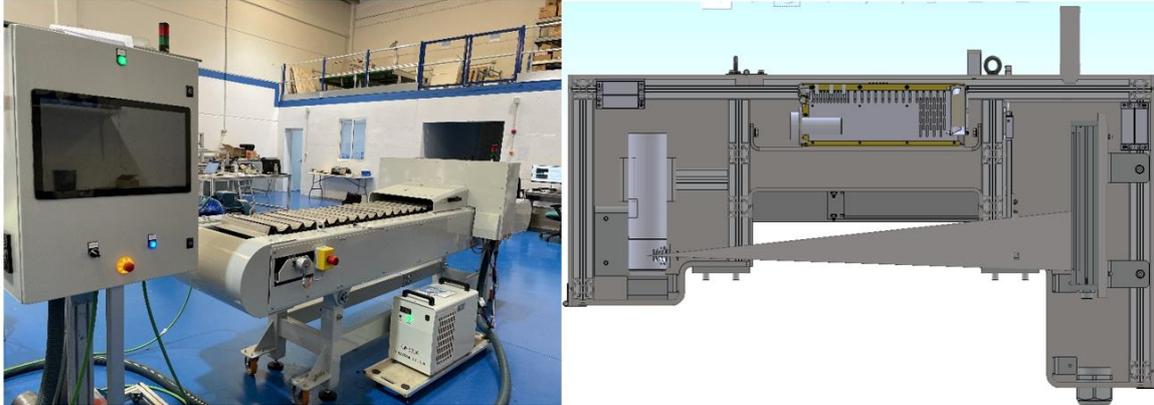


Figura 10: Segundo prototipo con el que se trabaja (derecha) y diseño de la parte protegida donde se encuentran la fuente de RX y el detector y donde se toman las imágenes.

Con este modelo se propuso hacer unas pruebas para realizar cambios en el software y hardware del prototipo. Los objetivos a realizar fueron:

- Comprobar si se podían detectar efectos puntuales
- Comprobar que la calibración de los espesores no se viera afectada
- Pruebas de larga duración
- Comprobar la estabilidad de las medidas a diferentes velocidades.

Uno de los elementos que más diferencian a este modelo respecto al primer prototipo es la consola desde donde se puede controlar todo el proceso. Vamos a describir brevemente que ofrece y su funcionamiento.

Lo primero que nos aparece en la pantalla (Figura 11) son todas las etiquetas de seguridad, unos cuadros con opciones, donde se distinguen entre las disponibles y no disponibles en el momento, y los valores técnicos actuales como el amperaje etc.



Figura 11: Pantalla de la consola con etiquetas de seguridad y lo que se puede realizar con el prototipo.

Si el prototipo no se ha utilizado en las últimas 24 horas se tendría que hacer un calentamiento de la fuente. En la Figura 11 no aparece disponible porque se ha estado trabajando con él previamente en el momento en el que se toma la fotografía. Después se tiene que realizar la corrección del detector para así asegurarnos que para las próximas medidas que se realicen se haya tomado correctamente la radiación de fondo y así poder realizar bien la calibración.

El proceso de corrección del detector tiene las siguientes fases: encendido de RX, comprobación de niveles de gris, eliminación de una corrección anterior, apagado de RX, toma de corrección del Background, encendido de RX y toma de corrección de Shading.

Una vez terminada la calibración habrá disponibles las opciones que se ven en la Figura 11. Lo importante en este punto es escoger los parámetros de producción que nos permitirán elegir el diámetro de los envases con los que trabajamos, la tolerancia (máximo y mínimo de espesor permitidos, envases fuera de esa franja serían expulsados) y el tamaño de la ROI de estudio entre otros como vemos en la Figura 12.

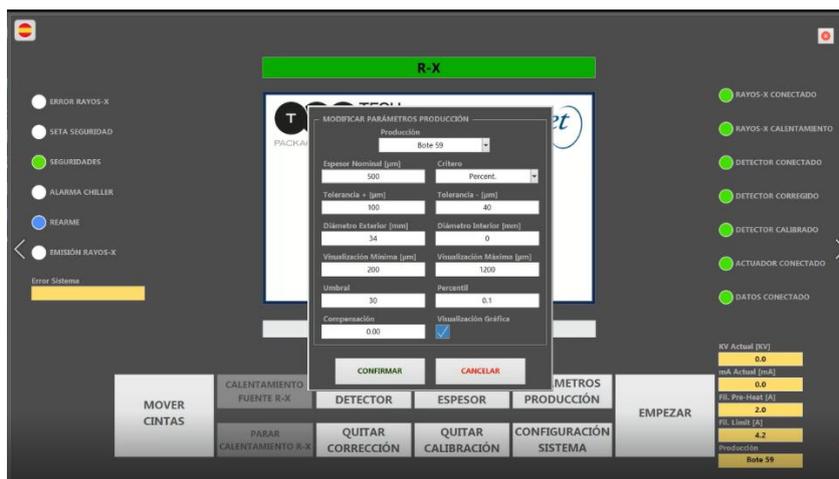


Figura 12: Pantalla de la consola que nos permite escoger con qué vamos a trabajar en la cinta.

Una vez elegido todo esto si se pulsa empezar se pondrá en marcha la cinta, los Rayos X y se pasará a la siguiente pantalla. Como se ve en la Figura 13, en esta pantalla podemos ver la imagen tomada en directo, con el tratamiento ya realizado, gracias al software de Novadep, para poder ver directamente los espesores con una escala de colores a la derecha que nos facilita la comprensión de los resultados de la imagen.

En la parte superior tenemos botones de seguridad, botones para controlar la cinta y los RX y los valores de trabajo que son:

- **KV Actual**: Kilovoltios con los que trabaja el equipo.
- **mA Actual**: Amperaje con el que trabaja el equipo.
- **Fil. Pre-Heat y Fil. Limit**: Valores técnicos del filamento del tubo no importantes para este trabajo.
- **Producción**: diámetro del envase con el que estamos trabajando.
- **Compensación**: valor de offset que se pueda añadir manualmente cuando la calibración se descompensa.
- **Tiempo de exposición**: calculada como $(T_{exp}Calib * VoltajeCalib) / Voltaje$
- **Velocidad[envases/min]**: velocidad a la que se mueve la cinta, calculada como $(PS \text{ real}) / (T_{exp} \text{ real}) [m/min]$ y lo pasamos a $[envases/min]$ sabiendo que tenemos 10.5 envases/m

En la parte inferior izquierda tenemos una gráfica donde aparecen las medidas de cada envase como puntos rojos, las líneas verdes correspondientes a la tolerancia que habíamos escogido y unos cuadros para seleccionar entre las

opciones de visualización de la gráfica que nos permiten elegir entre los valores de espesor que se han medido con la ROI y podemos distinguir entre los valores mínimos de espesor, el valor promedio de espesor o los valores utilizando un percentil, que se puede elegir desde la consola, para quedarnos solo con los adecuados o que nos interesan. En la parte inferior derecha tenemos una gráfica del voltaje de la cinta provisional que se utilizó para comprobaciones del equipo. Se puede apreciar en la imagen que el propio programa realiza una ROI eligiendo la base del tubo, círculo exterior rojo, y que aparece la ROI elegida en la consola como el círculo negro dentro de la base.

En el caso de la Figura 13, la tolerancia elegida no es la adecuada para el tipo de envase elegido y la mayoría serían reconocidos como defectuosos cuando podemos ver claramente en la gráfica la gran diferencia entre los envases con espesores correctos y los que están por debajo del límite. Esto es importante ya que para cada tipo de envase de la producción hay que ajustar los parámetros de trabajo.

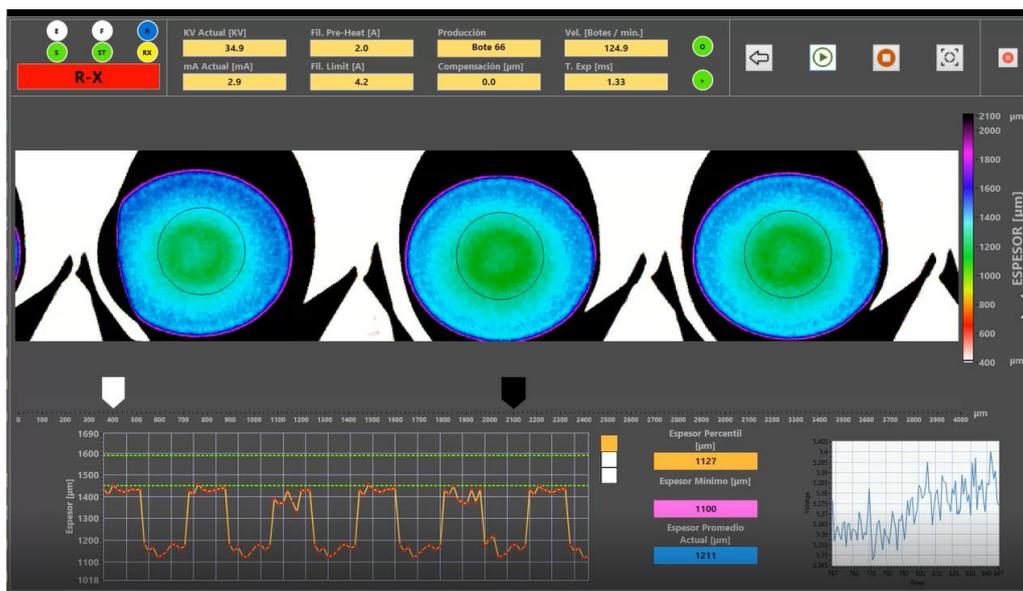


Figura 13: Segunda pantalla de la consola del equipo.

4.3 Calibración

El método de calibración que se usa para poder interpretar los niveles de intensidad de la radiación, que es lo que tenemos en la imagen original, como espesores en mm, se desarrolla trabajando con el primer prototipo y será el mismo para los dos prototipos, aunque en el segundo esté automatizado.

Basándose en la ley de Beer-Lambert se realiza una recta de calibrado para conseguir valores de espesores desconocidos utilizando la siguiente transformación de la ecuación original, donde denominamos t al espesor, que hemos visto en los fundamentos teóricos:

$$-\ln I/I_0 = \mu t \quad (2)$$

Se necesitan unos valores conocidos para poder obtener esta recta. Para ello, se utilizan unas muestras de dos piezas del tubo “66 OK 9” y una del tubo “59 OK 5” como se pueden ver en la Figura 14.1. Las calas se colocan en el accionador que debía ser colocado manualmente en el primer prototipo mientras que en el segundo está automatizado. El resultado de una imagen de esta cala se puede ver en la Figura 14.4.

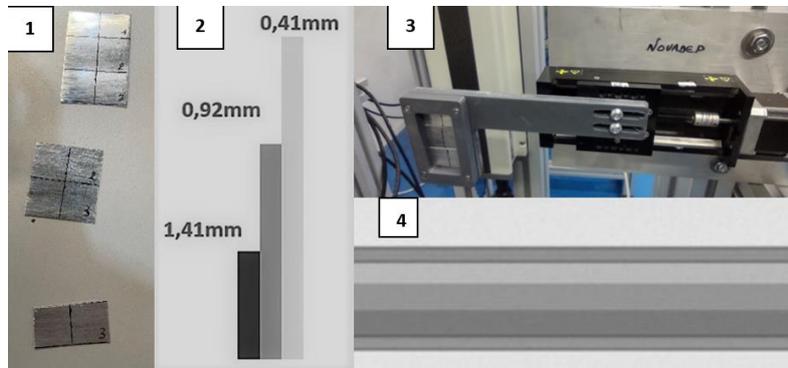


Figura 14: Calas de calibración (1), esquema escalones de las calas con espesores de cada una (2), actuador eléctrico (3) e imagen RX obtenida de las calas (4).

El proceso de calibración en el segundo prototipo sigue los siguientes pasos:

- Encendido de RX
- Adquirir imagen
- Movimiento de las calas a posición de calibración
- Adquirir imagen
- Obtención de los resultados

Una vez terminado este proceso aparece la gráfica y los valores de la calibración en la pantalla para comprobar que es correcta. En apartados siguientes se estudia si una sola calibración nos servirá para todo el tiempo que trabajemos con el sistema o debemos realizar nuevas calibraciones.

4.4 Obtención y tratamiento de imágenes

Con el primer prototipo se trabajó dentro del bunker para la toma de imágenes. Antes de realizarlas se debe hacer un calentamiento de la fuente de Rayos X. El proceso de la toma de imágenes consiste en:

- Ajuste de parámetros
- Captura en modo “live” y tamaño de “buffer” de 500 líneas
- Emisión de Rayos X
- Activación de la cinta
- Detención de la adquisición una vez todos los envases de estudio han pasado el detector.
- Guardado de la imagen en formato TIF, 16bits. Es crucial no comprimir la imagen para que no haya cambio en los valores obtenidos y por tanto alcancemos valores de espesor erróneos al hacer la calibración. En la Figura 15 izquierda podemos ver un ejemplo de la imagen que se toma de la distribución de envases de la Figura 15 derecha.

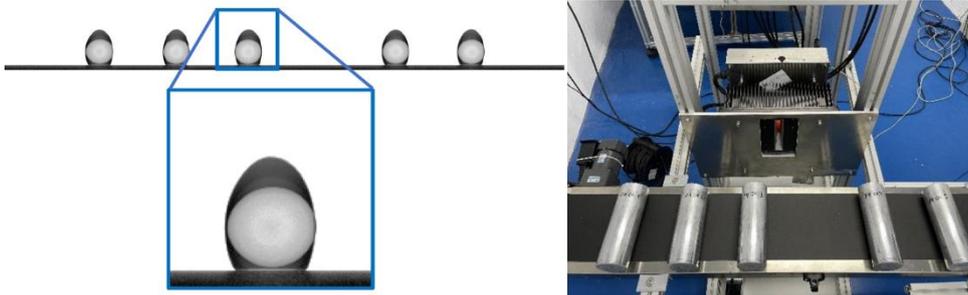


Figura 15: a la izquierda imagen tomada de uno de los envases de 59 mm de diámetro, a la derecha disposición de envases para tomar las imágenes.

Para poder trabajar con valores numéricos de los espesores las imágenes que se han tomado deben pasar un tratamiento con un software de imagen. Se ha utilizado el programa ImageJ[11], en concreto una distribución llamada FIJI. Este programa se ha utilizado para cuatro aplicaciones fundamentales más allá de la visualización de las imágenes o la aplicación de filtros. Estas son:

- Obtención de perfiles radiales: utilizando el plugin “Radial Profile Plot” para conseguir una ROI circular que cubra toda la base del envase.
- Determinar los valores de gris y la desviación estándar en regiones específicas: Utilizando la función “measure” que nos permite calcular estos valores directamente para un estudio más cómodo en la propia imagen.

- Calibración de imágenes en espesor: Utilizando las herramientas matemáticas del software para aplicar la calibración que hemos visto anteriormente y convertir las imágenes directamente con esta aplicación.
- Análisis automático de las zonas de medida: se utiliza un software específico donde se reconoce la forma de la base del envase y el centro automáticamente y se forman 3 ROI's de forma automática.
 - Zona A: ROI circular centrada en el centro del envase de radio 5 píxeles.
 - Zona B: ROI tipo anillo con radio menor y mayor correspondientes al valor de la posición de la válvula ± 2 píxeles.
 - Zona C: ROI tipo anillo radios menor y mayor de 70 y 80 píxeles respectivamente. Siempre tiene un valor fijo.

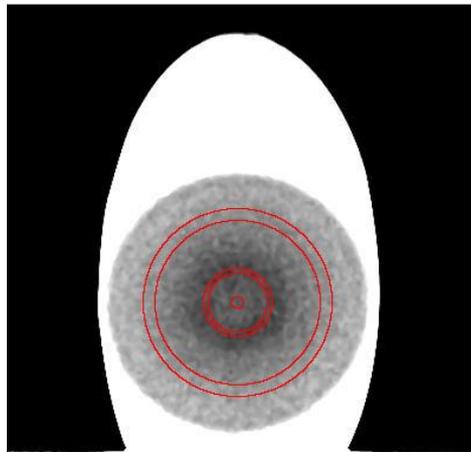


Figura 16: Envase de $\varnothing=66\text{mm}$ y procesamiento automático de espesores en zonas A, B y C.

Podemos ver un ejemplo de esto en la Figura 16. Es preciso indicar que esta incorpora la utilización de un filtro de 2 píxeles para reducir ligeramente el ruido estadístico de las imágenes originales, tal y como se haría en el equipo en línea.

En el segundo prototipo vemos que las imágenes con su correspondiente tratamiento aparecen directamente en la consola y los valores de los espesores se graban automáticamente en el ordenador.

4.5 Pruebas con el segundo prototipo

Cuando trabajamos con este prototipo se buscó comprobar y probar una serie de cosas para mejorar el prototipo. envases que se encuentran en el sistema t con los que se trabaja: 59 OK 11; 59 OK 3; 59 NOK 8; 59 OK 9; 59 NOK 7; 59 OK 8; 74 OK 1; 74NOK 7; 74 OK 4; 74 NOK 6; 74 OK 3; 74 NOK 1; 66 NOK 7; 66 OK 1; 66 NOK 8; 66 OK 8; 66 NOK 10; 66 OK 5; 66 NOK 5

4.5.1. Calibración de espesores

El objetivo era comprobar que la calibración de los espesores es robusta. El proceso de la prueba consiste en una preparación inicial del equipo y dos tipos de pruebas diferentes que llamamos parte A y parte B:

- Calentamiento
- Corrección del detector
- Calibración del espesor
- Elección de los parámetros de selección (se trabaja con un diámetro exterior de 34mm, un diámetro interior de 0 y un percentil 1)
- Se comprueba que la velocidad está al nivel máximo.

Parte A: Se realiza 5 veces seguidas la calibración de espesores sin tomar medidas entre las calibraciones. Se anotan todos los datos de las 5 ecuaciones.

Parte B

1. Iniciamos el sistema y lo dejamos trabajando durante 10 pasadas de los envases.
2. Paramos el sistema recuperamos los datos para analizarlos
3. Realizamos una nueva calibración de espesores
4. Volvemos encender el sistema y lo volvemos a dejar 10 pasadas.
5. Realizamos una nueva calibración.
6. Se repite hasta que hayamos hecho 5 calibraciones.

4.5.2. Medidas de larga duración

El objetivo era comprobar la evolución del sistema cuando está en funcionamiento durante 8/24 horas sin interrupción. Para ello empezaremos con comprobaciones de menos tiempo. Utilizamos un solo envase para comprobar que los datos son estables durante todas las pruebas. Los parámetros que elegimos para el estudio son: diámetro exterior 34mm, diámetro interior 0 mm y percentil 1.

El proceso de la prueba se divide en 2 partes:

Parte A:

1. Calentamiento
2. Corrección del detector
3. Calibración del espesor, se anota la recta.
4. Comprobación de que la velocidad es la máxima
5. Iniciamos el sistema y lo dejamos trabajando durante 1 hora.
6. Paramos el sistema durante 5 minutos (recuperamos los datos para analizarlos).
7. A los 5 minutos arrancamos de nuevo y dejamos trabajando una hora
8. Paramos el sistema durante 30 minutos (se recuperan los datos para analizarlos).
9. A los 30 minutos arrancamos de nuevo y dejamos trabajando durante 3 horas.
10. Se para el sistema y se recuperan los datos para analizarlos.

Parte B:

1. Calentamiento
2. Corrección del detector
3. Calibración del espesor, se anota la recta.
4. Comprobación de que la velocidad es la máxima.
5. Iniciamos el sistema y lo dejamos trabajando durante 2 horas y media.
6. Se para el sistema, se recuperan los datos, se hace una nueva calibración de espesores, anotando la nueva recta, y se vuelve a medir sin tiempo de espera durante 1,5h.
7. Se para el sistema, se recuperan los datos, se hace una corrección del detector, se hace una nueva calibración de espesores, anotando la recta, y se deja trabajando durante otra hora y media.
8. Se para el sistema y se recuperan los datos.

4.5.3. Defectos Puntuales

El objetivo era probar con los percentiles 0.1 y 0.2 de los datos de espesor para ver si los valores promedio/percentil/mínimo son estables o varían mucho en presencia de defectos puntuales, es decir, cuando hubiera un pequeño agujero en la basa o un defecto parecido y no solo si el espesor está por debajo del adecuado. Se trabaja con todos los envases que hay en el sistema centrándonos en el 59 NOK

11 y el 59 OK 3 que son los que tienen los defectos. Los compararemos con los envases 59 NOK 7 y 59 OK 8 que no tienen defectos. Se fija la ROI de análisis de forma que sea un círculo (sin radio interno) de diámetro 34mm.

El proceso de la prueba consiste en:

1. Calentamiento
2. Corrección del detector
3. Calibración del espesor
4. Iniciamos el sistema y tomamos los datos de 10 pasadas de los envases con un percentil 0.1
5. Paramos el sistema y guardamos los datos. Cambiamos el percentil a 0.2 y repetimos la medida del punto 4 y guardamos esos datos.

4.5.4. Variación de la velocidad de la línea

El objetivo es comprobar la estabilidad de los valores a distintas velocidades y como afecta un cambio a los datos. Se harán 2 partes, para la primera se utilizan todos los envases que estaban en un principio en el sistema. Los parámetros que elegimos para el estudio son: diámetro exterior 34mm, diámetro interior 0 mm y percentil 1.

Para la segunda parte pondremos todos los siguientes envases con los parámetros anteriores: 66 OK 10, 66 OK 4, 66 OK 2, 66 OK 6, 66 OK 3, 66 OK 1, 66 OK 7, 66 OK 8, 66 OK 5, 66 NOK 10, 66 OK 7, 66 NOK 5, 66 NOK 2, 66 NOK 8, 66 NOK 9, 66 NOK 11, 66 NOK 3, 66 NOK 4, 66 NOK 6.

La prueba consiste en:

Parte A

1. Calentamiento
2. Corrección del detector
3. Calibración del espesor, se anotan los datos de la recta.
4. Se inicia el sistema a la velocidad máxima, se deja trabajando durante dos pasadas de los envases, se para el sistema y se recuperan los datos.
5. Se repite el punto 4 para otras 7 velocidades.

Parte B

1. Calentamiento
2. Corrección del detector
3. Calibración de espesores, se anotan los datos de la recta.

4. Se inicia el sistema a la velocidad máxima y se dejan pasar una vez los envases a velocidad máxima justo antes de que vuelvan a pasar hacemos un cambio de velocidad que se estabiliza justo antes de que pase los envases. Dejamos que pasen otra pasada sin cambio de velocidad para poder comparar las dos pasadas y repetimos esto con diferentes velocidades.

5 RESULTADOS

5.1 Parámetros sistema RX

Se ha hablado de los parámetros importantes a la hora de realizar las imágenes, nos centramos en dos para optimizar la señal: el tiempo de exposición y la ganancia. Como la velocidad del primer prototipo es fija, el tiempo de exposición también queda fijado por lo que se realiza un barrido de energías para conseguir la zona de mayor contraste y ver mejor las diferencias entre espesores. Se utilizan los siguientes valores para tomar imágenes de los envases “59 OK 10”, “66 Ok 10” y “74 OK 7”:

- 55 kV, 2600 μ A, Gain 3
- 55 kV, 2600 μ A, Gain 4
- 45 kV, 2600 μ A, Gain 4
- 45 kV, 2600 μ A, Gain 5
- 35 kV, 2500 μ A, Gain 5
- 35kV, 2500 μ A, Gain 6

Se crean unas gráficas representando las medidas de la intensidad frente al radio de la base de los envases para los diferentes parámetros elegidos y los dos detectores. Vamos a ver los resultados para el envase “59 Ok 10”.

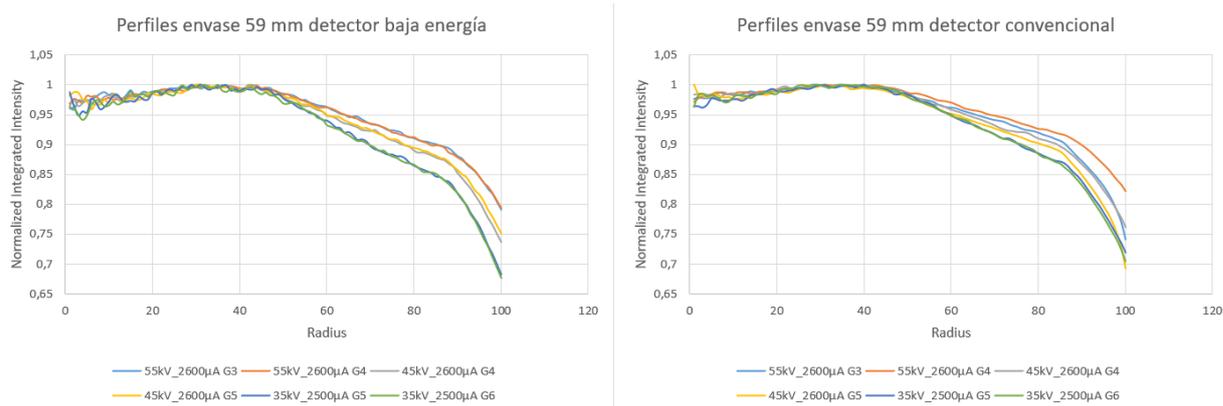


Figura 17: Gráficas de los dos detectores con diferentes parámetros.

Se decidió trabajar con el primer detector, el C14300-12U, ya que el otro es de baja energía y aporta mejores resultados, pero también aumenta el ruido y no compensa esa mínima mejora respecto al precio que tiene el segundo detector. Los parámetros de trabajo que se deciden a partir de las gráficas de la Figura 17 fueron:

- **Energía:** Para permitir ver mejor las diferencias entre espesores y el contraste de la muestra se utilizan valores entre 35 kV y 55 kV después de unos cálculos preliminares.
- **Corriente:** Se utilizan valores entre 3 y 4 mA que es la máxima permitida para este modelo de envase en el rango de energía elegido.
- **Tiempo de exposición:** El tiempo de exposición utilizado en el primer prototipo son 0.95 ms (Una velocidad de 25 m/min sin magnificación). En el segundo prototipo trabajé con diferentes velocidades por lo que el tiempo de exposición también cambiaba.
- **Ganancia:** Se usan los valores de ganancia más bajos posibles pero que nos permitan generar una señal hacia la mitad del rango dinámico del detector (14bits).

5.2 Validación del método con la calibración

Para la calibración se utiliza la imagen de las calas (Figura 14.4) y se toman medidas de las zonas que se ven en la Tabla 1 donde I es la intensidad transmitida e I_0 la intensidad incidente.

Tabla 1: Tabla con los valores de intensidad y espesor de las calas.

	I	I/I₀	-Ln (I/I₀)	espesor (mm)
Zona 1	11749,117	0,8128241	0,207240587	0,41
Zona 2	9475,8519	0,6555557	0,422272008	0,92
Zona 3	7804,1218	0,5399025	0,616366633	1,41
Aire arriba	14455,374			0
Aire abajo	14453,998			0

Con estos valores se realiza un ajuste utilizando una regresión polinómica de grado dos para poder ajustar mejor el cero, obteniendo la ecuación (3). Podemos ver la calibración en la Figura 18.

$$y = 0.6787 x^2 + 1.8738 x \quad (3)$$

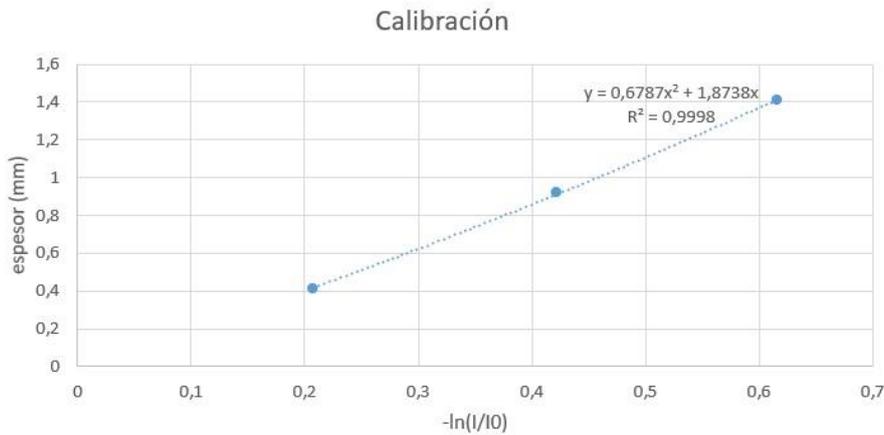


Figura 18: Recta de calibración utilizada en el primer prototipo.

Esta calibración se usa para sacar los espesores de diferentes imágenes de RX y se comparan con las medidas manuales y así ver si la utilización de las imágenes RX para medir los espesores es válida. Cada Zona de los envases se midió 5 veces con el comparador y se usa el promedio de esas 5 medidas para hacer la comparación con la medida de la imagen RX. Podemos ver un ejemplo en la Tabla 2 un ejemplo del resultado de estas medidas para un grupo de envases.

Tabla 2: Valores espesores medidos con el comparadore para envases correctos de 59mm de diámetro.

59 mm OK	Zona A	Zona B	Zona C
Envase 1 ($\pm 0,01$ mm)	0,56	0,51	0,64
Envase 2 ($\pm 0,01$ mm)	0,56	0,52	0,65
Envase 3 ($\pm 0,01$ mm)	0,59	0,54	0,68
Envase 4 ($\pm 0,01$ mm)	0,54	0,49	0,62
Envase 5 ($\pm 0,01$ mm)	0,58	0,52	0,66
Envase 6 ($\pm 0,01$ mm)	0,58	0,51	0,65
Envase 7 ($\pm 0,01$ mm)	0,54	0,48	0,61
Envase 8 ($\pm 0,01$ mm)	0,54	0,48	0,62
Envase 9 ($\pm 0,01$ mm)	0,54	0,50	0,62
Envase 10 ($\pm 0,01$ mm)	0,58	0,53	0,66
Media($\pm 0,01$ mm)	0,56	0,51	0,64
SD	0,02	0,02	0,02

En la Tabla 3 observamos una comparación entre medidas con el comparador y con la imagen de Rayos X para comprobar si este segundo método nos da resultados congruentes con las medidas con el comparador.

Tabla 3: comparación espesores promedio medidos con el comparador y con la imagen RX.
*Los elementos en rojo corresponden a medidas con discrepancia mayor de la aceptable.

		Medida RX (mm)	Medida comparador ($\pm 0,01$ mm)	Discrepancia Entre métodos
59 OK 4	Zona A	0,544	0,540	0,004
	Zona B	0,501	0,492	0,009
	Zona C	0,759	0,624	
59 NOK 4	Zona A	0,374	0,362	0,012
	Zona B	0,323	0,292	0,031
	Zona C	0,541	0,422	
66 OK 8	Zona A	1,632	1,600	0,032
	Zona B	1,601	1,576	0,025
	Zona C	1,869	1,788	
66 NOK 9	Zona A	1,286	1,262	0,024
	Zona B	1,242	1,232	0,01
	Zona C	1,582	1,438	
74 OK 7	Zona A	1,275	1,240	0,035
	Zona B	1,181	1,140	0,041
	Zona C	2,182	1,876	

Vemos que la zona C aparece una gran discrepancia entre los dos métodos de medida frente a las otras zonas. Esto ocurre porque la zona C es muy amplia y varía mucho. La medida realizada con el comparador y la que se realiza en la imagen de Rayos X no son en el mismo punto.

Para comprobar la validez en la zona C de medida se tomó la base de tres envases y se cortaron a la mitad para hacer un perfil de medidas con un pie de rey y compararlo con un perfil de medidas sacadas de su imagen tomada con Rayos X. Podemos ver un ejemplo de estos perfiles en la Figura 19. Para analizar los perfiles se toma un ROI de anchura mínima y altura de la base, se escalan las distancias de las imágenes de la misma forma que se hace para tomar medidas con el pie de rey.



Figura 19: Base seccionada de un envase para realizar las medidas del perfil.

En la Figura 20 vemos la comparación de los dos perfiles para un envase de diámetro igual a 74. Se observa que hay una congruencia con los valores de espesor obtenidos con los dos métodos. Las desviaciones máximas son de 0.08mm, pero podemos ver al ser las discrepancias positivas y negativas que se puede deber a la dificultad de la toma de medidas en los mismos puntos espaciales.

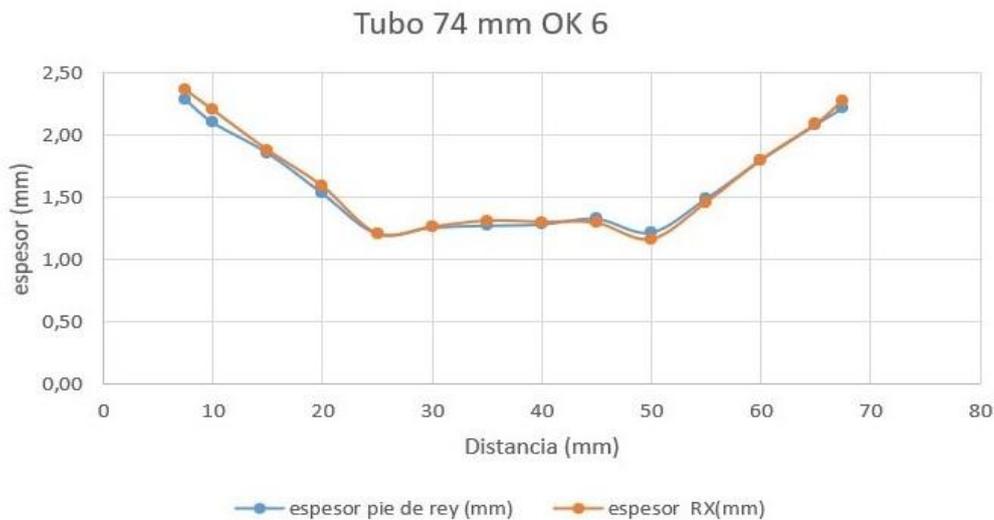


Figura 20: Comparación perfiles de espesor.

Se debe comprobar también que este método se pueda utilizar durante todo el tiempo que la línea de producción esté activa, incluso con la fuente encendida durante varias horas, por lo que se estudia la repetitividad. Se utilizan para esta prueba los envases 9 OK 4, 59 NOK 4, 66 OK 8, 66 NOK 9 y 4 OK 7.

Se realizan 3 tandas de medida como dice a continuación:

- 15 medidas cada 10 minutos incluyendo la toma de imagen de las calas de espesores de espesores al principio y al final de la tanda.
- 20 medidas cada 5 minutos incluyendo la toma de imagen de las calas de espera al principio y al final de la tanda
- Realización de una nueva calibración del detector (tomas de Background y Shading) y posterior toma de 15 imágenes cada 5 minutos con tomas de imágenes de calas de referencia.

Entre las primeras medidas y las segundas se tubo que parar el equipo por ajustes técnicos ajenos a la prueba. Se ven medidas del fondo de todas las imágenes de los envases en la Figura 21, y se observa que va decreciendo hasta que parece estabilizarse y de repente sufre una subida porque se hace una nueva calibración del detector, y vuelve a decaer como en la primera parte. Este efecto entra dentro de lo esperado y, además, apenas supone una desviación de las medidas.

Podemos concluir que el cambio, unas 100 cuentas sobre 14000 solo supone una desviación del 0.7%, mientras que después del calibrado solo sería de unas 20 cuentas, un 0.2%.

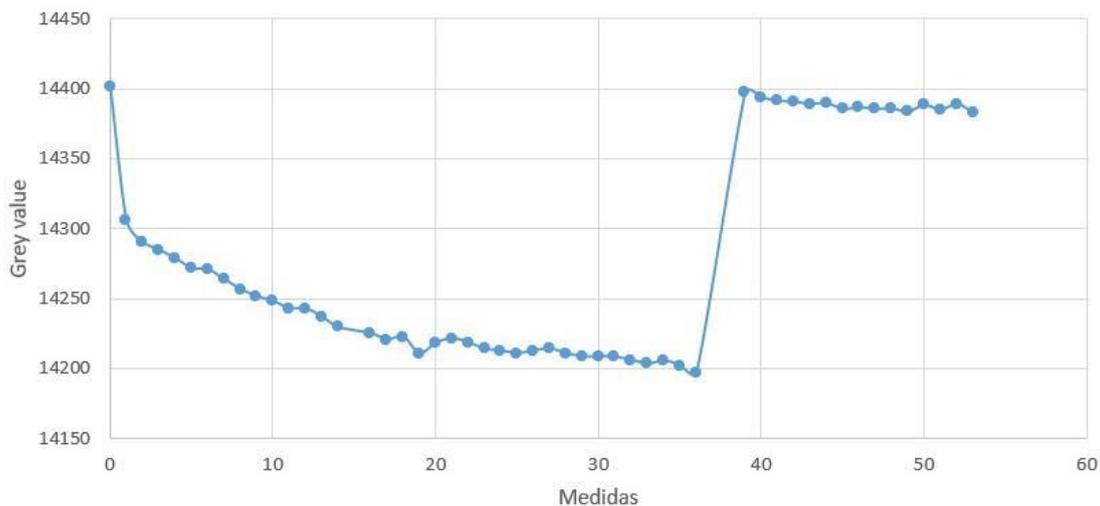


Figura 21: Evolución temporal de la intensidad de fondo del detector.

En la Tabla 4 se recogen los valores promedio de espesor medidos en cada una de las tandas para las 3 zonas y el promedio de la desviación estándar asociado a cada una de las medidas individuales. El envase de diámetro 74 se midió de forma automática como se ha explicado anteriormente y también aumentando el tamaño de la ROI de la zona de análisis A de un círculo de radio 5 píxeles a uno de 7 píxeles y el tamaño de la zona B de un anillo de 4 píxeles un anillo de 6 píxeles sobre la zona de la válvula.

Tabla 4: valor promedio de los espesores en las tres zonas y sus desviaciones.

		Zona A			Zona B			Zona C		
		Espesor (mm)	SD	Δ_{max}	Espesor (mm)	SD	Δ_{max}	Espesor (mm)	SD	Δ_{max}
59 OK 4	Media Medidas 1-14	0,555	0,016	0,032	0,508	0,021	0,011	0,722	0,032	0,013
	Media Medidas 15-34	0,553	0,014	0,031	0,506	0,020	0,009	0,724	0,031	0,015
	Media Medidas 35-49	0,554	0,014	0,023	0,507	0,019	0,010	0,727	0,032	0,015
66 OK 8	Media Medidas 1-14	1,655	0,024	0,062	1,594	0,028	0,012	1,842	0,036	0,013
	Media Medidas 15-34	1,657	0,024	0,056	1,591	0,026	0,017	1,841	0,034	0,011
	Media Medidas 35-49	1,658	0,024	0,045	1,593	0,027	0,023	1,843	0,034	0,009
74 OK 7	Media Medidas 1-14	1,275	0,019	0,042	1,187	0,029	0,031	1,732	0,067	0,021
74 OK 7 *	Media Medidas 1-14	1,276	0,020	0,034	1,188	0,030	0,030	1,732	0,067	0,021

Hemos aplicado un código de color para comprender rápidamente la validez de las medidas donde aparecen en verde valores menores de 0.02, en naranja valores comprendidos entre 0.02 y 0.04 y en rojo valores mayores de 0.04. Hay que indicar que la desviación máxima es el criterio más restrictivo para este estudio.

5.3 Pruebas segundo prototipo

Vamos a ver los resultados que se obtuvieron para el segundo prototipo en las pruebas que se han descrito anteriormente.

5.3.1. Calibración de espesores

Parte A:

Obtenemos las siguientes ecuaciones para 5 calibraciones:

Calibración 1: $y = -0,459 + 1,369x + 0,038x^2$

Calibración 2: $y = -0,459 + 1,369x + 0,038x^2$

Calibración 3: $y = -0,457 + 1,369x + 0,038x^2$

Calibración 4: $y = -0,458 + 1,369x + 0,038x^2$

Calibración 5: $y = -0,457 + 1,369x + 0,038x^2$

Vemos que hay pequeñas discrepancias en las ecuaciones, pero del orden de milésimas por lo que no serían significativas. Vamos a ver en la segunda parte si las calibraciones afectan a la medida

Parte B:

Calibración 1: $y = -0,455 + 1,369x + 0,038x^2$

Calibración 2: $y = -0,456 + 1,369x + 0,038x^2$

Calibración 3: $y = -0,455 + 1,369x + 0,038x^2$

Calibración 4: $y = -0,454 + 1,369x + 0,038x^2$

Calibración 5: $y = -0,454 + 1,369x + 0,038x^2$

Vamos a comparar los datos de la calibración 5 con los de la calibración 2 ya que son los que más diferencia tienen.

Tabla 5: Comparación de las dos calibraciones más extremas entre ellas.

	CALIBRACIÓN 2		CALIBRACIÓN 5	
	74 OK 1	74 NOK 7	74 OK 1	74 NOK 7
Media del espesor promedio	1,2051	1,0596	1,2063	1,0615
Ajustándolo a los decimales del error	1,21	1,06	1,21	1,06

Vemos que, aunque tomamos las dos calibraciones más alejadas, los resultados de las medidas redondeadas al error del equipo son iguales por lo que podemos decir que, aunque haya varios procesos de calibración entre medias de las medidas esto no afecta.

5.3.2. Medidas de larga duración

En la Figura 22 vemos el resultado de la parte A completa donde se pueden observar las paradas en el sistema que requería el procedimiento. Vemos que a lo largo de la prueba completa se ve una tendencia de aumento con el paso del tiempo y que con las paradas del equipo se recuperan un poco los valores iniciales, pero no se rompe con esa tendencia. Esto tenemos que tenerlo en cuenta ya que, aunque en estos resultados no afecta mucho ya que solo aumenta en las centésimas, si dejásemos trabajando la maquina indefinidamente sí que podría afectar a las medidas.

No se pudo realizar la segunda parte por falta de tiempo ya que al realizar la prueba nos encontramos algunos outliers que no sabíamos a que correspondían. Mas tarde pudimos comprobar que se debían a unas interferencias con otro equipo de la misma sala.

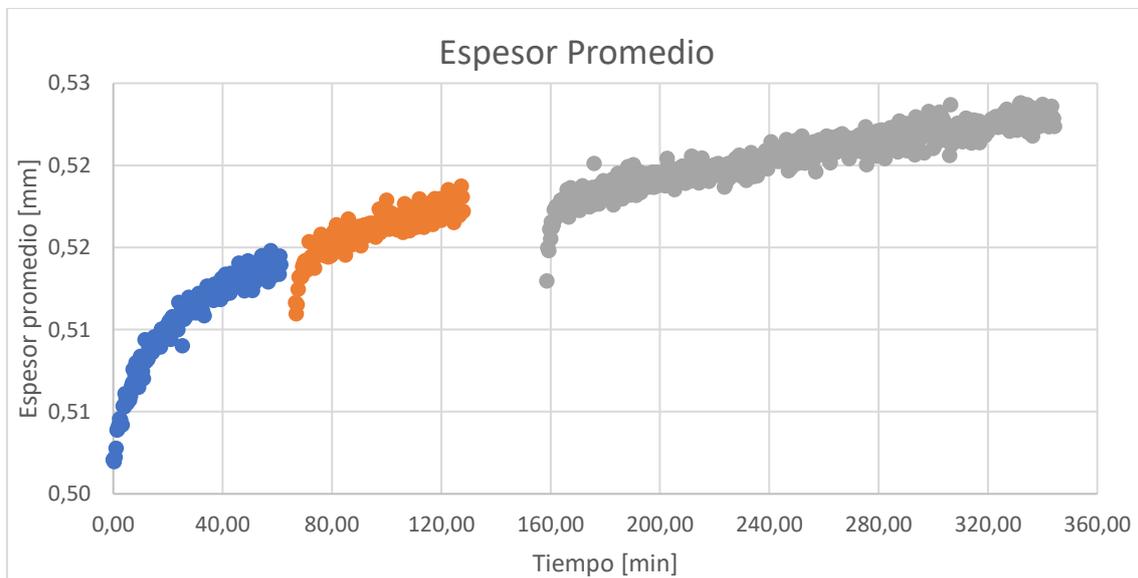


Figura 22: Medidas del espesor promedio durante la prueba de larga duración.

5.3.3. Defectos puntuales

Hacemos el promedio de las 10 pasadas para cada uno de los envases mencionados. Vemos su comparación en las siguientes tablas para cada percentil. (No se utilizan los datos de la primera medida porque se observan valores inusuales causados porque todavía estaba aumentando la velocidad la cinta, error humano al realizar la medida).

Tabla 6: Comparación espesores de envases con defecto y sin defecto para un percentil elegido igual a 0,1.

	Percentil 0,1			
	con defecto		Sin defecto	
	59 OK 3	59 NOK 11	59 OK 8	59 NOK 7
promedio espesor mínimo	0,383	0,154	0,419	0,187
promedio espesor promedio	0,564	0,284	0,492	0,264
promedio espesor percentil	0,402	0,172	0,423	0,191

Tabla 7: Comparación espesores de envases con defecto y sin defecto para un percentil elegido igual a 0,2.

	Percentil 0,2			
	con defecto		Sin defecto	
	59 OK 3	59 NOK 11	59 OK 8	59 NOK 7
promedio espesor mínimo	0,388	0,155	0,422	0,188
promedio espesor promedio	0,566	0,285	0,493	0,265
promedio espesor percentil	0,442	0,198	0,427	0,195

No se aprecia una diferencia clara que muestre el que tiene defecto. Se repiten las medidas para estos envases con los mismos percentiles, pero en el software se ha eliminado la aplicación de uno de los filtros que se aplicaba dos veces para comprobar si se puede deber a eso.

Tabla 8: Comparación espesores de envases con defecto y sin defecto para un percentil elegido igual a 0,1 y la eliminación de un filtro.

CON UN FILTRO MENOS	Percentil 0,1			
	con defecto		Sin defecto	
	59 OK 3	59 NOK 11	59 OK 8	59 NOK 7
promedio espesor mínimo	0,381	0,137	0,414	0,187
promedio espesor promedio	0,565	0,283	0,491	0,263
promedio espesor percentil	0,403	0,166	0,422	0,191

Tabla 9: Comparación espesores de envases con defecto y sin defecto para un percentil elegido igual a 0,2 y la eliminación de un filtro.

CON UN FILTRO MENOS	Percentil 0,2			
	Con defecto		Sin defecto	
	59 OK 3	59 NOK 11	59 OK 8	59 NOK 7
promedio espesor mínimo	0,379	0,137	0,412	0,184
promedio espesor promedio	0,565	0,283	0,490	0,263
promedio espesor percentil	0,428	0,194	0,422	0,192

Se siguen sin apreciar pruebas suficientes que distingan a los que tienen el defecto, se prueba a bajar el filtro, anteriormente un filtro medio igual a 2, y probar con los mismos percentiles.

Tabla 10: Comparación espesores de envases con defecto y sin defecto para un percentil elegido igual a 0,1 con el filtro aplicado igual a 1.

SOLO UN FILTRO IGUAL A 1	Percentil 0,1			
	Con defecto		Sin defecto	
	59 OK 3	59 NOK 11	59 OK 8	59 NOK 7
promedio espesor mínimo	0,361	0,134	0,395	0,166
promedio espesor promedio	0,562	0,283	0,491	0,262
promedio espesor percentil	0,386	0,161	0,405	0,176

En la Tabla 10 podemos ver que el espesor mínimo es menor, pero no radicalmente, para el que tiene el defecto, pero en los espesores promedio y percentil no indican nada significativo.

Llegamos a la conclusión de que este prototipo, con el software en el momento en el que se realizan las pruebas, no nos indica claramente los envases que tienen defectos puntuales y no podríamos utilizarlo para detectar estos fallos.

5.3.4. Variación de la velocidad de la línea

Parte A:

Tenemos la Figura 23 y la Tabla 11 centrándonos en un envase de 74mm de diámetro, como ejemplo, pero para todos los diámetros se ve que las desviaciones cuando desciende la velocidad llegan como máximo a las 2 centésimas, que es prácticamente el error de medida que buscamos por lo que estos cambios en la velocidad no afectan a las medidas.

Tabla 11: Valores de la medida de los espesores con RX en función de la velocidad

Velocidad[envases/min]	T.Exp [ms]	1/T.Exp.[1/ms]	74 OK
208,6	0,73	1,37	1,23
191,5	0,8	1,25	1,23
161,7	0,94	1,06	1,22
136,2	1,12	0,89	1,22
106,4	1,43	0,70	1,22
85,1	1,79	0,56	1,22
63,8	2,39	0,42	1,22
42,6	3,58	0,28	1,21

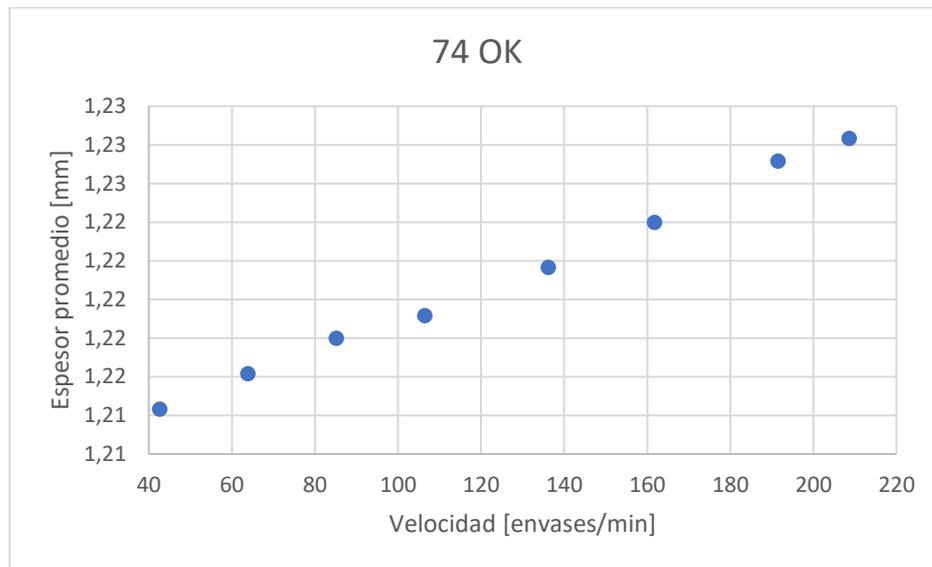


Figura 23: Gráfica del espesor de un envase de diámetro 74 frente a la velocidad de la línea.

Parte B:

Como podemos ver en la Figura 24 en las 9 pasadas que se realizan al mismo grupo de envases, cada una con una velocidad diferente cambiándola justo en el último momento, la medida del espesor de cada envase no sufre cambios, esto nos dice que podríamos hacer cambios en la velocidad sin que afecte a las medidas de los siguientes envases. Hay que tener en cuenta que si se toman imágenes RX de los envases cuando se está cambiando la velocidad no se verían correctamente ya que el cambio de velocidad está ocurriendo simultáneamente a la toma de imágenes, pero si se comprueba que distintos cambios no afectan a las medidas.

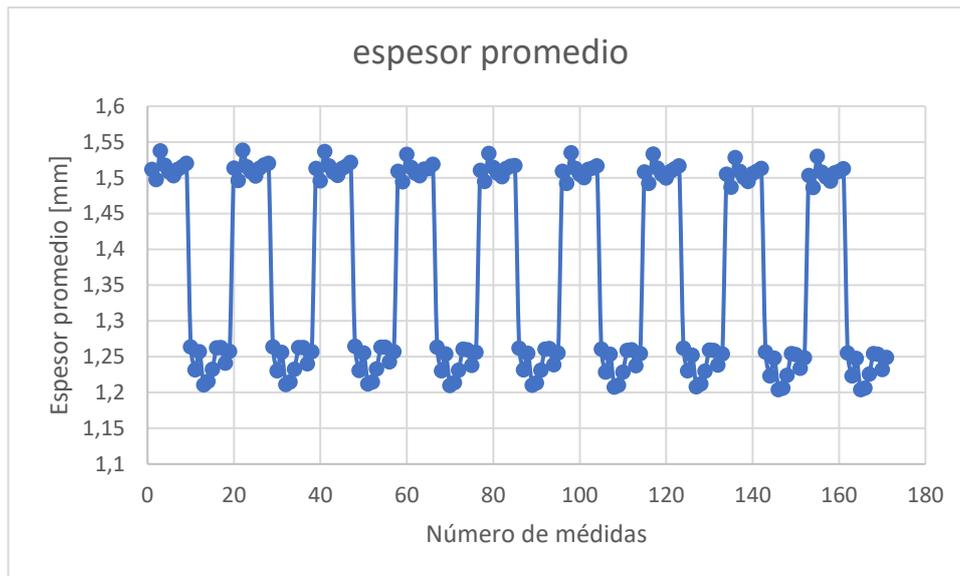


Figura 24: Gráfica de los espesores de diferentes tomas de imágenes del mismo grupo de envases.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo el objetivo principal era comprobar si el método de toma de imágenes de Rayos X era viable para la medida de espesores en la base de envases creados por extrusión de impacto justo después de este proceso en una línea de producción a una velocidad. A lo largo del proyecto se han trabajado con distintos prototipos, métodos y materiales y se han podido poner en práctica conocimientos adquiridos durante el grado. Se ha comprobado que este método con RX efectivamente nos permite medir los espesores de las bases de los envases con el error de medida que pedía el cliente además de ver que para la problemática que tenían, donde los envases defectuosos tienen un espesor claramente menor, este método permitiría sin problemas la identificación de estos envases para su expulsión en una etapa temprana de toda la producción.

Una vez comprobado que el método era válido, viendo que con las imágenes de RX podemos distinguir claramente envases “OK” y “NOK”, se hicieron ajustes en un prototipo más cercano a esa producción real para ver si se podía implementar y no surgían problemas adicionales. Se ha visto que el equipo puede trabajar a distintas velocidades sin que afecte a las medidas y que cambios repentinos en la velocidad antes de la medida tampoco interfiere. Se ha comprobado también que la realización de calibraciones no afecta a las medidas y se pueden realizar cuando sean necesarias. El trabajo continuado del equipo por un tiempo prolongado afecta a las medidas de la forma en la que se esperaba y la posible desviación de los valores; es decir la discrepancia con los valores

patrón, no superaban los 0,01mm. Además, esa desviación se puede corregir con calibraciones o correcciones del detector. Se constata que con este método hemos sido capaces de detectar fallos en el espesor. Uno de los test que se hizo con el segundo equipo fue para intentar detectar un defecto puntual, en nuestro caso una punción, que sería equivalente a una falla de material. Los resultados no fueron concluyentes, pero sería un campo en el que se podría avanzar y así detectar con un mismo equipo varios defectos.

Vemos que este equipo y este método de medida de espesores puede tener muchas más aplicaciones desde medida para otros materiales, productos o diferentes líneas de producción. Que con este equipo se haya conseguido obtener las imágenes en condiciones de producción facilita la comprobación de la calidad sin paradas de línea y por tanto limitando costes de producción. Así mismo es un método que permite el estudio de todos los envases y no solo de algunos pertenecientes a un lote cosa que puede ser muy útil en la industria alimentaria.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] P. (Pradip) Saha, *Aluminum extrusion technology*. ASM International, 2000.
- [2] R. F. Mould, “Röntgen and the discovery of X-rays,” *Br J Radiol*, vol. 68, no. 815, pp. 1145–1176, Nov. 1995, doi: 10.1259/0007-1285-68-815-1145.
- [3] OTHA W. LINTON, “Medical Applications of X Rays.”
- [4] F. HERBERT ATTIX, W. WILEY-VCH Verlag GmbH, and C. KGaA, “INTRODUCTION TO RADIOLOGICAL PHYSICS AND RADIATION DOSIMETRY.”
- [5] “https://science.nasa.gov/ems/01_intro/.”
- [6] Stefan P. Hau-Riege, *High-Intensity X-Rays – Interaction with Matter*.
- [7] T. G. Mayerhöfer, S. Pahlow, and J. Popp, “The Bouguer-B Beer-Lambert Law: Shining Light on the Obscure,” *ChemPhysChem*, vol. 21, no. 18, pp. 2029–2046, Sep. 2020, doi: 10.1002/cphc.202000464.
- [8] N. Sasaki, K. Okada, and J. Kawai, “X-ray tube spectral measurement method for quantitative analysis of X-ray fluorescence analysis,” *X-Ray Spectrometry*, vol. 39, no. 5, pp. 328–331, 2010, doi: 10.1002/xrs.1271.
- [9] R. J. Nicholas, “Semiconductor Detector Systems (Semiconductor Science and Technology).”
- [10] V. A. Drebuschak, “The Peltier effect,” *J Therm Anal Calorim*, vol. 91, no. 1, pp. 311–315, Jan. 2008, doi: 10.1007/s10973-007-8336-9.
- [11] A. B. Schroeder, E. T. A. Dobson, C. T. Rueden, P. Tomancak, F. Jug, and K. W. Eliceiri, “The <sc>ImageJ</sc> ecosystem: Open-source software for image visualization, processing, and analysis,” *Protein Science*, vol. 30, no. 1, pp. 234–249, Jan. 2021, doi: 10.1002/pro.3993.

8. LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

<i>Figura 1: Método por el que se forman los envases y monedas de aluminio de las que se parte.</i>	6
<i>Figura 2: Esquema de la posición del equipo, color azul, respecto a donde se realiza la extrusión, color rojo.</i>	6
<i>Figura 3: Prototipos utilizados durante la realización de este trabajo.</i>	7
<i>Figura 4: Representación del espectro electromagnético. [5]</i>	8
<i>Figura 5: esquema de fuente de Rayos X con ánodo giratorio.[6]</i>	10
<i>Figura 6: Espectros de placas acrílicas medidos variando el voltaje del tubo de rayos X a 15, 25 y 35 kV donde se pueden ver tanto el espectro continuo como el discreto. [8]</i>	10
<i>Figura 7: envases de diferentes diámetros.</i>	12
<i>Figura 8: Base de uno de los envases y las zonas de medida elegidas superpuestas en esa base.</i>	13
<i>Figura 9: Diseño del primer prototipo con el que se trabajó y comparador con el que se hicieron las medidas manuales.</i>	13
<i>Figura 10: Segundo prototipo con el que se trabaja (derecha) y diseño de la parte protegida donde se encuentran la fuente de RX y el detector y donde se toman las imágenes.</i>	15
<i>Figura 11: Pantalla de la consola con etiquetas de seguridad y lo que se puede realizar con el prototipo.</i>	16
<i>Figura 12: Pantalla de la consola que nos permite escoger con qué vamos a trabajar en la cinta.</i>	17
<i>Figura 13: Segunda pantalla de la consola del equipo.</i>	18
<i>Figura 14: Calas de calibración (1), esquema escalones de las calas con espesores de cada una (2), actuador eléctrico (3) e imagen RX obtenida de las calas (4).</i>	19
<i>Figura 15: a la izquierda imagen tomada de uno de los envases de 59 mm de diámetro, a la derecha disposición de envases para tomar las imágenes.</i>	20
<i>Figura 16: Envase de $\varnothing=66\text{mm}$ y procesamiento automático de espesores en zonas A, B y C.</i>	21
<i>Figura 17: Gráficas de los dos detectores con diferentes parámetros.</i>	26
<i>Figura 18: Recta de calibración utilizada en el primer prototipo.</i>	27
<i>Figura 19: Base seccionada de un envase para realizar las medidas del perfil.</i>	29
<i>Figura 20: Comparación perfiles de espesor.</i>	30
<i>Figura 21: Evolución temporal de la intensidad de fondo del detector.</i>	31

<i>Figura 22: Medidas del espesor promedio durante la prueba de larga duración.</i>	33
<i>Figura 23: Gráfica del espesor de un envase de diámetro 74 frente a la velocidad de la línea.</i>	36
<i>Figura 24: Gráfica de los espesores de diferentes tomas de imágenes del mismo grupo de envases.</i>	37
<i>Tabla 1: Tabla con los valores de intensidad y espesor de las calas.</i>	27
<i>Tabla 2: Valores espesores medidos con el comparadore para envases correctos de 59mm de diámetro.</i>	28
<i>Tabla 3: comparación espesores promedio medidos con el comparador y con la imagen RX. *Los elementos en rojo corresponden a medidas con discrepancia mayor de la aceptable.</i>	28
<i>Tabla 4: valor promedio de los espesores en las tres zonas y sus desviaciones.</i>	31
<i>Tabla 5: Comparación de las dos calibraciones más extremas entre ellas.</i>	32
<i>Tabla 6: Comparación espesores de envases con defecto y sin defecto para un percentil elegido igual a 0,1.</i>	34
<i>Tabla 7: Comparación espesores de envases con defecto y sin defecto para un percentil elegido igual a 0,2.</i>	34
<i>Tabla 8: Comparación espesores de envases con defecto y sin defecto para un percentil elegido igual a 0,1 y la eliminación de un filtro.</i>	34
<i>Tabla 9: Comparación espesores de envases con defecto y sin defecto para un percentil elegido igual a 0,2 y la eliminación de un filtro.</i>	35
<i>Tabla 10: Comparación espesores de envases con defecto y sin defecto para un percentil elegido igual a 0,1 con el filtro aplicado igual a 1.</i>	35
<i>Tabla 11: Valores de la medida de los espesores con RX en función de la velocidad</i>	36