



---

**Universidad de Valladolid**

Facultad de Ciencias

Grado en Física

TRABAJO FIN DE GRADO

**DESARROLLO DE MÉTODOS  
AVANZADOS PARA LA  
DETERMINACIÓN DE MAPAS DE  
DENSIDAD MEDIANTE  
TECNOLOGÍA RX EN PLACAS  
CERÁMICAS DE GRAN FORMATO**

---

AUTOR: **Gabriela Slavova Slavova**

TUTOR/ES: **Eusebio Solórzano y Javier Pinto**



# Índice general

<b>RESUMEN</b> .....	10
<b>ABSTRACT</b> .....	10
<b>RELACIÓN CON EL GRADO EN FÍSICA</b> .....	11
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	13
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	15
<b>3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	16
3.1 Características de los rayos X.....	16
3.2 Interacción de los rayos X con la materia.....	17
3.3 Sistemas generadores de rayos X.....	19
3.3.1 Tubo de rayos X.....	19
3.4 Sistemas detectores de rayos X.....	23
3.4.1 Detectores convencionales .....	24
3.4.2 Detectores de detección directa .....	25
3.5 Campos de aplicación de los sistemas detectores multienergía .....	25
<b>4 MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	29
4.1 Componentes utilizados .....	29
4.2 Software utilizado.....	36
4.2.1 Software de control.....	36
4.2.2 Software de tratamiento de imágenes .....	37

4.3	Materiales utilizados .....	38
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>43</b>
5.1	Procedimiento de adquisición de datos.....	43
5.2	Tratamiento de datos .....	46
5.3	Calibración mediante probetas.....	48
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>55</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>57</b>

# Índice de figuras

FIGURA 1. ESQUEMA DEL SISTEMA ACTUAL (IZQUIERDA) CON DOS TELÉMETROS Y UN FOCO PUNTAL FRENTE AL SISTEMA DE DOBLE ENERGÍA (DERECHA) CON UN HAZ CÓNICO Y UN DETECTOR LINEAL. LAS FLECHAS INDICAN EL MOVIMIENTO DEL BARRIDO REALIZADO. ....	14
FIGURA 2. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO: ENERGÍA, FRECUENCIAS Y LONGITUDES DE ONDA. ....	16
FIGURA 3. LEY DE ABSORCIÓN DE BEER-LAMBERT. EL HAZ INCIDENTE DE RAYOS X ABSORBIDO POR EL MATERIAL DE ESPESOR $T$ , DENSIDAD $\rho$ Y COEFICIENTE DE ABSORCIÓN LINEAL $\mu$ . ....	18
FIGURA 4. IZQUIERDA: COEFICIENTE DE ATENUACIÓN EN FUNCIÓN DE LA ENERGÍA DE ELEMENTOS TÍPICOS PRESENTES EN CERÁMICAS. DERECHA: COEFICIENTE DE ATENUACIÓN EN FUNCIÓN DEL NÚMERO ATÓMICO, $Z$ . ....	18
FIGURA 5. ESPECTRO DE EMISIÓN DE RAYOS X. ....	19
FIGURA 6. TUBO DE RAYOS X. ....	20
FIGURA 7. LA REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DEL PUNTO FOCAL PERMITE EVITAR SOMBRAS Y DESENFOCOS. ....	21
FIGURA 8. ESQUEMA DE LA MAGNIFICACIÓN DEBIDA A UN HAZ CÓNICO. ....	22
FIGURA 9. ENDURECIMIENTO DEL HAZ: EL ESPECTRO DE ENERGÍA DEL HAZ INCIDENTE (AZUL) CAMBIA A UN ESPECTRO MÁS ESTRECHO (ROJO) AL PASAR POR UN FILTRO DE ALUMINIO DE 1CM. ....	23
FIGURA 10. SISTEMAS DE DETECCIÓN DIRECTA E INDIRECTA. ....	24
FIGURA 11. COEFICIENTE DE ATENUACIÓN EN FUNCIÓN DE LA ENERGÍA DE ELEMENTOS TÍPICOS EN UNA RADIOGRAFÍA DE TÓRAX. ....	26

FIGURA 12. RADIOGRAFÍA COMPUTARIZADA A BAJA (IZQUIERDA) Y ALTA (DERECHA) ENERGÍA Y LOS PESOS CORRESPONDIENTES DE TEJIDO Y HUESO SEGÚN SU ATENUACIÓN. ....	26
FIGURA 13. SUSTRACCIÓN DEL MATERIAL DE INTERÉS MEDIANTE EL MÉTODO DE DOBLE ENERGÍA. ....	27
FIGURA 14. DETECTORES DE EQUIPAJE DOBLE ENERGÍA. ....	27
FIGURA 15. XRBD MONOBLOCK® DE SPELLMAN: FUENTE DE RAYOS X Y CONTROLADOR. ....	29
FIGURA 16. VISTA LATERAL. XRBD MONOBLOCK® DE SPELLMAN: FUENTE DE RAYOS X Y CONTROLADOR. ....	30
FIGURA 17. SISTEMA C13938-9627 DOBLE ENERGÍA. ....	30
FIGURA 18. TARJETA C13938-9627 DOBLE ENERGÍA.....	31
FIGURA 19. ESQUEMA 3D DEL DETECTOR CON LA TARJETA CONTROLADORA Y EL MÓDULO DE IMAGEN DIGITAL EN SU INTERIOR.....	32
FIGURA 20. ESQUEMA GENÉRICO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL: FUENTE DE RAYOS X, DOS CINTAS TRANSPORTADORAS, DETECTOR DE RAYOS X DE DOBLE ENERGÍA Y EL OBJETO A ESCANEAR. ....	33
FIGURA 21. ESQUEMA DEL CAMINO ÓPTICO PARA DISTINTAS DISTANCIAS FUENTE - DETECTOR. ....	34
FIGURA 22. CAMINO ÓPTICO EN EL CENTRO Y EN LOS EXTREMOS DEL DETECTOR DE 100.8MM DE ANCHO PARA DIFERENTES DISTANCIAS FUENTE – DETECTOR. ....	35
FIGURA 23. RELACIÓN DEL PORCENTAJE DE INTENSIDAD PERDIDA CON EL INCREMENTO DE LA DISTANCIA RECORRIDA. ....	36
FIGURA 24. FUNCIONES MATEMÁTICAS Y MACROS EN FIJI. ....	38

FIGURA 25. COEFICIENTE DE ATENUACIÓN MÁSIKO FRENTE A LA ENERGÍA PARA LOS PRINCIPALES COMPUESTOS CON LOS QUE SE CONFECCIONA EL MATERIAL DE FABRICACIÓN DEL OBJETO A ANALIZAR. ....	39
FIGURA 26. COEFICIENTE DE ATENUACIÓN MÁSIKO TEÓRICO EN FUNCIÓN DE LA ENERGÍA PARA EL GRES PORCELÁNICO. ....	40
FIGURA 27. ESQUEMA 3D DE LAS PROBETAS CILÍNDRICAS DEL MATERIAL A ANALIZAR. ....	41
FIGURA 28. FOTO DE LAS PROBETAS EMPLEADAS. ....	42
FIGURA 29. SISTEMA DE ADQUISICIÓN. ....	43
FIGURA 30. CONTROL DE LA FUENTE. ....	44
FIGURA 31. FILTROS DE DISTINTOS MATERIALES Y ESPESORES. ....	44
FIGURA 32. PROGRAMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS. IMAGEN SUPERIOR: SEÑAL RECIBIDA POR CADA UNO DE LOS DOS CANALES. IMAGEN INFERIOR: ADQUISICIÓN DE LA IMAGEN EN TIEMPO REAL. ....	45
FIGURA 33. ESCALADO DE LA IMAGEN ADQUIRIDA POR UN FACTOR 7 EN EL EJE X. ....	46
FIGURA 34. CORRECCIÓN DEL "BACKGROUND". ....	47
FIGURA 35. CORRECCIÓN DEL "SHADING". ....	48
FIGURA 36. SELECCIÓN DE LA REGIÓN DE LA IMAGEN PARA MEDIR LOS VALORES DE INTENSIDAD TRANSMITIDA. ....	49
FIGURA 37. AJUSTE DE LA ECUACIÓN (5) PARA 120kV SIN FILTRO Y LOS VALORES DE BAJA Y ALTA ENERGÍA. ....	51
FIGURA 38. AJUSTE LINEAL DE LA RELACIÓN ENTRE COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE BAJA Y ALTA ENERGÍA FRENTE A LA ENERGÍA EFECTIVA. ....	53

# Índice de tablas

TABLA 1. COMPOSICIÓN DEL GRES PORCELÁNICO.....	38
TABLA 2. DENSIDADES TEÓRICAS DE CADA COMPUESTO Y SU CONTRIBUCIÓN EN PORCENTAJE AL GRES PORCELÁNICO. ....	40
TABLA 3. ESPECIFICACIONES DE LAS NUEVE PROBETAS CILÍNDRICAS.....	42
TABLA 4. VALORES MEDIDOS DE LA INTENSIDAD TRANSMITIDA A TRAVÉS DE CADA PROBETA PARA 120kV SIN FILTRO. VALORES DEL AJUSTE DE LA FIGURA 36. ....	50
TABLA 5. VALORES EXPERIMENTALES DEL COEFICIENTE DE ATENUACIÓN MÁSCO CON SU CORRESPONDIENTE ENERGÍA EFECTIVA PARA LOS DISTINTOS FILTROS Y ENERGÍAS.....	52



## **RESUMEN**

En este trabajo se presenta un estudio sobre la determinación de la densidad de placas cerámicas mediante imagen de rayos X. A tal fin se utilizarán técnicas de imagen de doble energía utilizando un detector específico que permite captar, de forma simultánea, imágenes de la pieza a dos energías diferentes: una energía baja (rango 30 – 70kV) y una energía alta (rango 80 – 160kV). A través de calibraciones previas y mediante un software es posible obtener mapas de densidad de las piezas estudiadas combinando la absorción de la pieza a baja y alta energía.

## **ABSTRACT**

In this work is presented a study about determination of the density of ceramic plates by means of X-ray image. To this end, it will be used double energy imaging techniques using a specific detector that allows captured images of the piece simultaneously at two different energies: a low energy (range 30 – 70kV) and a high energy (range 80 – 160kV). Trough previous calibrations and by means of a software it is possible to obtain density maps of the studied pieces combining the absorption of the piece at low and high energy.

## RELACIÓN CON EL GRADO EN FÍSICA

Durante el grado se “bombardea” al alumno con miles de conceptos teóricos que tienen aplicación en nuestro día a día, pero muchos alumnos no son (somos) conscientes de ello. Un intento de comprender el mundo de la física y el uso que se le da más allá de lo académico mediante aplicación de los conceptos y fundamentos físicos me impulsó a realizar prácticas en una empresa externa, Novadep Scientific, que se dedica al diseño, desarrollo y construcción de sistemas innovadores personalizados basados en los rayos X para aplicaciones científicas y tecnológicas. Como fruto de esta experiencia surge la realización de este TFG.

Los rayos X es un tema que se menciona durante todo el grado en diversas asignaturas; no hay alumno de física que no se haya topado con el espectro electromagnético. En las asignaturas de *Electromagnetismo* y *Electrodinámica* se estudian las ondas electromagnéticas, siendo los rayos X un ejemplo de estas ondas. De gran ayuda también son los conceptos y fundamentos de la óptica ondulatoria y el scattering. Además, en *Electrodinámica* se estudia la radiación de frenado o Bremsstrahlung y las direcciones en las que se emite según la velocidad de la partícula. En las asignaturas de *Mecánica Cuántica* y en *Física Nuclear* se estudia, mediante las transiciones de electrones de un nivel de energía a otro, cómo se emite radiación de distintas longitudes de onda según la diferencia de energía. En *Técnicas experimentales III* se obtiene el espectro de emisión de rayos X y en *Técnicas experimentales IV* se observa la interacción con la materia de las radiaciones ionizantes y el alumno se familiariza con distintos tipos de detectores.

Una experiencia como esta, aplicando los conceptos aprendidos en el grado, lleva a comprender la importancia de la física en el día a día y su gran aplicación en distintas áreas.



# 1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo está motivado por la necesidad que se presenta en el sector de fabricación de cerámicas de medir la distribución de densidad real de las baldosas (especialmente aquellas de gran formato) mediante técnicas de alta resolución espacial y temporal (resultado en pocos minutos). Este procedimiento se realiza previamente a su cocción, una vez ajustado el molde multi – punzón de fabricación. El objetivo fundamental es evitar desviaciones de densidad en toda la baldosa que puede generar desviaciones dimensionales y curvaturas significativas en la pieza final. Actualmente se emplea un dispositivo que cumple dicha función, sin embargo, presenta diversas limitaciones técnicas lo cual ha impulsado la fabricación de un nuevo dispositivo mejorado, de precisión similar al actual, basado en la técnica de doble energía.

El dispositivo actual se basa en un detector puntual y dos telémetros que pretenden ser sustituidos por un detector array lineal que emplea la detección de rayos X (RX) de doble energía. El nuevo dispositivo mejora el equipo RX actual permitiendo obtener resultados en un menor tiempo de escaneo (menor número de barridos hechos a la pieza) y sin la necesidad de usar telémetros. Es decir, un sistema de medición de la densidad más eficiente y a la vez más económico. Para cumplir dicho objetivo se va a emplear el gran poder de penetración de los rayos X como técnica no destructiva para inspeccionar la estructura interna de los materiales. El método de doble energía permite la generación de imágenes de rayos X en dos rangos de energías: una energía baja (30 – 70kV) y una energía alta (80 – 160kV). Una vez obtenidas las imágenes, mediante el software correspondiente, se hace un análisis de las imágenes en ambos rangos para determinar de forma directa la densidad sin conocer el espesor de la pieza.

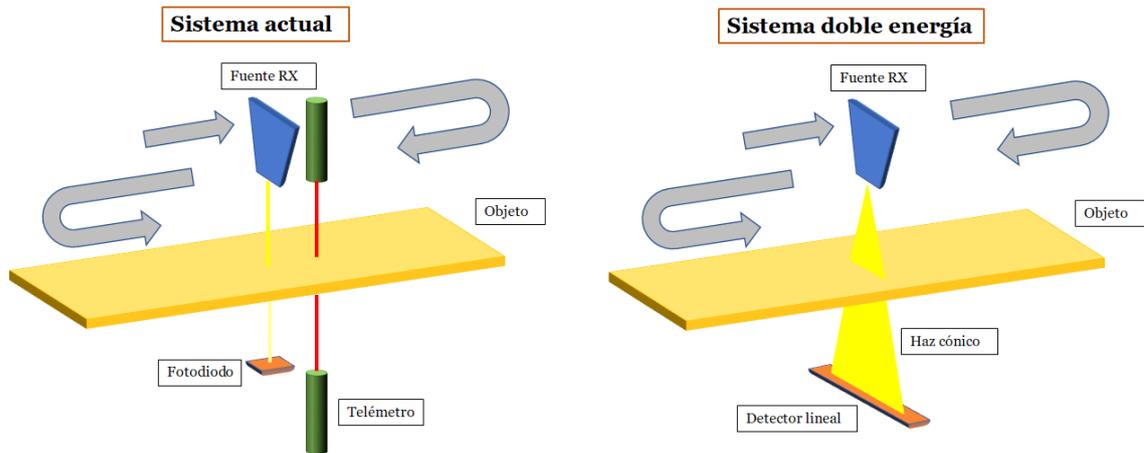


Figura 1. Esquema del sistema actual (izquierda) con dos telémetros y un foco puntal frente al sistema de doble energía (derecha) con un haz cónico y un detector lineal. Las flechas indican el movimiento del barrido realizado.

En la elaboración del trabajo se van a tratar fundamentos y conceptos físicos. En el grado en Física se estudia en numerosas ocasiones el espectro electromagnético y las distintas radiaciones, sin embargo, se menciona muy poco su aplicación en el día a día. La aplicación de los rayos X que todo el mundo conoce es sobre todo en el ámbito de la medicina, sin embargo, su aplicación en la industria es enorme, desde los detectores de rayos X en los aeropuertos hasta el análisis de cualquier pieza para conocer datos relevantes de ésta. La aplicación de los rayos X en la industria toma un papel cada vez más importante debido a las necesidades que surgen en las grandes empresas y fábricas y con el afán de mejorar las técnicas ya existentes.

La estructura de este trabajo consta de una breve introducción de los fundamentos teóricos necesarios. Una descripción de la metodología, así como de los dispositivos y software utilizados. Por último, se expondrán los resultados conseguidos, así como las conclusiones obtenidas.

## 2 OBJETIVOS

El objetivo fundamental de este trabajo es el estudio de una configuración adecuada y las condiciones óptimas para determinar la densidad de placas cerámicas de gran formato mediante el nuevo sistema de doble energía que sustituirá el sistema de los dos telémetros. Sin embargo, no se tratará la determinación de la densidad por la complejidad existente y la obligación de confidencialidad y protección de secretos empresariales de la empresa en colaboración con este trabajo.

Para conseguir nuestro objetivo vamos a desarrollar modelos de absorción teóricos que serán posteriormente comparados con los resultados obtenidos experimentalmente para obtener las condiciones buscadas. Además, se utilizarán conceptos, como el camino óptico, para determinar la configuración óptima que permitirá llegar al paso previo a la determinación de los mapas de densidad aparente.

### 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 3.1 Características de los rayos X

Los rayos X fueron descubiertos de manera accidental por Wilhelm Conrad Röntgen en el año 1895. Tan sólo unos meses después, se comenzaron a fabricar las primeras fuentes de rayos X comerciales para usos tanto médicos como industriales [1].

Los rayos X son ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia al igual que los rayos gamma pero estos dos tipos se diferencian por su origen. Esta alta frecuencia dota a estas ondas de una energía singularmente alta que a la postre puede ionizar partículas, siendo por tanto potencialmente dañinas para los organismos vivos. El rango de la longitud de onda de este tipo de radiación es desde aproximadamente  $10^{-8}$  m, los llamados rayos X blandos, hasta  $10^{-12}$  m que se corresponde a los rayos X duros. Por tanto, el rango de la energía de esta radiación es desde 100 eV hasta unos pocos MeV (Figura 2).

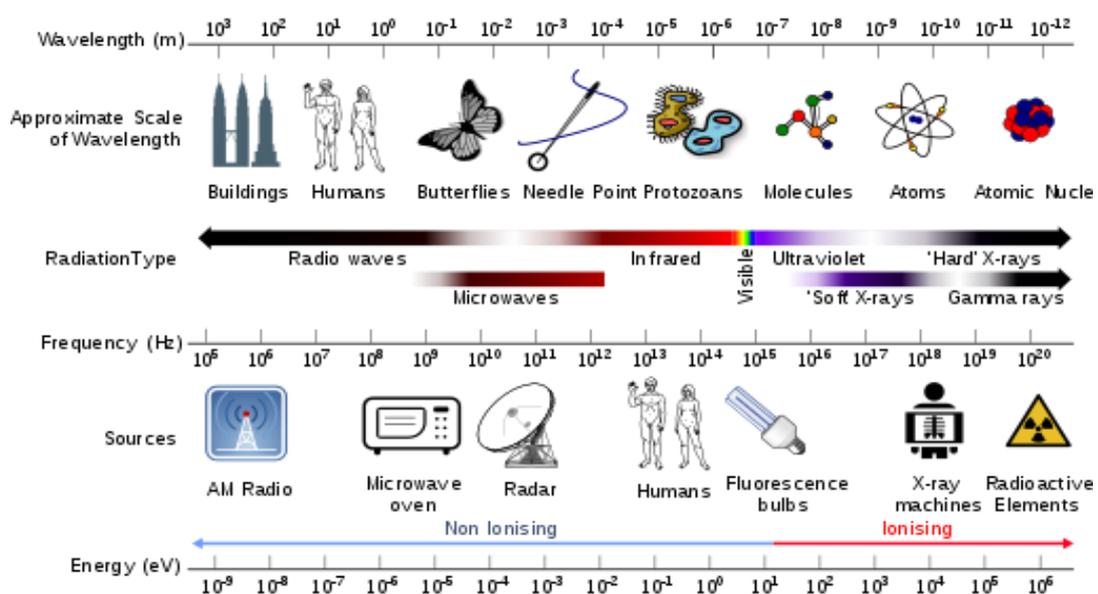


Figura 2. Espectro electromagnético: energía, frecuencias y longitudes de onda.

El gran poder de penetración de los rayos X permite el estudio de la estructura interna de los objetos de manera no destructiva. A este fin, los rayos X utilizados han de estar adaptados a las características y espesor del material. No deben ser demasiado blandos porque su transmisión sería nula ni muy duros porque la

absorción del objeto sería mínima, una imagen radiográfica muy pobre. Así pues, es importante ajustar el poder de penetración (energía de los rayos X) a las características del objeto (material constitutivo y espesor efectivo) [2].

### 3.2 Interacción de los rayos X con la materia

En el apartado anterior se hizo referencia a la absorción de la radiación en los objetos ante los rayos X; esta absorción se rige por la ecuación (1) conocida como la ecuación de Beer–Lambert e indica un decaimiento exponencial de la radiación que es transmitida al atravesar un medio material. La fracción de intensidad transmitida dependerá del coeficiente de absorción másico,  $\mu_m$ , dependiente de la naturaleza del material (número atómico  $Z$ ), de su espesor ( $t$ ) y de su densidad ( $\rho$ ). Sin embargo, esta ley de absorción se puede aplicar, tan sólo, a medios homogéneos (un sólo elemento químico) y radiación monocromática. Obviamente, en muchos casos el material empleado no es homogéneo y el tubo de rayos X emite radiación policromática. Por tanto, se introduce el coeficiente de atenuación másico efectivo,  $\mu_{m,eff}$  (2), haciendo posible el uso de la ley de absorción para medios no homogéneos y radiaciones policromáticas[3]. También es posible definir un coeficiente de atenuación lineal,  $\mu$  (3), para eliminar la influencia de la densidad del material[4], [5].

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \rho t) \quad (1)$$

$$I = I_0 \exp(-\mu_{m,eff} \rho t) \quad (2)$$

$$\mu_{m,eff} = \frac{\mu}{\rho} \quad I = I_0 \exp(-\mu t) \quad (3)$$

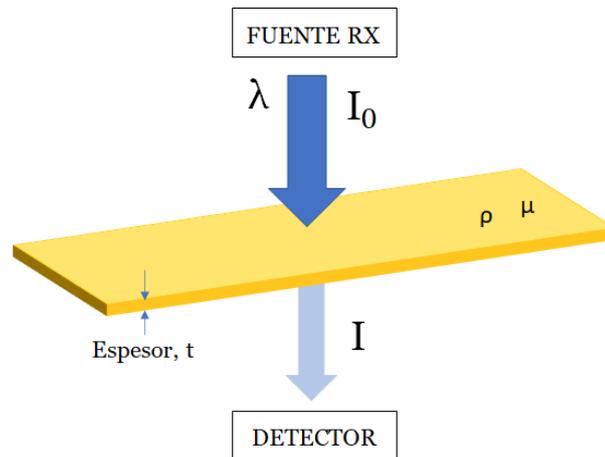


Figura 3. Ley de absorción de Beer-Lambert. El haz incidente de rayos X absorbido por el material de espesor  $t$ , densidad  $\rho$  y coeficiente de absorción lineal  $\mu$ .

El coeficiente de atenuación varía con la energía del haz incidente, cuanto mayor es la energía menor es el coeficiente de atenuación siendo menor la absorción de los rayos X por el material. Por otra parte, el coeficiente de atenuación también varía con el número atómico,  $Z$ , del material siendo frenada la radiación para materiales con números atómicos altos y pasando casi sin ser absorbida para materiales con números atómicos bajos (Figura 4, derecha).

A modo de ejemplo, en la Figura 4 (gráfico izquierdo) se representa el coeficiente de atenuación en función de la energía para algunos elementos químicos a partir de los cuales se confeccionan las baldosas que necesitamos para la elaboración de este trabajo.

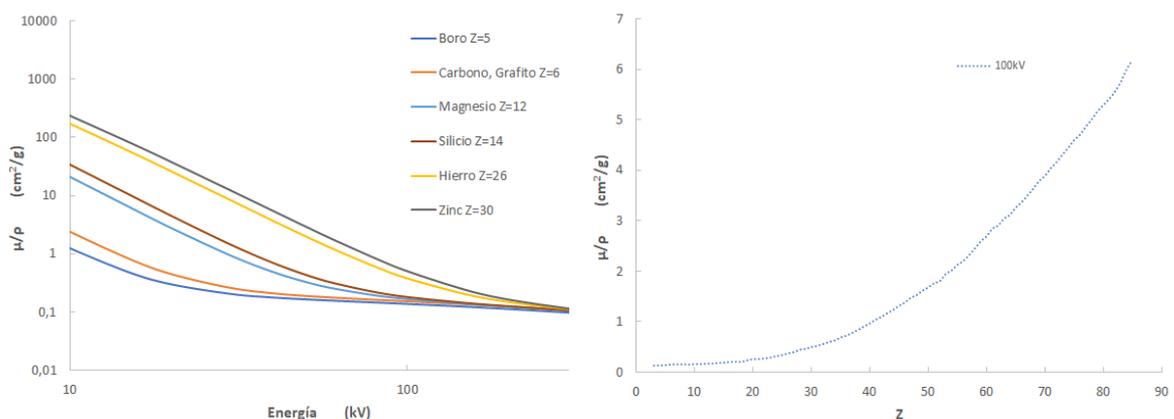


Figura 4. Izquierda: coeficiente de atenuación en función de la energía de elementos típicos presentes en cerámicas. Derecha: coeficiente de atenuación en función del número atómico,  $Z$ .

### 3.3 Sistemas generadores de rayos X

Los rayos X se producen a consecuencia de la interacción de electrones energéticos en el entorno de la corteza electrónica. A nivel atómico, existen dos procesos básicos de generación de radiación X: la radiación de frenado y la radiación característica. La radiación de frenado o Bremsstrahlung es producida por la desaceleración de los electrones que pasan cerca del núcleo perdiendo energía a consecuencia de la atracción con el núcleo. Esta interacción, también llamada scattering elástico, genera un espectro continuo de energía con un decaimiento lineal hasta la energía máxima de los electrones acelerados (línea discontinua de la Figura 5). A consecuencia de la interacción con las moléculas del aire y el filtrado inherente en la ventana de RX que protege el vacío del tubo, los fotones RX menos energéticos son absorbidos y la distribución espectral de los fotones RX a la salida de un tubo RX tiene forma de campana de Gauss asimétrica. Por otra parte, la producción de radiación característica está basada en la ocupación de niveles electrónicos discretos por estos electrones que interaccionan con los átomos. Estos estados electrónicos son inestables y al cabo de un instante el electrón deja ese nivel electrónico generando una radiación X en un espectro discreto ( $K_\alpha$  ó  $K_\beta$ )[6].

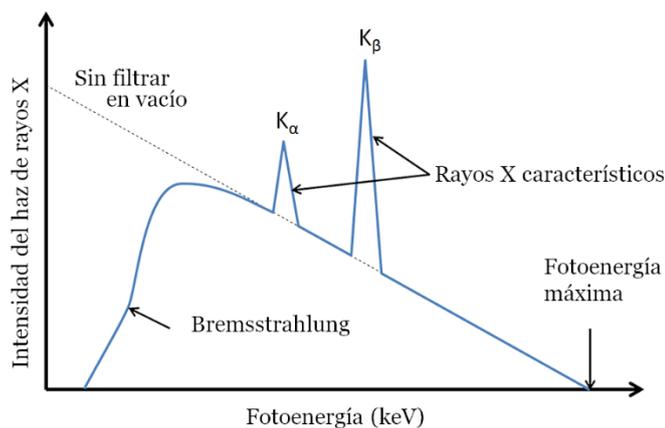


Figura 5. Espectro de emisión de rayos X.

#### 3.3.1 Tubo de rayos X

Basado en los mecanismos anteriores la generación de rayos X se produce convencionalmente gracias al bombardeo de electrones libres contra un objetivo metálico (ánodo de tungsteno) tras aplicar un alto voltaje (decenas de kilovoltios)

entre cátodo y ánodo. Los electrones son emitidos – por efecto fotoeléctrico – por el filamento incandescente por el que circula una baja corriente (mA) acelerados hacia el ánodo. El ánodo se encuentra dentro de un tubo de cristal en vacío para evitar que los electrones pierdan velocidad por la interacción con las moléculas de aire. En los tubos de rayos X, es posible por tanto ajustar la energía de los rayos X (variando la diferencia de potencial entre el filamento y el ánodo) y la corriente de emisión (variando la corriente que circula por el filamento) de forma independiente [7]. La variación del kV permite ajustar el poder de penetración de los rayos X mientras que la variación de corriente permite ajustar el brillo o intensidad de emisión de los mismos.

La interacción de los electrones con el ánodo genera una gran cantidad de calor y, en muchos casos, éste se puede fundir. Para solucionar este problema se suelen utilizar materiales de muy alto punto de fusión (ánodos de tungsteno) y, asimismo, se introducen sistemas de enfriamiento. Como alternativa también es posible utilizar un ánodo rotatorio, incrementando así la potencia de las fuentes de rayos X.

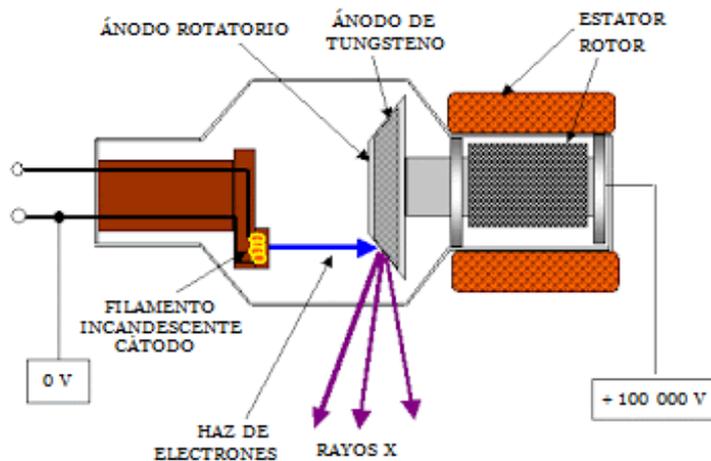


Figura 6. Tubo de rayos X.

Las características ópticas del haz generado son importantes y pueden afectar a la resolución espacial. Para obtener la mejor resolución posible se debe reducir el tamaño del punto focal (zona del ánodo donde se forman los rayos X por impacto de los electrones) evitando sombras y objetos desenfocados (Figura 7). Como consecuencia, la intensidad de corriente decrece proporcionalmente al área del punto reduciendo así el número de fotones X producidos [5].

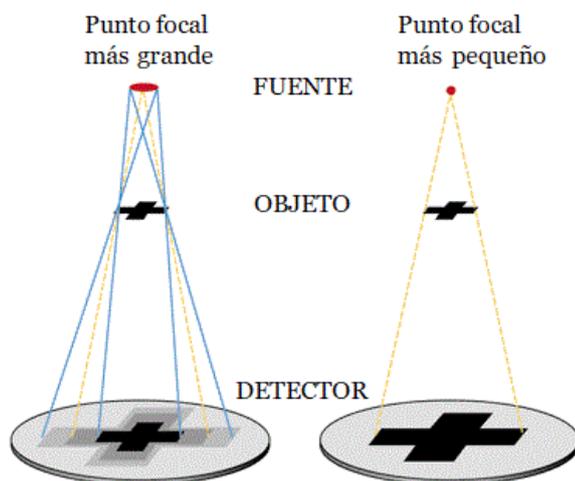


Figura 7. La reducción del tamaño del punto focal permite evitar sombras y desenfocos.

Las fuentes RX se fabrican según el tipo de haz que interese generar. Este haz suele ser tipo cónico, panorámico o abanico. Las fuentes RX de haz cónico (aperturas de haz típicas de 30-45°) se emplean generalmente con detectores matriciales tipo “flat panel” o placa radiográfica convencional mientras que las fuentes de haz panorámico (aperturas de haz de hasta 130°) se emplean en ciertas aplicaciones industriales. Las fuentes con haz en forma de abanico son una variante de las fuentes con haz panorámico en las que la apertura en una dirección es muy pequeña (unos 10° típicamente) mientras que en la dirección contraria suelen tener aperturas entre 60 y 100°. Suelen ser las fuentes idóneas para combinarlas con un detector lineal. Se suelen utilizar en aplicaciones en línea industriales (ejemplo: inspección de equipajes). En este trabajo utilizaremos una fuente con un haz de este tipo como veremos más adelante.

También es preciso indicar el concepto de magnificación óptica, que es el aumento de las dimensiones del objeto radiografiado en relación con las dimensiones reales del objeto. Esta diferencia de dimensiones aumenta o disminuye en función de la distancia fuente-objeto (DFO) y la distancia fuente-detector (DFD) (ver Figura 8). Para minimizar el efecto de la magnificación la distancia entre la fuente y el detector debe ser la mayor posible y el objeto se debe colocar lo más cerca posible del detector (magnificación uno). La magnificación es útil cuando el objeto a analizar es muy pequeño, sin embargo, en presencia de magnificación la resolución de la imagen está fuertemente condicionada por el tamaño focal, según hemos expresado anteriormente.

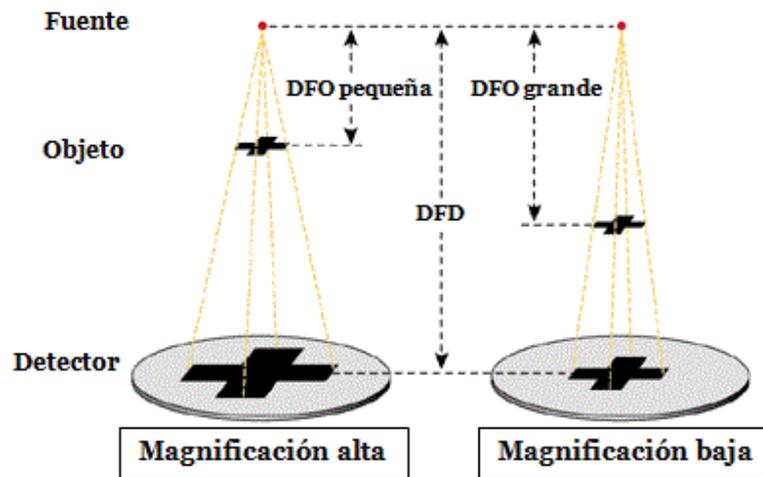


Figura 8. Esquema de la magnificación debida a un haz cónico.

En este trabajo el concepto de magnificación no es un aspecto importante a tener en cuenta y debido a la escasa resolución necesaria y la necesidad de disponer del mayor campo de visión posible, la pieza se colocará muy próxima al detector.

Por último, en este trabajo entra en juego el concepto de “endurecimiento del haz” ya que los tubos de rayos X generan siempre radiación policromática. El endurecimiento del haz es un fenómeno que tiene lugar cuando un haz de rayos X policromático atraviesa un material de un determinado espesor. A consecuencia de esto, se atenúan más los fotones de baja energía que los de alta energía y el haz cambia su espectro hacia energías más altas a medida que atraviesa el material. Si se presenta el endurecimiento del haz no es posible aplicar la ecuación de Beer-Lambert, por tanto, hay que adaptar esta ecuación mediante el uso de un coeficiente de atenuación efectivo que depende del espesor del material y de su naturaleza. La dependencia con el espesor se debe al endurecimiento del haz, es decir, se produce un cambio del espectro de energías en el interior del material. Para corregir o reducir el endurecimiento del haz lo normal es utilizar filtros físicos en la salida de la fuente de rayos X. Al aplicar un filtro se reduce la relación de fotones de baja energía y alta energía estrechando el espectro y, como consecuencia, se reduce de manera global la intensidad del haz (ver Figura 9). Como hemos mencionado anteriormente, la intensidad del haz de rayos X dentro de un material disminuye debido a dos procesos: dispersión y absorción [8]. Para corregir el endurecimiento del haz mediante software se

utiliza un método matemático mediante ajustes y operaciones matemáticas con las imágenes.

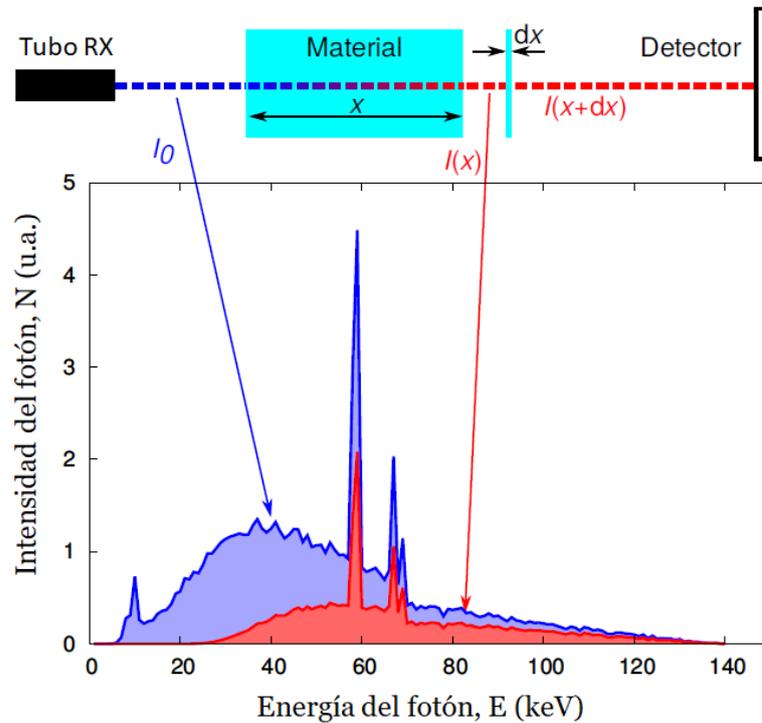


Figura 9. Endurecimiento del haz: el espectro de energía del haz incidente (azul) cambia a un espectro más estrecho (rojo) al pasar por un filtro de aluminio de 1cm.

### 3.4 Sistemas detectores de rayos X

Una vez que la radiación de rayos X atraviesa el objeto en cuestión, el último paso de la obtención de imágenes consiste en recoger la radiación transmitida, es decir, la radiación no absorbida por el objeto, y convertirla en una señal legible. Si se trata de imagen digital debemos tener un elevado número de sensores para generar una imagen digital de varios megapíxeles.

Hoy en día, existen muchos sistemas de detección dependiendo de la aplicación requerida. En particular, para la obtención de imágenes, los detectores de rayos X pueden dividirse en dos grandes grupos, dependiendo de la tecnología empleada para la conversión de los rayos X (ver Figura 10).

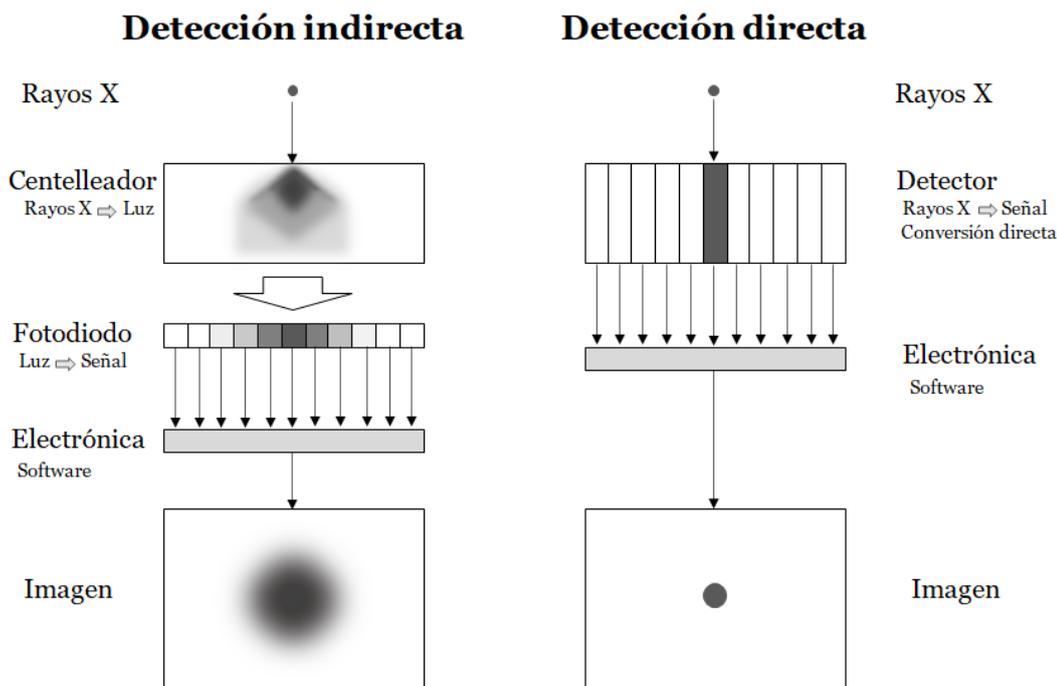


Figura 10. Sistemas de detección directa e indirecta.

### 3.4.1 Detectores convencionales

En los detectores de detección indirecta, un material centelleador convierte los fotones de rayos X en luz visible por un proceso de luminiscencia. Un segundo sistema óptico digital (CDD, CMOS, etc.) convierte la luz en intensidades digitales en cada uno de sus píxeles.

Este tipo de detección predomina actualmente en la obtención de imágenes digitales de rayos X debido a la posibilidad de optimizar la respuesta del detector a diferentes energías variando el material de centelleo y su espesor. Algunos materiales de centelleo más comúnmente utilizados son cerámica, fósforo, silicio, yoduro de cesio, etc.

Una de las principales desventajas de este tipo de detección es la pérdida de información espectral y la limitación de la resolución debido a la dispersión de la luz dentro del centelleador. Dopando los centelleadores con tierras raras o iones fluorescentes se consigue aumentar la eficiencia cuántica del centelleador, emitiendo más fotones de luz por fotón de rayos X, y reduciendo el espesor aumentando la calidad de la imagen. Algunos ejemplos de este tipo de materiales

son Ortosilicato de Itrio Lutecio (LYSO), Tungstato de Cadmio (CWO) y Oxisulfuro de Gadolinio (GOS) dopados con Cerio[4].

### 3.4.2 Detectores de detección directa

La detección directa se basa en materiales que convierten directamente los rayos X en intensidades de corriente como son las capas sensibles o fotoconductores como el silicio amorfo o Telururo de Cadmio (CdTe). Este mecanismo cuenta cada uno de los fotones y sus energías evitando la dispersión de la luz y la pérdida de información espectral e incrementando la eficiencia cuántica. Sin embargo, el flujo de rayos X debe ser bajo para que coincida con la velocidad de fotogramas de la electrónica utilizada evitando la superposición de fotones en la señal adquirida.

## 3.5 Campos de aplicación de los sistemas detectores multienergía

De las aplicaciones más destacadas de los sistemas detectores multienergía es en el campo de la medicina. Se utiliza el método de doble energía porque se radiografía un volumen tridimensional del paciente, pero se obtiene una imagen bidimensional dificultando la observación de posibles lesiones. Un ejemplo claro son las imágenes de tórax donde la estructura ósea de las costillas, la clavícula, etc., ocultarán lesiones de tejidos blandos en el pulmón debido a la superposición anatómica que obtenemos al proyectar. Por tanto, el objetivo es eliminar la estructura ósea para observar la existencia de dichas lesiones o, por el contrario, eliminar el tejido blando para observar las lesiones calcificadas. Esto se consigue tomando dos radiografías con rayos X a dos diferentes energías: método de rayos X de doble energía. En la Figura 11 se observan características diferentes de atenuación del mismo objeto para rayos X a dos energías distintas.

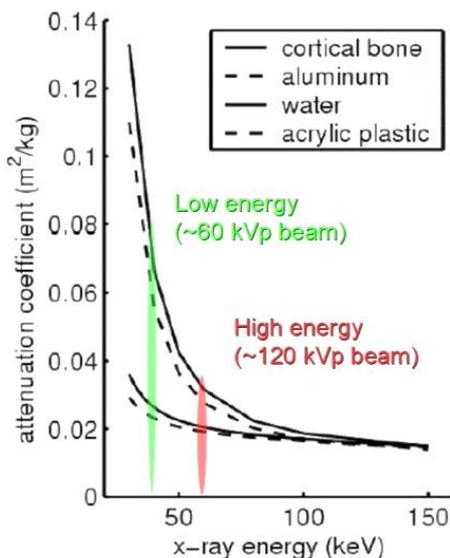


Figura 11. Coeficiente de atenuación en función de la energía de elementos típicos en una radiografía de tórax.

A energías más bajas, la atenuación del hueso es mucho mayor que el tejido blando mientras que en energías altas son muy similares (Figura 12). A partir de la gráfica se puede hallar una relación entre una imagen y la otra que al restarlas multiplicando cada una por su peso se eliminaría la señal debida a huesos o tejidos blandos según se requiera.

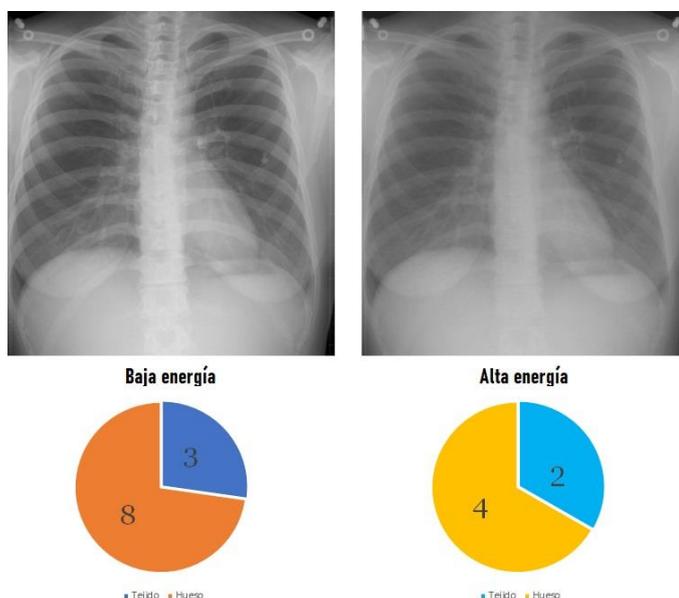


Figura 12. Radiografía computarizada a baja (izquierda) y alta (derecha) energía y los pesos correspondientes de tejido y hueso según su atenuación.

Para obtener una imagen sólo del tejido blando se debe eliminar el hueso anulando su señal; se multiplica la imagen de alta energía por un factor dos restándole la imagen de baja energía por un factor uno y multiplicando la resta por un factor de escala para corregir la señal de tejido residual. De modo análogo, para obtener una imagen de sólo hueso, se multiplica la imagen de baja energía por un factor dos restándole la de alta energía multiplicada por un factor tres eliminando así el tejido blando, y la resta se multiplica, al igual que en el caso anterior, por un factor para corregir la señal de hueso residual (Figura 13) [9].



Figura 13. Sustracción del material de interés mediante el método de doble energía.

De la misma forma, estos sistemas de detección de doble energía se utilizan también en los escáneres de equipaje. Mediante las imágenes de alta y baja energía, tras una serie de cálculos y tratamiento de la imagen, se obtiene una imagen a pseudocolor diferenciando los distintos tipos de materiales presentes en el equipaje (Figura 14).

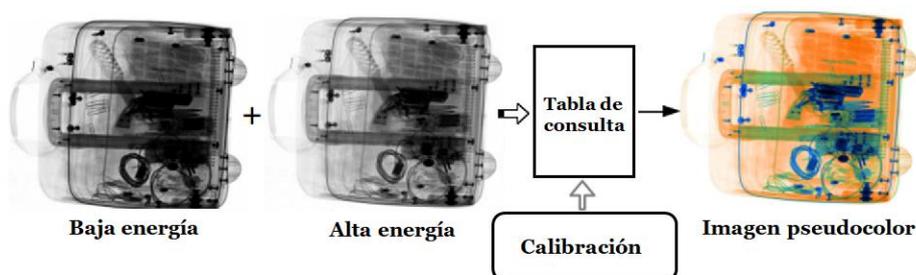


Figura 14. Detectores de equipaje doble energía.

Una tercera aplicación que se puede destacar es el análisis de alimentos y sus envases mediante rayos X de doble energía para detectar contaminantes como cristales, huesos, piedras o trozos de metal entre otros. Cuando los productos tienen una densidad grande, la doble energía presenta una gran ventaja frente a la detección de energía única. La doble energía permite analizar imágenes con mucha variación de densidad gracias al poder de diferenciar, eliminar y realzar materiales según la composición química de éstos [10].

En las aplicaciones descritas previamente el objetivo es realzar o discriminar cierto material, algo ligeramente distinto al objetivo de este trabajo en el que se busca hacer un cálculo preciso de la densidad. Se presentan dos incógnitas: la posibilidad de determinar la densidad cuando hay variaciones de espesor y con qué precisión se va a determinar dicha densidad.

## 4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Componentes utilizados

- **Fuente de rayos X:**

La fuente utilizada es una fuente RX de tipo monobloque de la serie XRBD. En un monobloque el generador HV y el tubo RX se encuentran integrados en un mismo conjunto. En concreto el modelo utilizado es un modelo XRBD160PN210. Este modelo permite generar una energía de emisión entre 80 y 160kV y una potencia de emisión de hasta 210W. El tamaño focal del tubo es 0.8mm y tiene una filtración inherente relativamente alta ya que, debido a su complejo diseño, el haz RX pasa por distintos medios hasta salir al exterior (Ultem: 1.50mm, aceite: 9.0mm, vidrio: 1.7mm, Be: 0.8mm)[11].



*Figura 15. XRBD Monoblock® de Spellman: fuente de rayos X y controlador.*

La geometría del haz es en abanico cubriendo una apertura de hasta 90° (ver Figura 16) dispuestos simétricamente sobre la salida de este. La fuente puede ser controlada mediante controles analógicos (potenciómetros) o bien mediante software utilizando protocolos RS-232 o Ethernet. También tiene una serie de entradas y salidas para reconocer que las seguridades están cerradas (no ha de ser posible emitir RX si el equipo en el que esté integrada tuviera la puerta abierta). También dispone de una salida tipo relé para conectar a una baliza luminosa y poder reconocer mediante señales luminosas que el equipo está emitiendo. Es necesario considerar también que este tipo de emisores generan una considerable cantidad de calor y por tanto es necesario que exista un circuito de refrigeración para evacuar el calor. Por tanto, este equipo cuenta con un circuito de refrigeración de aceite y unos ventiladores + disipadores.

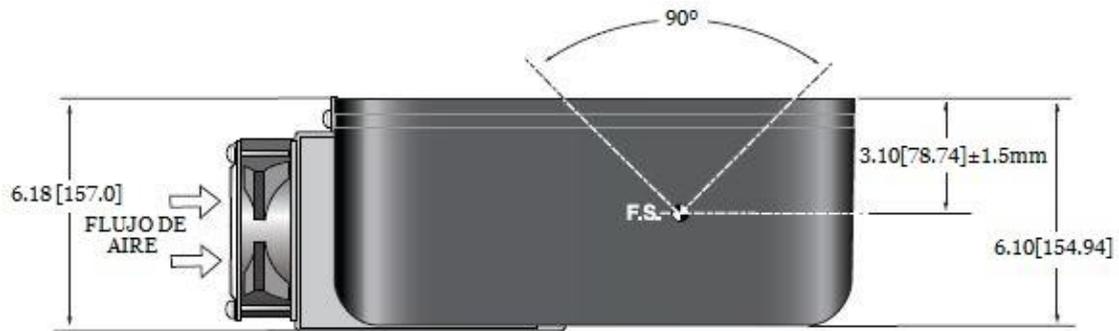


Figura 16. Vista lateral. XRBD Monoblock@ de Spellman: fuente de rayos X y controlador.

El modo utilizado para controlar este equipo ha sido el modo software mediante protocolo RS232 dado que es el modo más seguro y que permite un mayor control y una mejor integración en los procedimientos y automatismos vía software.

- **Detector de rayos X de doble energía:**

El sistema de detección que utilizaremos es un sistema de tipo array lineal de doble energía de Hamamatsu, modelo C13938-9627. Este sistema consta de un módulo de captación de imagen digital, C14560-1241, y una tarjeta controladora C13938 unidos por un cable específico. Este tipo de sistemas modulares permite conectar en cascada múltiples receptores C14560-1241 controlados por una única tarjeta C13938 por lo que es posible configurar un detector de gran tamaño. De hecho, esta solución es la adoptada casi en el 100% de los sistemas de inspección de equipaje. La tarjeta controladora C14560-1241 se conecta físicamente con el PC de control a través de un cable de tipo cameralink. Finalmente, en el PC existe una tarjeta PCI (NI PCIe 1427) tipo cameralink que permite configurar la tarjeta controladora y obtener debidamente las imágenes.



Figura 17. Sistema C13938-9627 doble energía.

La tarjeta de doble energía presenta una configuración muy ingeniosa para conseguir captar dos energías de rayos X distintas simultáneamente, tal y como se representa en la Figura 18. El centelleador de baja energía es un centelleador fino (0.2mm) de Oxisulfuro de Gadolinio (GOS) y es el que está orientado hacia la fuente de rayos X. En virtud de su bajo espesor, el centelleador solo capta/absorbe las energías más bajas (menores de 60 – 70kV) y las altas energías no son absorbidas continuando su camino a través de él. A continuación, la PCB dispone de unas laminillas de cobre que permiten filtrar el haz, eliminando las energías intermedias y permitiendo una diferenciación suficiente de energía. Finalmente, los rayos X encuentran en su camino un centelleador de yoduro de cesio (CsI) de muy alto espesor (4mm) que permite captar las energías más altas con mucha eficiencia. Todo esto se muestra en la Figura 18. Esta ingeniosa configuración es relativamente nueva en el mercado pues, anteriormente, la configuración adoptada consistía en un apilamiento de dos sistemas de detección con centelleadores distintos y filtro de cobre intermedio. Entre las ventajas de esta innovadora configuración podemos citar la menor diferencia de magnificaciones observada por los dos detectores (están separados muy pocos mm) y una mayor compacidad, además de una eficiencia cuántica mejorada al ser un desarrollo muy reciente [12][13].

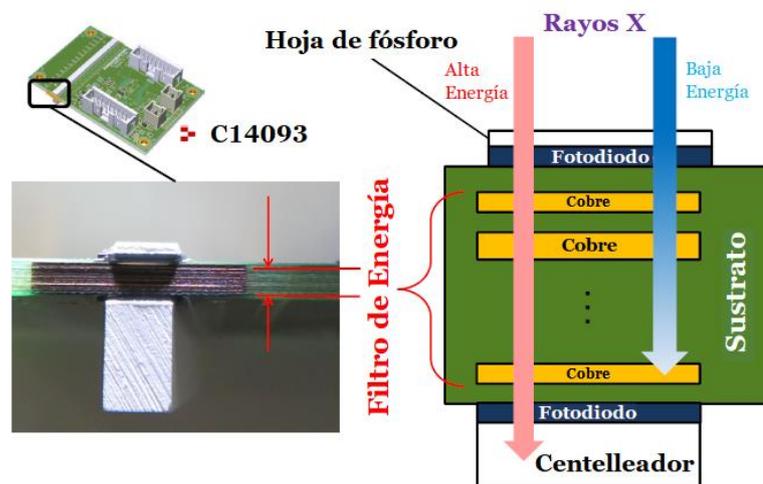


Figura 18. Tarjeta C13938-9627 doble energía.

El tamaño del pixel de la tarjeta es de 1.575mm (distancia centro – centro entre cada pixel a lo largo de la línea de píxeles) aunque el pixel realmente tiene un tamaño de 1.3mm en esa dirección. Particularmente, el tamaño de cada pixel es

de 1.3x2.0mm, valor ligeramente asimétrico. En general, casi todos los sistemas de detección en línea presentan esta asimetría que les permite captar una mayor cantidad de fotones (casi un 50% más de superficie) sin comprometer la resolución. El número total de píxeles de la tarjeta es de 128 distribuidos en 2 filas de 64 píxeles (alta y baja energía) permitiendo un ancho total de detección de 100.8mm [12]. En general se trata de un tamaño de pixel muy grande, mucho mayor de lo habitual en el sector industrial de imagen RX (0.4mm suele ser un valor típico). Sin embargo, es el valor habitual en el sector de inspección de equipajes ya que se suelen observar grandes objetos y la resolución no es un factor determinante. En nuestro caso particular se utilizó esta tarjeta por razones similares ya que los requerimientos de la aplicación no precisaban de una alta resolución espacial.

La tarjeta controladora se dispone en un sistema de digitalización de 16 bits (65536 niveles de grises), y es posible configurar una ganancia variable de hasta 256 niveles. El tiempo de exposición por línea está en el rango 1 – 100ms.

Estas dos tarjetas se han integrado en un único dispositivo formando un detector o cámara de rayos X. Este detector es el que será utilizado a lo largo de las pruebas para la obtención de los resultados expuestos en este TFG.

En la Figura 19 se puede observar un esquema en 3D del detector con las dos tarjetas colocadas en su interior y con el blindaje superior eliminado para poder observar las tarjetas.

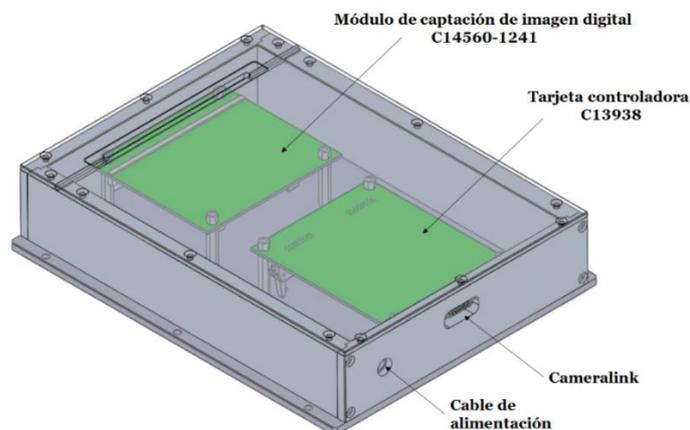
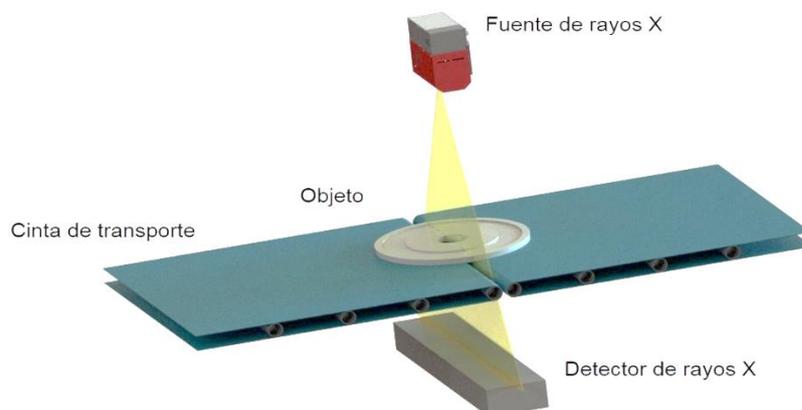


Figura 19. Esquema 3D del detector con la tarjeta controladora y el módulo de imagen digital en su interior.

- ***Sistema de movimiento y disposición experimental:***

El montaje experimental, además de la fuente de rayos X y el detector, ha de constar necesariamente de un sistema de movimiento que transporte el objeto a inspeccionar. Esto permite que cada una de las líneas obtenidas por el array lineal (1D) se dispongan secuencialmente hasta formar una imagen 2D del objeto gracias al movimiento. Para ello, obviamente, es necesario mantener una sincronización correcta entre la velocidad del objeto y la captura de la imagen del mismo, ya que si la velocidad de captura fuera mayor el objeto se representaría estirado a lo largo de su eje de movimiento (mayor número de líneas generadas) y si la velocidad de captura fuera inferior la imagen del objeto estaría achatada en esa dirección.

A nivel industrial la mejor solución para mover grandes objetos y piezas es el uso de bandas transportadoras. Habitualmente el sistema de detección se encuentra oculto bajo la cinta transportadora, pero en nuestro caso particular se ha preferido utilizar dos bandas transportadoras separadas una pequeña distancia, hueco donde se colocará el detector de tal forma que no exista ningún material intermedio que pueda interferir en la radiografía del objeto y/o cálculos de doble energía. Todo este montaje ha de estar debidamente aislado en términos radiológicos para protegernos de la radiación emitida por el tubo de rayos X.



*Figura 20. Esquema genérico del montaje experimental: fuente de rayos X, dos cintas transportadoras, detector de rayos X de doble energía y el objeto a escanear.*

La fuente de rayos X ha de estar fuertemente colimada para reducir al mínimo la emisión efectiva de rayos X dirigiendo su haz exclusivamente hacia el detector, por tanto, limitando “el grosor” del haz a unos pocos milímetros. Así mismo, el detector se encuentra debidamente protegido y sólo permite que los rayos X entren por una pequeña rendija de muy pocos milímetros. Por esta razón el tubo y el detector han de estar debidamente enfrentados y alineados evitando cualquier tipo de desviación de posición u orientación lo que permitirá generar una imagen óptima y sin pérdida de fotones.

Uno de los factores más importantes a considerar en nuestra aplicación es la necesidad de utilizar una configuración tal que las desviaciones en el camino óptico sean lo más bajas posibles. A la vista del esquema de la Figura 21, la conicidad del haz hace que el espesor efectivo del material sea mayor en los extremos del campo de visión del detector. De esta forma, por ejemplo, cuanto más ancho sea el sistema de detección mayor es el ángulo de entrada en el material (en los bordes del detector) y, por tanto, mayor es el camino óptico. Por esta razón se ha utilizado un detector de 100.8mm de ancho, aunque las piezas cerámicas a inspeccionar sean mucho más grandes. Así mismo, a fin de reducir al máximo el efecto mencionado, se ha utilizado una disposición geométrica en la que la fuente RX está suficientemente alejada (haz semi - paralelo). Por último, considerando que no se necesita una gran resolución espacial, pero es necesario abarcar el mayor campo de visión posible, en la configuración utilizada el objeto estará colocado prácticamente pegado al detector.

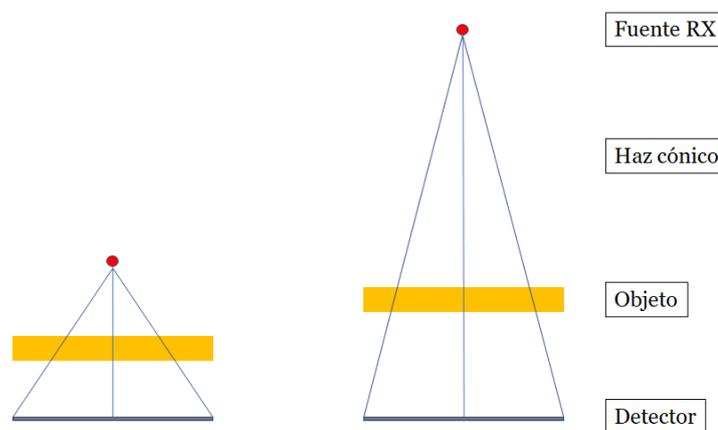


Figura 21. Esquema del camino óptico para distintas distancias fuente - detector.

Como se ha mencionado en el apartado anterior, es muy importante que el tamaño del detector sea adecuado para no aumentar en exceso el camino óptico (espesor aparente), en nuestro caso se ha utilizado un detector de 100.8mm de ancho. Hemos simulado el efecto de diferentes distancias fuente-detector (DFD) para un ancho de 100.8mm. En el gráfico de la Figura 22 se representa el camino óptico normalizado a lo largo de la anchura del detector. Se puede observar que el camino óptico aparente tiene una distribución parabólica a lo largo de los píxeles del detector. Se observa que al aumentar la DFD el camino óptico aparente en los extremos del detector aumenta significativamente. El aumento del camino óptico es del 0.26% para una DFD de 700mm y de 0.80% para 400mm.

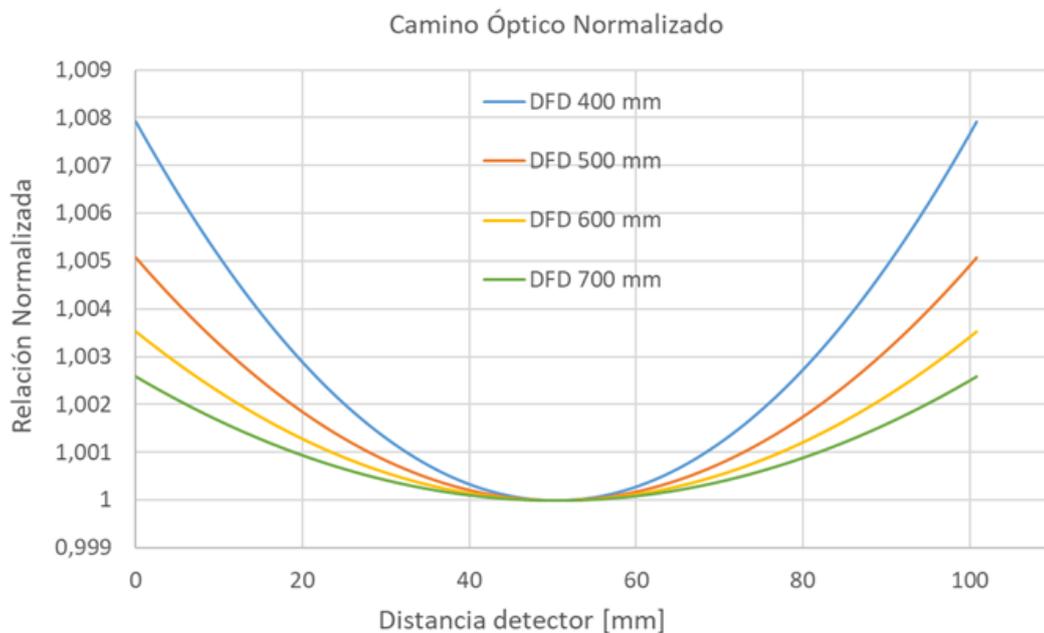


Figura 22. Camino óptico en el centro y en los extremos del detector de 100.8mm de ancho para diferentes distancias fuente – detector.

Si tuviéramos como única premisa el valor del DFD obviamente nos interesaría un valor lo más alto posible, es decir, que la fuente RX estuviera lo más alejada posible del detector para minimizar el impacto del camino óptico aparente sobre la terminación del espesor. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la intensidad de los rayos X decrece con el cuadrado de las distancias según la ecuación (4). Por lo tanto, es necesario tener este aspecto en la elección de una configuración fuente-detector correcta.

$$I = \frac{P}{4\pi d^2} \qquad I \propto \frac{1}{d^2} \qquad (4)$$

d: distancia

La Figura 23 nos muestra comparativamente el efecto de las variaciones de DFD tanto en el camino óptico como en la disminución de la intensidad. Se puede apreciar cómo ambos parámetros están anti correlacionados linealmente.

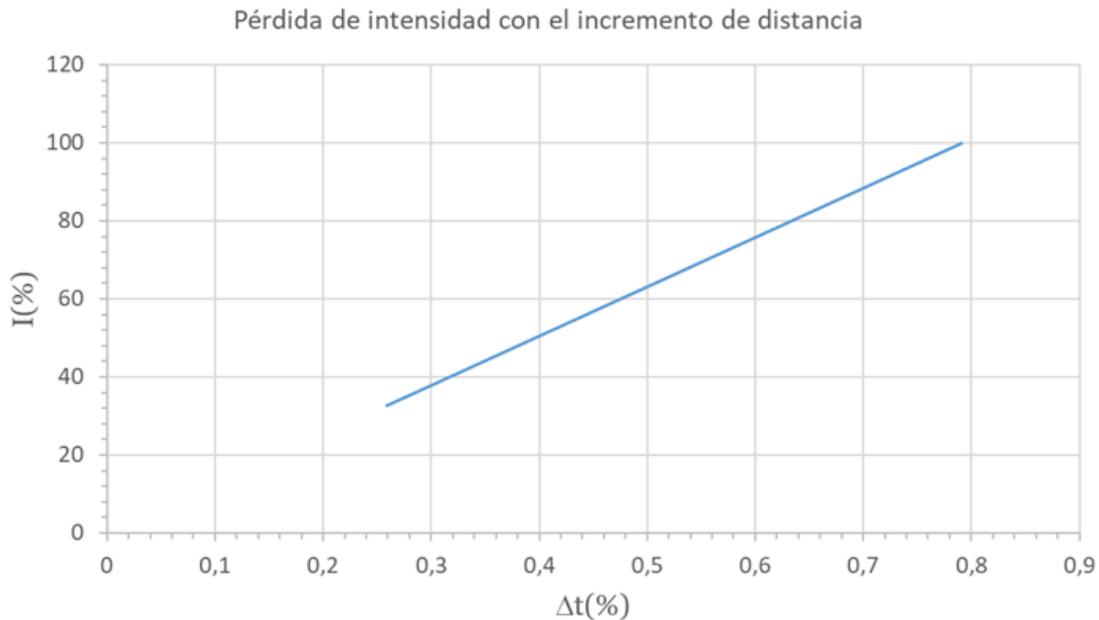


Figura 23. Relación del porcentaje de intensidad perdida con el incremento de la distancia recorrida.

A modo de compromiso se ha utilizado una configuración con un valor de DFD de 600-650mm que nos da un valor de aumento máximo del camino óptico alrededor del 0.3% y una pérdida de intensidad del 60% con respecto al valor de 400mm.

## 4.2 Software utilizado

### 4.2.1 Software de control

Se han utilizado distintos software de control y adquisición de imágenes RX. Al menos es necesario disponer de software de control para los tres elementos fundamentales (tubo de rayos X, detector y sistema de movimiento). Dado el carácter preliminar de las pruebas empleadas se han utilizado tres software

diferentes en lugar de un único software que integre el control de los tres componentes utilizados. Para el caso del tubo y del detector se han utilizado versiones proporcionadas por el fabricante (aunque ya se había desarrollado en la empresa software de control desarrollados en su plataforma estándar, LabVIEW). En el caso del sistema de control de las bandas se ha utilizado un software de control basado en LabVIEW creado por la empresa y que permite controlar de forma sencilla la dirección de movimiento de las bandas y su velocidad.

#### 4.2.2 Software de tratamiento de imágenes

Para realizar la visualización, análisis y tratamiento de las imágenes obtenidas se ha utilizado un programa de código abierto denominado **ImageJ** programado en Java y desarrollado por los Institutos Nacionales de Salud de Estados Unidos. En concreto se ha utilizado una distribución denominada **Fiji** que incluye gran cantidad de complementos del programa de procesamiento de imágenes [14]. Fiji se puede utilizar para procesos muy simples como cambiar el contraste a una imagen y para procesos más complejos como filtros de imagen u operaciones no lineales sobre los valores de los píxeles de cada imagen. Se ha hecho uso de macros de análisis automatizadas para extraer las imágenes de alta y baja energía de la imagen solapada de los dos canales que genera el detector. Fiji juega un papel importante en este trabajo, se utiliza para obtener los valores de intensidad transmitida y poder calibrar las imágenes de las probetas para hacer posible la determinación de los coeficientes de absorción efectivos mediante el cálculo con imágenes (calibración, filtraje y operaciones algebraicas).

En la Figura 24 se pueden observar las funciones utilizadas para el análisis de las imágenes en este trabajo: las funciones matemáticas (sumas, restas, divisiones...), el ajuste de contraste, macros, etc.

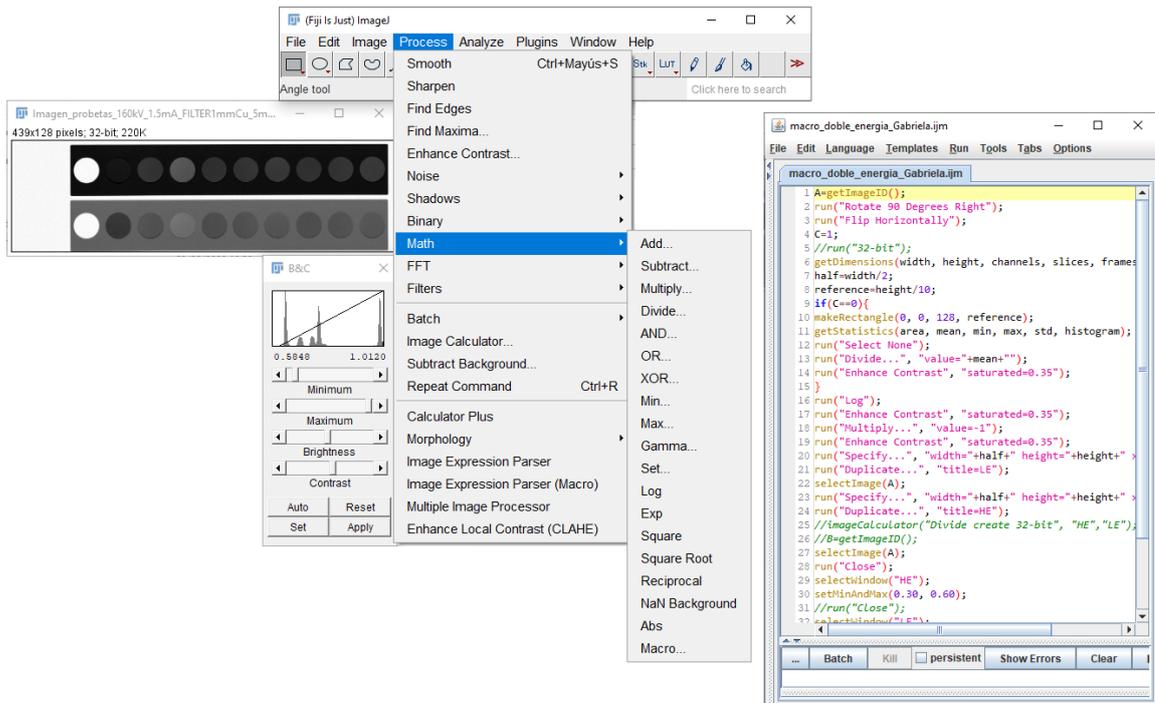


Figura 24. Funciones matemáticas y macros en Fiji.

### 4.3 Materiales utilizados

- **Composición de las cerámicas**

Las muestras analizadas en este trabajo son confeccionadas en base a material pulverulento de gres porcelánico que es compactado a altas presiones junto con pequeñas cantidades de agua (5% típicamente). Este material está constituido fundamentalmente por óxidos de silicio, aluminio, hierro, calcio, magnesio, sodio y potasio (Tabla 1). Estos valores han sido proporcionados por el Instituto de Tecnología Cerámica de Castellón (ITC) obtenidos mediante análisis físico-químicos.

Tabla 1. Composición del gres porcelánico.

Compuestos	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ppc a 1000°C
Gres porcelánico (% en peso)	68.5	19.1	0.63	0.67	0.75	4.07	1.42	0.71	<0.01	0.10	3.93

La Tabla 1 nos muestra como la sílice (SiO<sub>2</sub>) es el compuesto fundamental de este material cerámico. Alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Óxido de Hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y Óxido de Calcio (CaO) son los compuestos más significativos de su composición. En base a esta

composición determinaremos los coeficientes de absorción teóricos de estos materiales en la siguiente sección.

- ***Estimaciones teóricas del coeficiente de absorción.***

Se ha realizado un estudio del coeficiente de atenuación másico ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) en función de la energía para los principales compuestos utilizados para la fabricación del material:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{CaO}$  (ver Figura 25). Los datos teóricos se han obtenido de la página web del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) [15].

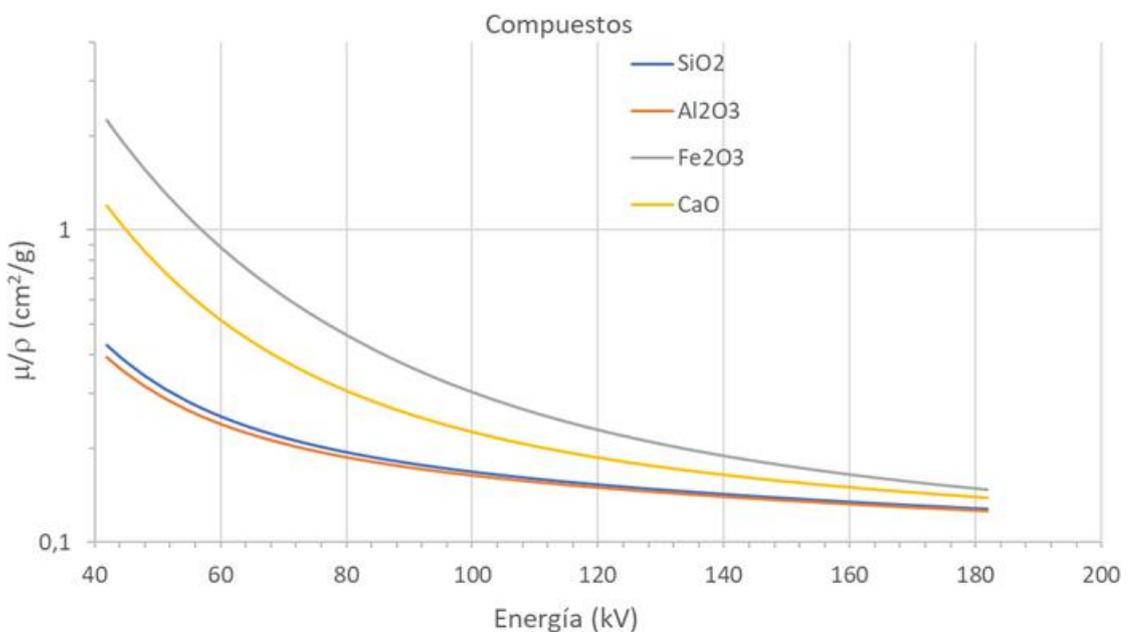


Figura 25. Coeficiente de atenuación másico frente a la energía para los principales compuestos con los que se confecciona el material de fabricación del objeto a analizar.

A partir de las densidades teóricas de cada compuesto y el peso con el que contribuye dicho compuesto al gres porcelánico es posible hallar la densidad media teórica del gres porcelánico (ver Tabla 2). Sin embargo, la densidad media teórica calculada es suponiendo que el material es puramente denso, hecho que en realidad no ocurre. La densidad real de los materiales analizados es mucho menor porque el proceso cerámico es poroso. El análisis de estas placas se realiza previamente a su cocción, sólo han sido sometidas a un prensado mediante el cual los granos de polvo se compactan en un sólido, pero a nivel microscópico entre

grano y grano existe aire. La consecuencia de esto es una densidad menor de la predicha teóricamente para el gres porcelánico.

Tabla 2. Densidades teóricas de cada compuesto y su contribución en porcentaje al gres porcelánico.

Compuesto	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Contribución gres porcelánico (%)
SiO <sub>2</sub>	2.65	77.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.95	21.48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.24	0.71
CaO	3.34	0.75

Densidad media del gres porcelánico:  $\rho = 2.95 \text{ g/cm}^3$

Como uno de los principales objetivos de este trabajo es obtener las condiciones óptimas para la posterior determinación de la densidad, a partir de la densidad media teórica del gres porcelánico calculada anteriormente (Tabla 2), se obtienen los valores del coeficiente de atenuación másico teórico en función de la energía [15] como se puede ver en el gráfico de la Figura 26.

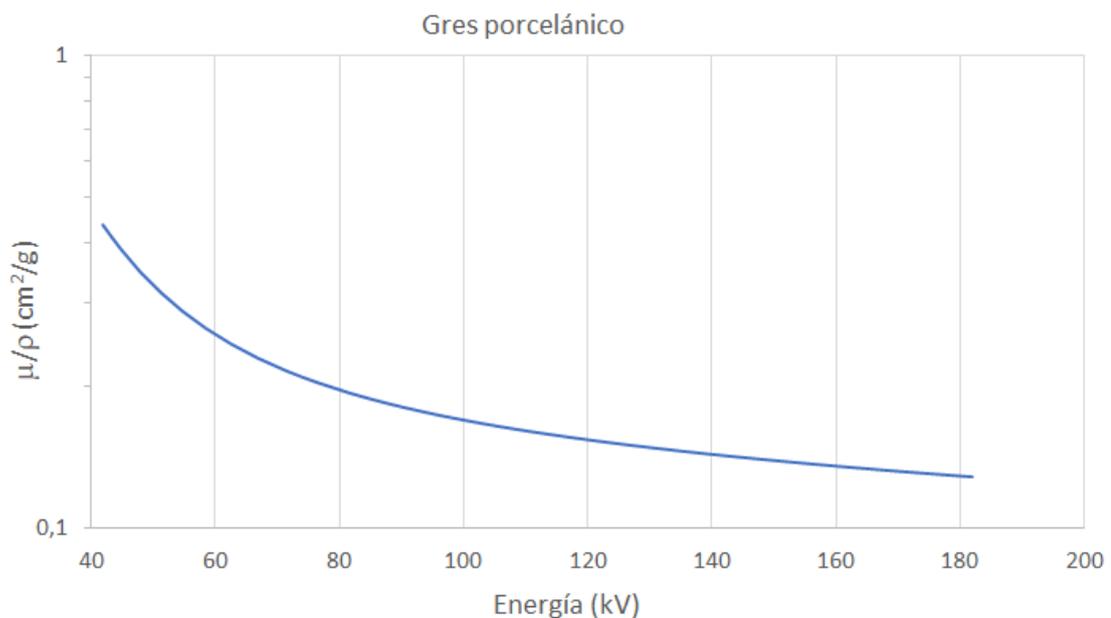


Figura 26. Coeficiente de atenuación másico teórico en función de la energía para el gres porcelánico.

Más adelante, con estos datos obtenidos del coeficiente de atenuación másico teórico, será posible comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los teóricos y determinar realmente con qué energía se trabaja y será de gran

ayuda para determinar las condiciones óptimas para obtener una densidad lo más exacta posible.

- **Probetas**

Se ha desarrollado una metodología para determinar de forma experimental el coeficiente de atenuación másico del gres porcelánico utilizado y poder calibrar debidamente el equipo. La metodología incluye el uso de probetas cilíndricas de 50mm de diámetro colocadas en un portamuestras de acero inoxidable (1mm de espesor) tal y como se observa en la Figura 27. El portamuestras permite colocar hasta 10 probetas de diferente densidad y espesor. En nuestro caso particular se han utilizado nueve probetas de espesores y densidades indicados en la Tabla 3. Es importante comentar que se han analizado dos composiciones de gres porcelánico ligeramente distintas (neutra y gris), aunque como veremos más adelante las diferencias son casi inapreciables. Las probetas fueron fabricadas y suministradas por ITC. Es preciso recordar que las muestras suministradas son muestras sin cocer, únicamente prensadas pues el propósito del equipo es analizar muestras previas a la cocción. Estas muestras tienen consistencia suficiente y pueden aguantar varios meses sin modificaciones substanciales.

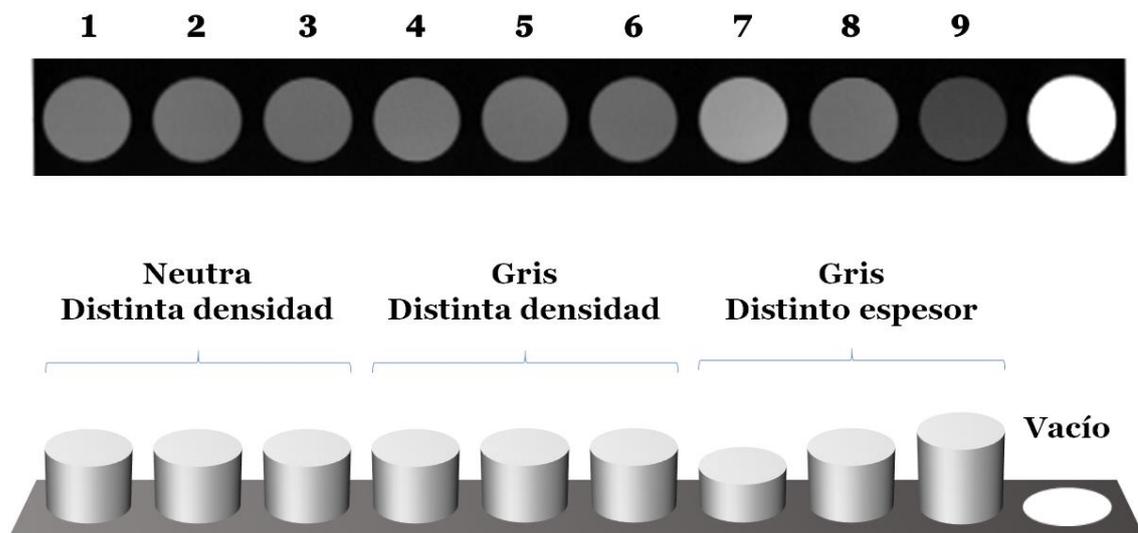


Figura 27. Esquema 3D de las probetas cilíndricas del material a analizar.

Tabla 3. Especificaciones de las nueve probetas cilíndricas.

Número de probeta	Composición	Espesor t (cm)	Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	Neutra	1.012	1.881
2		1.002	1.938
3		1.014	2.003
4	Gris	1.018	1.874
5		1.024	1.910
6		1.009	1.989
7		0.803	1.953
8		1.001	1.958
9		1.203	1.955

En la Figura 28 se muestra una foto de las probetas utilizadas donde se puede ver claramente su forma, color y los espesores.



Figura 28. Foto de las probetas empleadas.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Procedimiento de adquisición de datos

Se dispone el objeto, en este caso el portamuestras con las probetas, en la banda transportadora como se puede ver en la imagen de la Figura 29. La banda transportadora se controla mediante un software donde se elige la velocidad, en nuestro caso se ha trabajado con una velocidad de aproximadamente 2.5m/min (40mm/s) habiendo realizado pruebas previas para determinar la velocidad óptima.

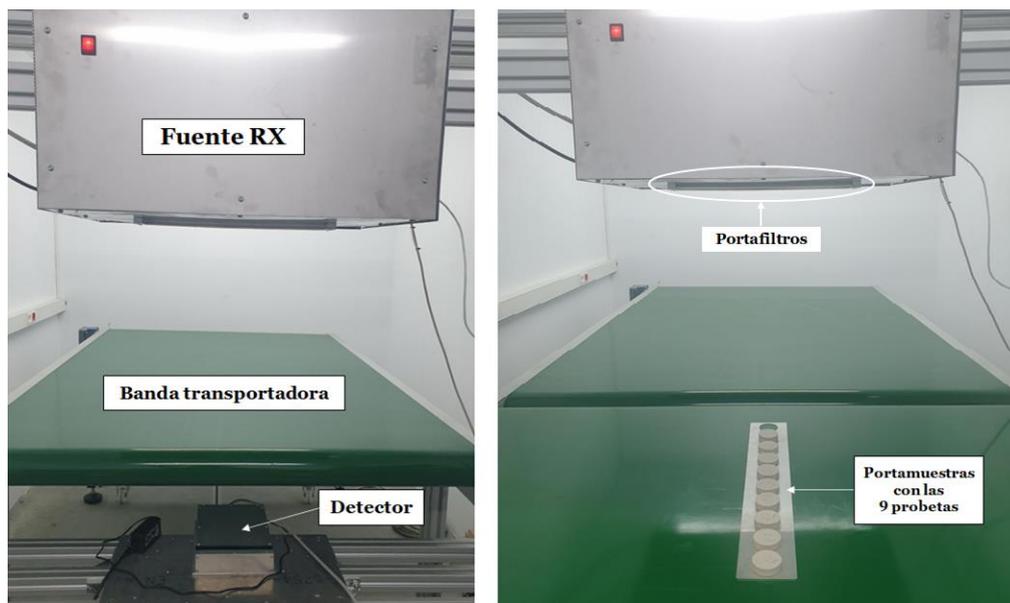


Figura 29. Sistema de adquisición.

Posteriormente se elige el kV y la intensidad de la fuente con las que se desea trabajar (ver Figura 30). Como se ve en la imagen, hay un testigo en color rojo que avisa de si la puerta de la sala blindada está cerrada por cuestiones de seguridad. Para comenzar la emisión de rayos X se activa el interruptor rojo de encendido.

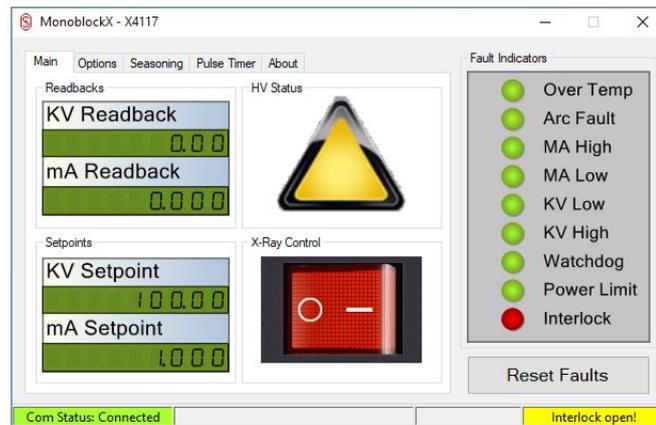


Figura 30. Control de la fuente.

Además, es posible utilizar filtros físicos de distintos materiales y espesores, colocados en la fuente de rayos X, para obtener una atenuación diferente para las distintas energías con el fin de eliminar efectos de densidad o de espesor del material a analizar y mejorar los datos adquiridos, así como disminuir la relación entre energía alta y baja para corregir el endurecimiento del haz. Los filtros que se utilizan típicamente son de aluminio ( $Z=13$ ), hierro ( $Z=26$ ) o cobre ( $Z=29$ ). Los filtros se colocan en el portafiltros de la fuente de rayos X de menor número atómico a mayor número atómico, así como de mayor a menor espesor. En la imagen de la Figura 31 se pueden observar alguno de los filtros utilizados.



Figura 31. Filtros de distintos materiales y espesores.

Una vez comenzada la emisión de rayos X, en el programa de adquisición de datos se puede observar la señal que se recibe de cada uno de los dos canales, tal y como se puede ver en la imagen superior de la Figura 32. Para mejorar la calidad de

imagen y no obtener una imagen saturada hay que obtener un nivel de gris adecuado, esto se regula mediante la corriente, el tiempo de exposición del detector y la ganancia digital aplicada. Se ha decidido utilizar un valor para el tiempo de exposición de 5ms (200Hz, 315mm/s) y un valor de ganancia de 20 como valores óptimos. Una vez se haya elegido el kV al que se quiere obtener una imagen y regulado el amperaje se da comienzo al movimiento de la banda transportadora y el portamuestras atraviesa el haz de rayos X obteniéndose la imagen en tiempo real (imagen inferior de la Figura 32).

Es preciso indicar que la diferencia de velocidades elegidas para la banda y el detector genera una imagen elongada. Sin embargo, es nuestro propósito hacerlo de esta manera ya que posteriormente aplicaremos una metodología de “line-binning” para “encoger” la imagen, obteniendo una imagen con valores de pixel promediados y, por tanto, con una señal-ruido optimizada.

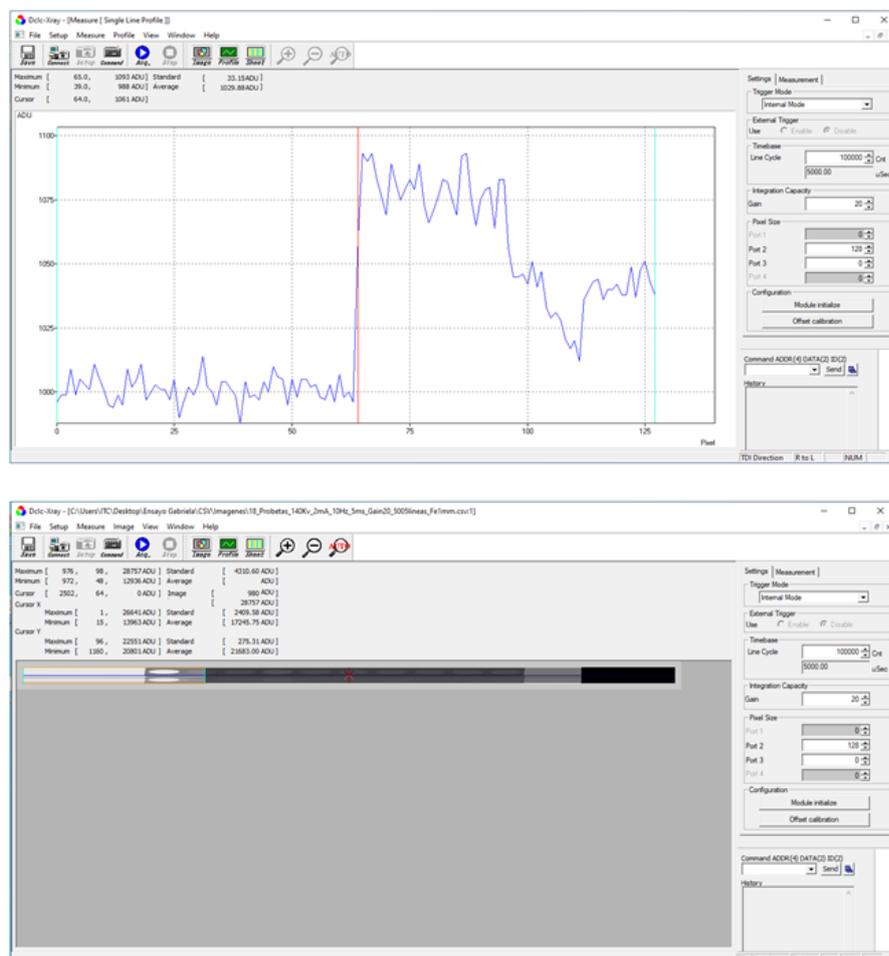


Figura 32. Programa de adquisición de datos. Imagen superior: señal recibida por cada uno de los dos canales. Imagen inferior: adquisición de la imagen en tiempo real.

Al finalizar el escaneo de la pieza, la señal es convertida en imagen de texto por el programa informático. Se obtienen las imágenes de los dos canales (baja y alta energía) solapadas en una única imagen. Para poder tratar las imágenes debe convertirse a un formato de imagen TIFF (imágenes de mapa de bits), tal y cómo se explica en el apartado siguiente.

## 5.2 Tratamiento de datos

Los datos adquiridos son archivos CSV (“valores separados por comas”), es decir, un archivo de texto. En Fiji importamos la imagen en texto y obtenemos una imagen alargada tal y como se muestra en la Figura 33. Para corregir la imagen y obtener la imagen de las probetas a escala, se multiplica por un factor  $1/7$  en el eje “x” dejando el eje “y” sin modificar. El factor se ha determinado mediante ajustes previos. Es preciso indicar que este factor es ligeramente distinto del ratio de velocidades 40:315 que hemos indicado anteriormente, sin embargo, habría que tener en cuenta que la pequeña magnificación utilizada modificaría la resolución espacial y, por tanto, la velocidad efectiva de la pieza.

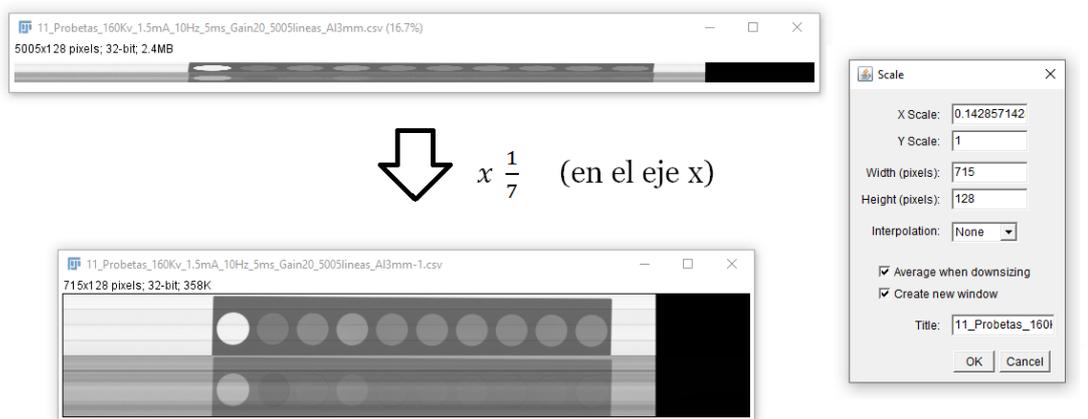


Figura 33. Escalado de la imagen adquirida por un factor 7 en el eje x.

Como se ve en la imagen inferior de la Figura 33, después del escalado no se obtiene una imagen clara. Para obtener una imagen precisa es necesario realizar correcciones de “background” y “shading” (de aquí en adelante BG y SH). El BG es la señal de fondo que se recibe sin rayos X y que es necesario eliminar para

evitar una pérdida de linealidad del sensor. La corrección consiste en restar, en cada uno de los píxeles, el valor de BG medido. Para ello se selecciona la región negra de la imagen, se promedia escalando la imagen a una única línea (1x128 píxeles) y, después, expandimos esa línea en anchura hasta las dimensiones de la imagen que queremos corregir (715x128 píxeles). Una vez obtenida esa imagen la restamos de la original, tal y como se muestra en la Figura 34.

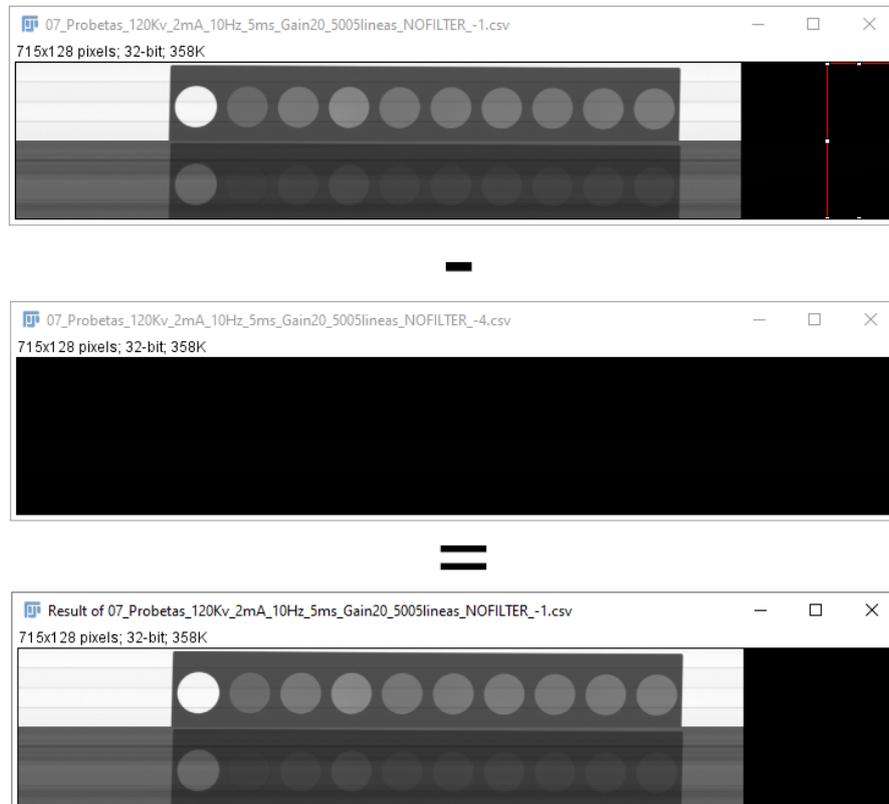


Figura 34. Corrección del "background".

Además, también es preciso corregir el SH puesto que la señal obtenida muestra diferencias entre cada uno de los píxeles del detector y/o inhomogeneidades por el perfil del haz RX. Para corregirlo se parte de la imagen corregida por BG y se procede del mismo modo, pero en este caso la imagen se divide por la del SH para corregirla, tal y como se muestra en la Figura 35.

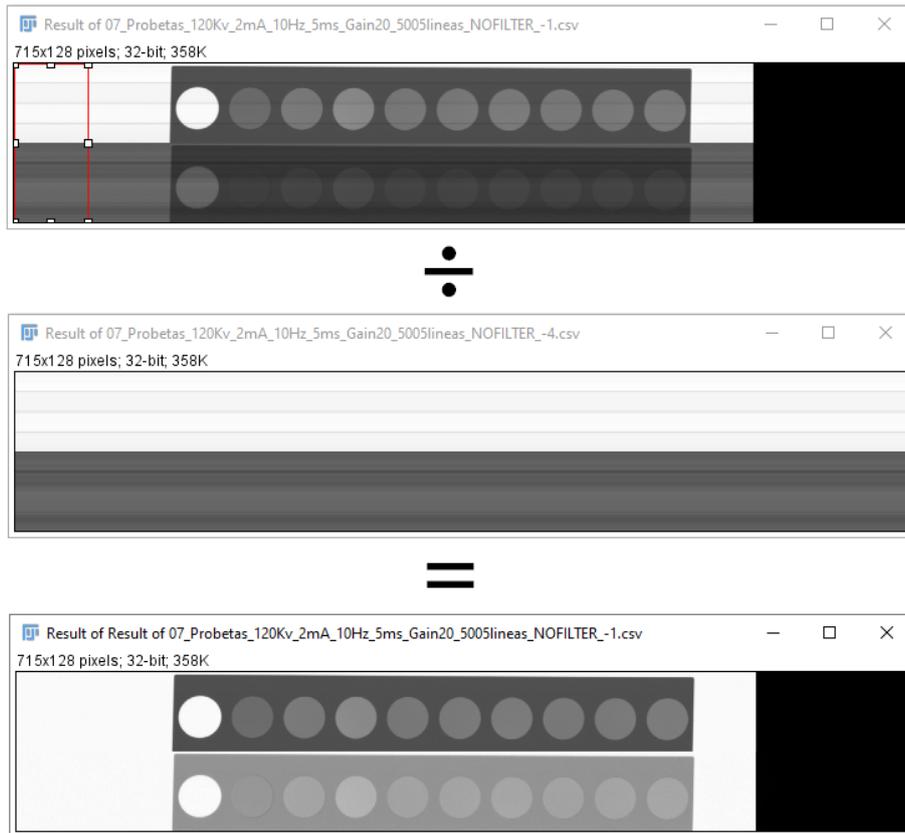


Figura 35. Corrección del "shading".

Finalmente, después de estas dos correcciones se obtiene la imagen RX totalmente limpia que, posteriormente, será utilizada para la obtención de los valores requeridos para la calibración y el desarrollo de los resultados. La imagen obtenida es una imagen 32-bits que muestra en cada uno de los píxeles valores de transmisividad. De esta forma en las zonas donde no existe muestra el valor es 1 y menor de 1 en cualquier otra zona donde se observa muestra.

### 5.3 Calibración mediante probetas

Para calibrar se emplean diversas probetas cilíndricas del mismo material que las placas, cuya densidad aparente se quiere determinar, con diferentes espesores y densidades, tal y como se mencionó anteriormente en una exhaustiva descripción de estas. Se trabaja con la imagen de las probetas porque nos proporciona un punto de referencia y posibilita obtener las condiciones óptimas para la determinación de la densidad.

Se obtendrán imágenes de las probetas a diferentes energías y con diferentes filtros. El hecho de tantear con el filtraje y el endurecimiento del haz, así como obteniendo el coeficiente de absorción experimental para poder compararlo con el teórico, es lo que permitirá determinar la densidad. Aunque, como ya hemos dicho, la determinación de la densidad no es lo que se tratará en este trabajo, sino cómo obtener las condiciones óptimas para una densidad más exacta.

Para empezar con la calibración es necesario conocer las intensidades transmitidas a través de cada probeta. Estas intensidades se miden, con ayuda de Fiji, directamente de las imágenes de alta y baja energía (ver Figura 36).

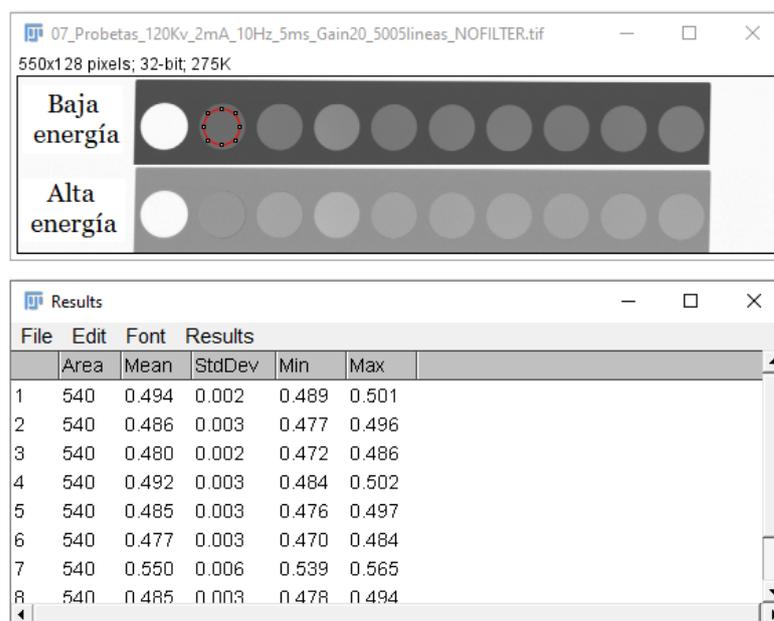


Figura 36. Selección de la región de la imagen para medir los valores de intensidad transmitida.

Para proceder a la calibración se toman logaritmos neperianos de la ecuación (2) obteniendo la ecuación (5), ecuación que posteriormente se empleará para hacer un ajuste de los valores obtenidos tanto para baja como para alta energía para cada uno de los kV con los distintos filtros empleados.

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \mu_{m,eff} \rho t \quad (5)$$

La pendiente del ajuste de la ecuación (5) es el coeficiente de atenuación másico experimental buscado. De esta manera se obtienen los coeficientes de atenuación de cada kV tanto para alta como baja energía. Para hacer el ajuste sólo se toman los puntos de una sola composición del gres porcelánico (gris o neutra) para obtener un ajuste más exacto sin juntar diferente tipo de composiciones a pesar de ser muy parecidas.

Para dar constancia del tipo de valores con los que se trabaja, en la Tabla 4 se puede ver un ejemplo de las medidas obtenidas para la energía de 120kV y sin ningún tipo de filtro empleado. Además, en la Figura 37 se observa el ajuste de estos valores para la composición gris del gres porcelánico tanto para baja como para alta energía donde la pendiente es el coeficiente de atenuación másico experimental. En teoría, el ajuste debería generar un valor para el término independiente de 0. Sin embargo, podemos observar que esto no es así, aunque la desviación respecto del cero del término independiente en el caso del ajuste de alta energía es mucho menor que la del ajuste de baja energía.

Tabla 4. Valores medidos de la intensidad transmitida a través de cada probeta para 120kV sin filtro. Valores del ajuste de la Figura 37.

120 Kv SIN FILTRO								
Número de probeta	Composición	Espesor t (cm)	Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho t$ (g/cm <sup>2</sup> )	Transmisividad Baja energía $T_{LE} = \frac{I_{LE}}{I_{0,LE}}$	Transmisividad Alta energía $T_{HE} = \frac{I_{HE}}{I_{0,HE}}$	$-\ln(T_{LE})$	$-\ln(T_{HE})$
1	Neutra	1.012	1.881	1.90	0.494	0.665	0.705	0.408
2		1.002	1.938	1.94	0.486	0.657	0.722	0.420
3		1.014	2.003	2.03	0.480	0.652	0.734	0.428
4	Gris	1.018	1.874	1.91	0.492	0.664	0.709	0.409
5		1.024	1.910	1.96	0.485	0.656	0.724	0.422
6		1.009	1.989	2.01	0.477	0.651	0.740	0.429
7		0.803	1.953	1.57	0.550	0.714	0.598	0.337
8		1.001	1.958	1.96	0.485	0.658	0.724	0.419
9		1.203	1.955	2.35	0.429	0.606	0.846	0.501

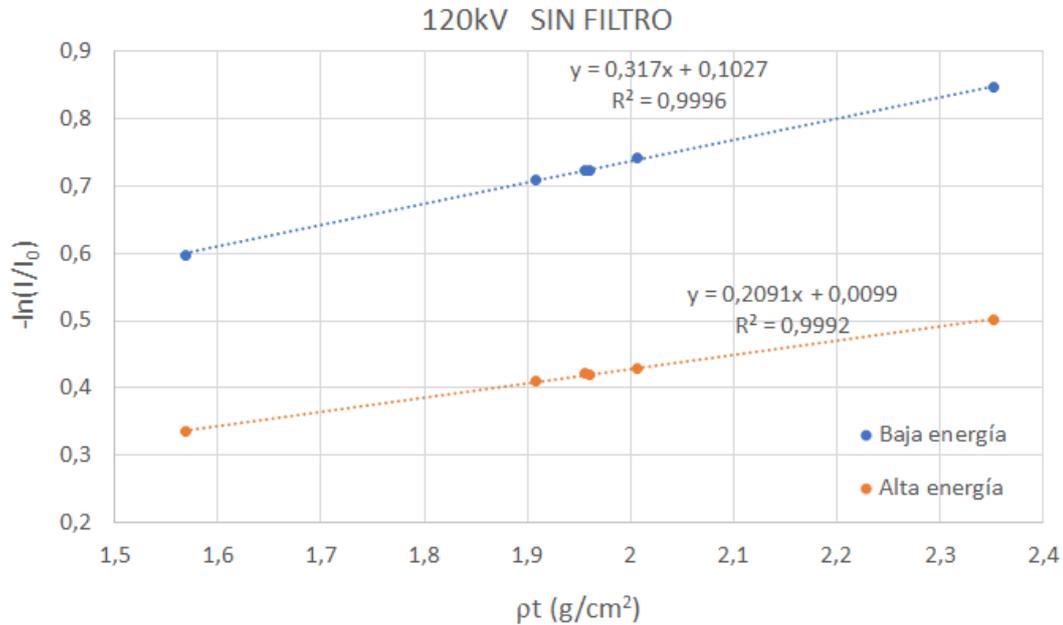


Figura 37. Ajuste de la ecuación (5) para 120kV sin filtro y los valores de baja y alta energía.

De la misma manera se procede para el resto de las energías y filtros que se han empleado para este estudio.

Una vez determinados todos los coeficientes de atenuación másico tanto para baja como para alta energía, a partir de los valores teóricos obtenidos reflejados en la Figura 26 se hace una comparación de estos con los experimentales. A partir de la comparación es posible determinar la energía real/efectiva de los dos canales. En la Tabla 5 se muestran los valores obtenidos de la comparación. La energía efectiva se obtiene mediante un ajuste potencial de la Figura 26.

Tabla 5. Valores experimentales del coeficiente de absorción másico con su correspondiente energía efectiva para los distintos filtros y energías.

Filtro	Energía (kV)	$\mu_{LE}$ (cm <sup>2</sup> /g)	Energía efectiva Baja energía $E_{LE,eff}$ (kV)	$\mu_{HE}$ (cm <sup>2</sup> /g)	Energía efectiva Alta energía $E_{HE,eff}$ (kV)	$\mu_{HE} / \mu_{LE}$
	SIN FILTRO	160	0.2860	57.34	0.1865	95.83
140		0.2986	54.45	0.1975	89.45	0.6614
120		0.3170	50.68	0.2091	83.53	0.6596
100		0.3428	46.13	0.2324	73.57	0.6779
3mm Al	160	0.2639	63.16	0.1832	97.90	0.6942
	140	0.2725	60.77	0.1924	92.31	0.7061
	120	0.2896	56.49	0.2057	85.19	0.7103
	100	0.3122	51.61	0.2296	74.65	0.7354
5mm Al	160	0.2520	66.76	0.1805	99.67	0.7163
	140	0.2613	63.91	0.1915	92.83	0.7329
	120	0.2740	60.37	0.2046	85.74	0.7467
	100	0.2979	54.60	0.2242	76.82	0.7526
1mm Fe	160	0.2103	82.96	0.1655	110.61	0.7870
	140	0.2221	77.69	0.1800	100.00	0.8104
	120	0.2302	74.42	0.1895	94.01	0.8232
	100	0.2452	68.99	0.2084	83.87	0.8499

Para saber cuál de las energías y filtros estudiados son los óptimos para una buena determinación de la densidad vamos a representar la relación de coeficientes de absorción experimentales de alta y de baja energía frente a la energía efectiva (baja) obtenida de la comparación (ver Figura 38). Hemos utilizado como referencia la energía efectiva para el canal de baja energía porque existen diferencias más significativas que en el caso del canal de alta energía y, por tanto, es previsto que los resultados tengan una mayor linealidad. En cualquier caso, es indistinto utilizar como referencia un canal u otro pues lo más interesante son los valores de la relación entre coeficientes.

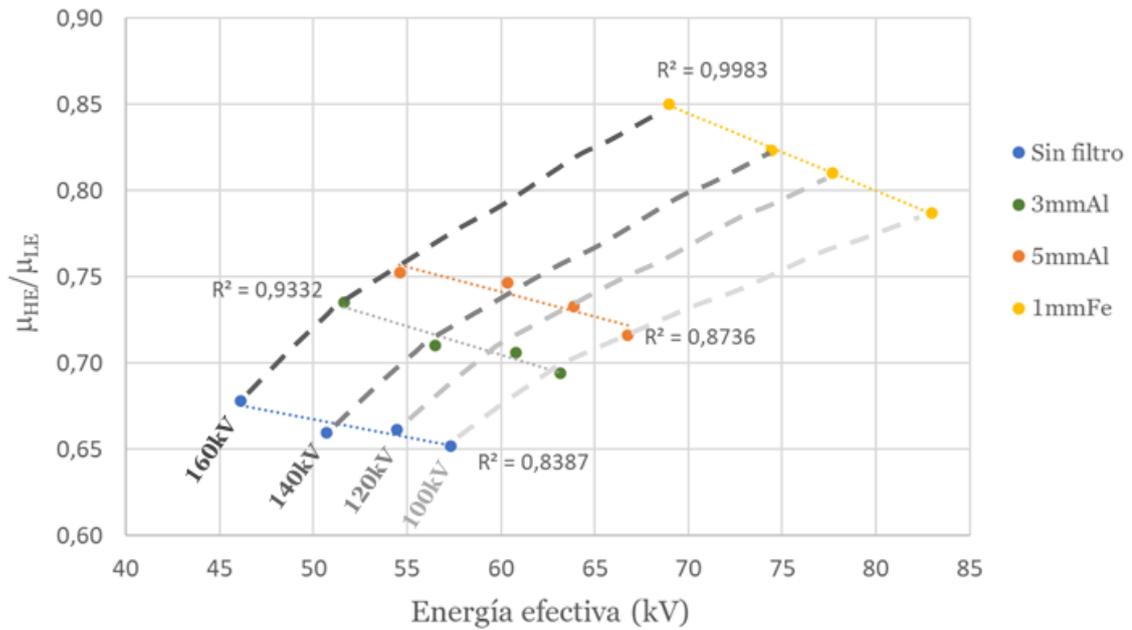


Figura 38. Ajuste lineal de la relación entre coeficientes de absorción de baja y alta energía frente a la energía efectiva.

La Figura 38 nos muestra la relación entre coeficientes y se observa la bondad a un ajuste lineal para las cuatro condiciones de filtraje. De hecho, llama la atención que esta relación sea lineal pues no era esperado o, al menos, claramente evidente. Podemos observar que a medida que se aumenta el filtraje crece la energía efectiva registrada en el canal de baja energía (este hecho sí que es esperado). A consecuencia los coeficientes de absorción de baja y alta energía se hacen más similares (valores entre 0.78 y 0.85 en el caso del filtraje con 1mm de Fe). Parece observarse también una mejora de la linealidad en las condiciones de mayor filtraje, aunque también es cierto que los valores de las energías efectivas han sido obtenidos sobre interpolación de la Figura 26. Pese a obtenerse una mejora en la linealidad aparente también podemos observar que en esas condiciones de filtraje, los coeficientes de absorción para los dos canales son más parecidos (relación entre coeficientes cercana a 1). Este hecho dificultaría el cálculo de la densidad con suficiente resolución.

Por otro lado, la gráfica nos permite predecir la relación entre coeficientes para otras condiciones de filtrado intermedias y/o el filtrado con otros materiales. Basta con seguir las líneas gruesas dibujadas en la gráfica para poder tener una estimación razonablemente buena de lo que ocurriría en otras condiciones de

filtrado o en otras condiciones operativas de la fuente RX (energía). Esto permitiría a la empresa utilizar la ventana de trabajo más propia para el desarrollo de su prototipo siendo este el objetivo último de este trabajo.

Respecto a las condiciones óptimas de trabajo del futuro prototipo, es preciso indicar que existe un delicado balance entre la pérdida de linealidad por endurecimiento de haz y la necesidad de obtener coeficientes de absorción lo más distintos posible para una determinación de la densidad con una resolución de 1-2kg/m<sup>3</sup>. Fruto de este trabajo la empresa seguirá trabajando en esta línea y con la base del trabajo realizado.

## 6 CONCLUSIONES

Para la realización del trabajo se han utilizado gran variedad de conceptos físicos, unos ya conocidos por haber sido introducidos en el grado, pero muchos otros aprendidos durante la realización de este trabajo. Se han empleado nociones teóricas sobre óptica, electromagnetismo, cuántica o física de materiales, así como procedimientos experimentales y análisis de datos con los que nos hemos ido familiarizando desde el primer curso del grado. Nos hemos adentrado en el mundo de los rayos X adquiriendo conocimiento sobre las características de éstos, así como de la fuente que los emite y los tipos de detectores que los recibe. Se ha hecho un estudio exhaustivo adquiriendo conocimientos sobre la absorción de los rayos X por la materia mediante el coeficiente de absorción y nos hemos familiarizado con la ecuación de Beer-Lambert, ecuación de la que parte el estudio. Hemos visto de primera mano su gran utilidad en la industria estudiando una aplicación como es la medición de la densidad de placas de gran formato de un modo mucho más eficiente y económico que otros sistemas ya existentes. A pesar de que en este trabajo no se ha llegado a determinar la densidad de las placas, sí se ha estudiado el método hasta llegar al momento previo a la determinación.

Se ha estudiado una configuración del sistema de adquisición óptima para la determinación posterior del mapa de densidad aparente mediante el estudio del camino óptico del haz en el interior del material minimizándolo mediante una distancia fuente-detector de 600-650mm, distancia de máximo alejamiento sin suponer una pérdida de potencia grande.

En base a la composición del gres porcelánico y datos procedentes de tablas se ha calculado el coeficiente de absorción en función de la energía, así como su densidad media teórica. Estos datos son de gran utilidad pues suponen la base de los cálculos realizados.

Mediante el escaneo de las probetas cilíndricas bajo diversos parámetros (distintas energías y filtros) se han obtenido imágenes en formato de texto que se han convertido a un formato en imagen TIFF (imágenes de mapa de bits) para su posterior corrección para obtener una imagen RX de alta calidad. Mediante la

imagen corregida se han medido las intensidades transmitidas por las probetas. Nos hemos familiarizado con el programa de tratamiento de imágenes FIJI y sus funciones realizando las correcciones mencionadas y la medición de valores sobre la imagen.

Se ha realizado un ajuste (como otros tantos realizados en el laboratorio durante el grado) de los valores obtenidos a la ecuación de Beer-Lambert para obtener el coeficiente de absorción a dos energías. Una comparación de los coeficientes de absorción experimentales con los teóricos nos ha permitido obtener las energías efectivas, energías con las que realmente se trabaja en cada canal al fijar un kV. Esto nos ha permitido estudiar las condiciones (energía y filtros) para corregir el endurecimiento del haz y poder generar la base de un método para la determinación de la densidad aparente.

Con todo lo anterior se concluye que se han conseguido exitosamente los objetivos propuestos del trabajo de fin de grado.

## 7 REFERENCIAS

- [1] G. Farmelo, “El descubrimiento de los rayos X,” *Investig. Cienc.*, no. 232, pp. 64–70, 1996.
- [2] Glenn Stark, “X-ray Fundamental characteristics Wave nature,” pp. 1–8, 2020.
- [3] J. L. Amorós *et al.*, “Estudio de la operación de prensado de baldosas de gran formato utilizando la absorción de rayos X,” *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, vol. 49, no. 4, pp. 279–287, 2010.
- [4] S. Pérez Tamarit, “Structural characterization of solid cellular polymers by X-ray tomography and light scattering,” 2019, doi: 10.35376/10324/36273.
- [5] S. Pardo-Alonso, “X-Ray Imaging Applied to the Characterization of Polymer Foams’ Cellular Structure and Its Evolution,” 2014.
- [6] S. Balter, “Physics and Technology X-ray Generation and Control,” vol. 97, no. July 1998, pp. 92–97, 1999.
- [7] F. E. Zink, “X-ray tubes.,” *RadioGraphics*, vol. 17, no. 5, pp. 1259–1268, Sep. 1997.
- [8] M. Baur, N. Uhlmann, T. Pöschel, and M. Schröter, “Correction of beam hardening in X-ray radiograms,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 90, no. 2, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1063/1.5080540.
- [9] SUNY Upstate Medical University, “Dual Energy Radiography Acquisition and Processing,” 2014.
- [10] C. Draus, M. Manager, and E. P. Inspection, “¿Tecnología de Rayos-x de Energía Simple o Doble Energía para la Inspección de Alimentos?,” no. March, 2017.
- [11] “XRBD Monoblock ® Integrated X-Ray Source,” 2019. [Online]. Available: <https://www.spellmanhv.com/es/high-voltage-power-supplies/XRBD>.
- [12] HAMAMATSU PHOTONICS K.K., “Photodiode Module and Controller C13938-9627. Reference Specification Sheet.,” 2019.
- [13] HAMAMATSU PHOTONICS K.K., “Detector for Non Destructive Inspection,” 2018.
- [14] J. Schindelin *et al.*, “Fiji: An open-source platform for biological-image analysis,” *Nat. Methods*, vol. 9, no. 7, pp. 676–682, 2012, doi: 10.1038/nmeth.2019.

- [15] Nacional Institute of Standards and Technology (NIST), “X-ray form factor, attenuation and scattering tables.” [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/FFast/html/form.html>.