UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

UNIVERSITAT DE BARCELONA

**Projecte Final d'Estudis**
**MÀSTER**
**EN**
**ENGINYERIA BIOMÈDICA**

EB

# PUESTA A PUNTO Y CARACTERIZACIÓN DOSIMÉTRICA DE HACES DE RAYOS X DE BAJA ENERGÍA

Barcelona, 4 de Septembre del 2012

Autor: Raúl Marco Domínguez.
Director: Mercè Ginjaume Egido.

Realitzat a: Institut de Tècniques Energètiques UPC

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

UNIVERSITAT DE BARCELONA

Data de registre:

**MÀSTER ENGINYERIA BIOMÈDICA**

**Registre Projecte Final d'Estudis**

NOM DE L'ALUMNE: RAÚL MARCO DOMÍNGUEZ

TÍTOL DEL PROJECTE: PUESTA A PUNTO Y CARACTERIZACIÓN DOSIMÉTRICA DE HACES DE RAYOS X DE BAJA ENERGÍA.

DIRECTOR/S DEL PROJECTE:
(Indiqueu Centre, Departament, Empresa, Hospital, etc. on està vinculat el director)

MERCE GINJAUME EGIDO
Institut de Tècniques Energètiques - UPC

Dr. MERCE GINJAUME
Director del projecte

Signatura de l'alumne RAÚL MARCO

Dr. Pere Caminal
Coordinador UPC
Màster Enginyeria Biomèdica

Dr. Josep Samitier
Coordinador UB
Màster Enginyeria Biomèdica

**AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer a la Dra Mercè Ginjaume Egido que me ha dado la oportunidad de realizar el proyecto final de máster y me ha ayudado en todas las dudas que han ido surgiendo e implicándose en las correcciones en cada paso del proyecto. Además de abrirme las puertas del departamento y del laboratorio del INTE, donde he podido realizar los experimentos en el laboratorio y he tenido acceso a los equipos para poder realizarlos.

También agradecer a todas las personas que forman parte del convenio de colaboración entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad Politécnica de Catalunya para la creación de la cátedra de seguridad nuclear ARGOS, por la ayuda económica que me han brindado.

A los compañeros del Máster Oficial en Ingeniería Biomédica por los buenos ratos y la camaradería durante las épocas de exámenes.

En último lugar y más importante a mi novia Janka. A mi familia: Mariano, Elisa, Francisco, Núria, Amador, Elisa, Montse, Marta, Coco y Csipi. A mis amigos de siempre: Aitor, Edu, Gonzalo y Marc.

Por el apoyo y la ayuda que me han dado en todo momento.

Gracias a tod@s.

## RESUMEN

El proyecto realizado quiere caracterizar los haces de rayos X del laboratorio de calibración de mamografía del INTE, para poder cumplir con la normativa IEC 61267 *[2]*. para laboratorios de calibración de equipos de rayos X para radiodiagnóstico y de esta forma poder iniciar su trabajo como laboratorio de calibración acreditado.

Se ha realizado tomas de datos experimentales en el laboratorio a lo largo del proyecto para poder llevar a cabo la caracterización de los haces de rayos X según la calidad RQR-M de la norma IEC 61267 *[2]*. En el proyecto se ha verificado que se cumplen los requisitos de la norma para la tensión del haz y la capa de hemirreducción.

Se ha realizado un mantenimiento previo y unas comprobaciones eléctricas del mamógrafo antes de realizar dichas medidas, asegurándonos que el laboratorio cumple con los requisitos de la norma IEC 61267 [2].

Finalmente, mediante los equipos patrón del Laboratorio se ha determinado el valor de referencia del kerma en aire y la tensión del tubo y, a modo de ejemplo, se ha efectuado la calibración de un equipo de la misma categoría que los equipos que serán objeto de calibración en el laboratorio una vez acreditado.

# ÍNDICE


**1. GLOSARIO. 6**

**2. INTRODUCCIÓN. 10**

**3. ANTECEDENTES DEL LABORATORIO. 11**

**4. OBJETIVO. 12**

**5. NORMATIVA VIGENTE. 13**

**5.1. ISO 17025. 13**

**5.2. IEC 61267. 14**

**6. MEDIDAS INSTRUMENTALES Y CONTROLES DE CALIDAD. 16**

**6.1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS. 17**

**6.1.1. Mamógrafo MAMMOMAT 1000. 18**

**6.1.2. Equipo de medición de parámetros eléctricos Keithley 2400. 19**

**6.1.3. Equipos de medición de kerma en aire. 20**

6.1.3.1. Equipo patrón para la medida del kerma en aire. 20

6.1.3.2. PMX – III QA System. 21

**6.1.4. Estación atmosférica Oregón scientific 22**

**6.2. PROCEDIMIENTOS Y ENSAYOS. 23**

**6.2.1. Mantenimiento del mamógrafo. 24**

6.2.1.1. Comprobaciones mecánicas. 24

6.2.1.2. Control de sistemas electrónicos. 25

6.2.1.3. Sistemas de seguridad. 26

**6.2.2. Obtención de los parámetros eléctricos. 27**

6.2.2.1. Método de la placa PCB D710. 29

6.2.2.2. Método de la placa PCB D705. 34

**6.2.3. Medidas dosimétricas. 36**

6.2.3.1. Medidas preliminares de la cámara de ionización PTW. 36

6.2.3.2. Cálculo de las capas de hemirreducción. 39

6.2.3.3. Determinación del $k_{aire}$ de referencia para las calidades RQR-M. 43

**6.2.4. Calibración de un medidor de control de calidad en mamografía 45**

6.2.4.1. Medidas de tensión 46

6.2.4.2. Medidas de kerma en aire 46

**7. RESULTADOS 47**

**7.1. RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DE TENSIÓN. 47**

**7.2. RESULTADOS DE LAS MEDIDAS PRELIMINARES DE LA CÁMARA DE IONIZACIÓN PTW. 50**

**7.3. RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DEL KERMA DE REFERENCIA PARA LAS CALIDADES RQR-M. 52**

**7.4. RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LAS CHR. 53**

**7.5. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE UN MEDIDOR DE CONTROL DE CALIDAD EN MAMOGRAFÍA. 57**

**8. CONCLUSIONES 59**

**BIBLIOGRAFÍA 60**

## ANEXOS

1. ***PROCEDIMIENTO S2C021 V2.***
2. ***CÁLCULO DEL VOLTAJE DEL TUBO DE RAYOS X.***
3. ***CONTROL DE ESTABILIDAD DEL EQUIPO PATRÓN.***
4. ***DETERMINACIÓN DEL KERMA EN AIRE DE REFERENCIA PARA LAS CALIDADES DE RQR-M.***
5. ***CÁLCULO DE LA 1ª Y 2ª CHR.***
6. ***CALIBRACIÓN DEL EQUIPO PMX III CON EL EQUIPO PATRÓN PTW***

# 1 GLOSARIO.

**DEFINICIONES.**

**a) Dosis absorbida:** Energía depositada por unidad de masa de material. Su unidad de medida del sistema internacional es el gray [Gy], que equivale a 1 J/kg. La unidad tradicional de la dosis absorbida son los rads [rad]. Un rad es una centésima parte de un gray (100 rad = 1Gy)

**b) Dosis equivalente en un órgano o tejido, T:** Describe el efecto de un cierto valor de dosis absorbida por un tejido, T, según el tipo de radiación, R, que incide en el tejido. Se obtiene multiplicando la dosis efectiva por un factor de ponderación $w_R$ (ver tabla 1.1) según el tipo de radiación, sumado para todas las radiaciones. Se expresa en sieverts (Sv).

$$H_{T,R}[Sv] = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}[Gy]$$

(Ec. 1.1).

| Tipo de radiación | $W_R$ |
|---|---|
| Radiación gamma y X | 1 |
| Partículas beta | 1 |
| Neutrones | 5 -20 |
| Protones | 5 |
| Partículas alfa | 20 |

**Tabla 1.1: Factor de evaluación de dosis efectiva de los diversos tipos de radiación.**

**c) Dosis efectiva:** Es la suma ponderada de las dosis equivalentes en los distintos órganos del cuerpo. Se expresa en Sv.

Se calcula multiplicando la Dosis equivalente en el órgano, T, $H_T$ por un factor de ponderación $w_T$ (ver tabla 1.2) estipulado para cada órgano o tejido.

$$E_{T,E}[Sv] = \sum_T w_T \cdot H_T[Gy]$$

(Ec. 1.2).

| Tejido u órgano | $W_T$ |
|---|---|
| superficie ósea, piel | 0,01 |
| vejiga, mama, hígado, esófago, tiroides | 0,05 |
| medula ósea, colon, pulmón, estómago | 0,12 |
| gónadas | 0,20 |
| resto de los tejidos | 0,05 |

**Tabla 1.2: Factor de ponderación de dosis efectiva de diversos tejidos u órganos.**

**d) Kerma en aire:** del inglés *Kinetic energy released by mass absorption* es la energía cinética transferida por la radiación (fotones) a los electrones presentes en el medio (aire) por unidad de masa de aire seco. La unidad es el Gray (Gy) que equivale a una energía de un Joule dividido por un kg de masa.

$$K_a[Gy] = \frac{dE}{dm_{aire}} \left[\frac{J}{kg}\right]$$

(Ec. 1.3).

En este proyecto se determina el kerma en aire como magnitud derivada a partir de la cantidad de carga eléctrica generada por la ionización del gas dentro de la cámara de ionización patrón.

**e) Exposición**: La exposición es la carga total de iones por unidad de masa de aire seco. Su unidad del sistema internacional son los culombios por kilogramo [C/kg]. Aunque también, tradicionalmente, la unidad antigua es el roentgen (1R = 2,58 · $10^{-4}$ C/kg).

La exposición de 1 roentgen deja en el tejido humano una dosis de 0,96 rads. A su vez un rad equivale a una centésima parte de Gy. Por tanto se puede calcular el kerma en aire producida por un roentgen utilizando un factor de conversión:

$$1R \cdot \frac{0{,}96\ rads}{1R} \cdot \frac{0{,}01\ Gy}{1\ rads}$$

(Ec. 1.4).

Actualmente se utiliza como magnitud radiológica de referencia el kerma en aire en vez de la exposición.

En condiciones de equilibrio electrónico, la exposición puede derivarse del kerma en aire aplicando la expresión siguiente,

$$X = k\,\frac{(1-g_{air})}{(W/e)}\,K_{air}$$

(Ec.1.5).

$k$ es un factor de conversión de unidades $g_{air}$ es la fracción de la energía de las partículas cargadas secundarias que se disipa en el aire por efecto de la radiación de frenado, en el caso de los rayos X es igual a 0, $W$ es la energía media disipada en el aire por par de iones formado y $e$ es la carga elemental , $W/e$ es igual a 33,97 J/C.

En el S.I. de unidades $K_{air}$ se expresa en (Gy), $X$ en (C/kg) y $k$ = 1.

Si se desea expresar $X$ en Roentgens:

$$k = \frac{1R}{2.58\,10^{-4}\ C\,kg^{-1}}\,.$$

(Ec.1.6).

Por lo que en el cálculo de la Kaire del equipo PMX utilizaremos la ecuación siguiente:

$$K_a[Gy] = X[R] \cdot 2{,}58 \cdot 10^{-4} \left[\frac{C}{R \cdot Kg}\right] \cdot 33{,}97[J/C]$$

(Ec.1.7).

**f) Atenuación:** Es la pérdida de energía por absorción y dispersión de la radiación en el medio.

**g) Capa de hemirreducción (CHR):** Corresponde al grosor de material que debe tener un filtro para reducir la tasa de kerma en aire a la mitad.

El filtro de grosor correspondiente a la 1ª CHR absorbe la energía de radiación suficiente para que la energía que lo atraviesa deposite la mitad de kerma en aire en la cámara de ionización de la detectada previamente sin dicho filtro.

Para los ensayos realizados durante el proyecto se ha calculado la primera y segunda capa de hemirreducción que corresponende a reducir el kerma en aire, detectada por la cámara de ionización, a la mitad y en un cuarto, respectivamente.

# 2 INTRODUCCIÓN.

Este proyecto final de máster consiste en la colaboración del alumno para la puesta a punto del laboratorio de calibración de mamografía del Instituto de Técnicas Energéticas de la UPC (INTE) localizado en la ETSEIB, para su acreditación como laboratorio de calibración.

En dicho laboratorio se generan haces de rayos X del rango de mamografía de manera que se puedan calibrar los equipos de detección de dosis que se utilizarán en la verificación y calibración de mamógrafos para aplicaciones diagnósticas.

El laboratorio de mamografía y los equipos utilizados deben cumplir con los requisitos y los ensayos descritos de la normativa *ISO 17025* [1] para laboratorios de ensayos y calibración de cualquier especialidad. Y con la norma *IEC 61267* [2] para laboratorios de calibrado de mamografía en particular. Además los aparatos de medición de dosis deben cumplir con la norma *IEC 61674* [3].

Estos ensayos han requerido del estudio de los manuales técnicos del mamógrafo y los equipos implicados para poder llevarlos a la práctica. Se han realizado ensayos de ejemplo (previa sesión de mantenimiento y puesta a punto) para obtener tomas de datos y poder corroborar los resultados obtenidos en el propio laboratorio con la documentación de los certificados de calibración.

# 3 ANTECEDENTES DEL LABORATORIO.

El Instituto de Técnicas Energéticas (INTE) es un instituto de investigación de la Universitat Politècnica de Catalunya cuyo ámbito de actuación son las actividades relacionadas con el uso de las radiaciones ionizantes, la radiactividad y medio ambiente, la física nuclear, la tecnología de aceleradores, dosimetría y radiofísica médica y desarrollos energéticos.

Actualmente el INTE dispone de tres laboratorios acreditados por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) como laboratorios de ensayo y calibración. Además de un laboratorio de estudios atmosféricos de gas radón, una estación radiometeorológica y de un laboratorio dedicado a la catálisis y tecnología del hidrogeno.

Este proyecto se incluye dentro de las actividades del Laboratorio de Calibración y Dosimetría (LCD) cuya primera fecha de acreditación por el Sistema de Calibración Industrial (SCI) fué en 1987, posteriormente se acreditó por ENAC en 1998 y desde aquella fecha el laboratorio ha ido ampliando sus equipos y capacidades de calibración. Actualmente el LCD ofrece calibraciones con haces de fotones gamma, fuentes radiactivas puntuales, emisores beta y haces de rayos X para niveles de protección, de radiodiagnóstico general y de mamografía.

# 4 OBJETIVO.

Concretamente el proyecto se propone llevar a cabo la caracterización de los haces de rayos X de mamografía de acuerdo a la norma *IEC 61267* [2], asegurando la calidad de la medida y la reproducción de los haces y magnitudes de referencia.

Dicho laboratorio se ha trasladado recientemente a una nueva ubicación, edificio ETSEIB, pabellón C, planta -1. Durante este proyecto se han repasado y mejorado los procedimientos de mantenimiento y se ha llevado a cabo la puesta a punto y la calibración del mamógrafo en la nueva ubicación.

# 5 NORMATIVA VIGENTE.

Dado que el laboratorio de calibración no ofrece atención a pacientes, sino que su función consiste en calibrar detectores, equipos y medidores de radiación, no se le aplica la normativa de exposición para pacientes del *Protocolo español de control de calidad en radiodiagnóstico* [13], sin embargo se deben tener en cuenta sus recomendaciones ya que los equipos que se calibran se utilizan parar su aplicación.

Las normativas que afectan directamente al desarrollo de este proyecto son: La *norma ISO 17025* [1], de obligado cumplimiento para todos los laboratorios de calibración acreditados por ENAC y la *norma IEC 61267* [2] que describe como determinar las características de equipos de radiodiagnóstico médico para mamografía. Adicionalmente los equipos de medición de dosis deben cumplir con la *norma IEC 61674* [3].

## 5.1 NORMA ISO 17025.

Tal y como se indica en la introducción, esta norma establece los requisitos que debe tener un laboratorio de ensayos o calibraciones.

Se requiere definir un organigrama de responsabilidades dentro del laboratorio, incluyendo un departamento de gestión de calidad que velará para que se cumplan las disposiciones de la norma utilizando documentación interna de control, los procedimientos y auditorías internas.

El personal del laboratorio debe estar capacitado para realizar los procedimientos. El personal en formación debe estar supervisado adecuadamente, en nuestro caso debe estar adiestrado en el manejo y seguridad de equipos de rayos X. Así mismo debe garantizarse la imparcialidad, independencia e integridad del laboratorio y de su personal y estar libre de cualquier influencia por parte del cliente así como asegurar la confidencialidad de los resultados.

El laboratorio tiene que garantizar sus métodos mediante exámenes e informes objetivos donde se cumplen los requisitos de uso de los equipos. Se mantiene un registro de todos los informes y resultados, incertidumbres, límites de detección, sensibilidades, etc; para así garantizar su repetibilidad.

Por otra parte la norma *ISO 17025* [1] exige que los laboratorios demuestren su competencia técnica en su ámbito de actuación. En el laboratorio de mamografía del INTE los haces de referencia y los requisitos técnicos que debe cumplir el laboratorio se describen en la norma *IEC 61267* [2].

## 5.2 NORMA IEC 61267.

Esta norma proporciona métodos para generar haces de radiación con condiciones concretas que se pueden utilizar para exámenes de calibración para determinar las características de los rayos X de equipos para diagnóstico médico.

La principal característica de los campos de radiación viene dada por la distribución espectral del flujo de fotones. Debido a que las medidas para obtener el espectro son muy exigentes se puede expresar las calidades de radiación con los valores de voltaje del tubo y los valores de la primera y segunda capa de hemirreducción.

Las condiciones estándar de radiación vienen definidas por el material del tubo emisor de rayos X, el voltaje del tubo, filtros específicos de tubo y filtros añadidos durante el ensayo, añadido o no de maniquís, el valor de las capas de hemirreducción, el coeficiente de homogeneidad y la distancia de aplicación.

La norma *IEC 61267* [2] describe diez clausulas sobre cómo se deben llevar a cabo los procedimientos de medida para obtener las calidades de la radiación de referencia. De estas diez seis corresponden a aproximaciones de haces de radiación libres de radiación dispersa (RQR, RQA, RQC, RQT, RQR-M y RQA-M) y cuatro corresponden a haces que simulan la presencia de los pacientes y que tienen en cuenta la radiación dispersa (RQN, RQB, RQN-M y RQB-M).

Del conjunto de calidades señaladas, la norma especifica que cuatro de ellas (RQR-M, RQA-M, RQN-M, RQB-M) corresponden al ámbito de la mamografía, rayos X con un voltaje del tubo menor a 40 kV y ánodo de molibdeno. Actualmente el laboratorio del INTE tiene capacidad para realizar las calidades RQR-M que serán las que se apliquen para este proyecto.

La calidad de radiación RQR-M utiliza una fuente emisora de rayos X de foco fino indicado para estudios de mamografía. El haz se caracteriza mediante el cálculo de la primera y segunda capa de hemirreducción para cada voltaje del tubo de rayos X indicado en la tabla 5.1.

| Caracterización de las calidades de radiación estándar. | Voltaje nominal del tubo de rayos X en kV | Grosor nominal de la capa de hemirreduccion en mm de aluminio. |
|---|---|---|
| **RQR-M 1** | 25 | 0,28 |
| **RQR-M 2** | 28 | 0,31 |
| **RQR-M 3** | 30 | 0,33 |
| **RQR-M 4** | 35 | 0,36 |

**Tabla 5.1: Identificación y características de las calidades RQR-M** *[2]*.

Las capas de hemirreducción se determinan usando filtros de aluminio de espesor conocido para las tensiones nominales en el tubo de 25, 28 ,30 y 35 kV. Sus condiciones de ensayo son:

- Tubo emisor de molibdeno.
- Voltaje de tubo con un rizado máximo del 4%
- Filtro intrínseco de 32 ± 2 µm de molibdeno dentro del propio tubo.

# 6 MEDIDAS INSTRUMENTALES Y CONTROLES DE CALIDAD.

De acuerdo a la norma *IEC 61267* [2] y concretamente para las calidades que abarca el proyecto, RQR-M, se requiere calcular el grosor de aluminio necesario para conseguir las dos primeras capas de hemirreducción. Para cada capa de hemirreducción se reduce la fluencia de fotones que atraviesa la capa de filtrado de aluminio a la mitad.

Lo primero que se necesita es un generador de rayos X para mamografía, con un ánodo de molibdeno, filtro de molibdeno de 32 ± 2 µm o equivalente y que trabaje a los voltajes requeridos para dichas calidades. Estas condiciones se cumplen para la mayoría de equipos de mamografía diagnóstica con tubo de molibdeno.

Se medirá el kerma en aire detectado por la cámara de ionización PTW situada en la bandeja del mamógrafo, en el mismo lugar donde se situaría la mama de la paciente.

Para realizar el cálculo del grosor de aluminio necesario para determinar las CHR se toman medidas de kerma en aire sin filtrado y luego introduciendo sucesivas láminas de aluminio de 0.1 mm (±2%) para diferentes voltajes nominales. Por tanto se necesita medir en primer lugar la tensión eléctrica que llega al tubo de rayos X, para confirmar que se cumplen los requisitos establecidos por la norma.

La calibración de los equipos se debe realizar dentro de los rangos de temperatura, presión y humedad que indican los certificados de calibración de los diferentes equipos y los fabricantes, definidos en el apartado siguiente *5.1 Descripción de equipos*. Por lo que deben controlarse estos parámetros en la sala donde se realizan las medidas, mediante una estación meteorológica. En algunos equipos, como las cámaras de ionización que se utilizarán para medir el kerma en aire, las lecturas deben corregirse en función de la densidad del aire, esta variación en la densidad afecta a la dosis absorbida por el medio antes de llegar al detector.

## 6.1 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS.

Para realizar medidas de kerma en aire, tensión eléctrica, temperatura, presión atmosférica y humedad; se necesitan diversos equipos. A continuación se muestra la tabla 6.1 con los equipos utilizados durante el proyecto.

| Equipo | Magnitud medida | Unidad medida | Unidad calculada |
|---|---|---|---|
| Mamógrafo MAMMOMAT 1000 | Equipo emisor | | |
| Fuente de verificación $^{14}C$ | Equipo emisor | | |
| Sonda MX | Kerma | mili roentgen (mR) | gray |
| Cámara PTW | | pico culombios (pC) | |
| Electrómetro UNIDOS | Carga eléctrica | pico culombios (pC) | |
| Generador y medidor de tensión e intensidad Keithley | Tensión | kilo voltios (kV) | |
| Termómetro/Barómetro/Higrómetro OREGON SCIENTIFIC | Temperatura | ºC | ºK |
| | Presión | mili bares (mbar) | |
| | Humedad | % H2O | |

**Tabla 6.1. Equipos utilizados durante el proyecto.**

Todos los equipos de medida utilizados en el laboratorio están debidamente calibrados, de acuerdo con los requisitos de la norma *ISO 17025* [1] para los laboratorios de calibración.

### 6.1.1 Mamógrafo MAMMOMAT 1000.

El generador de rayos X para mamografía apto para utilizar en los ensayos de la norma *IEC 61267* [2] RQR-M requiere un tubo emisor de molibdeno con la condición de narrow beam (foco fino) con un filtro del tubo de molibdeno de 32 µm ± 2 µm, que pueda trabajar entre los 25 y 35 kV a 100 mA.

El mamógrafo instalado en el laboratorio corresponde al modelo MAMMOMAT 1000 del fabricante SIEMENS, 2005. Se dispone del *manual de usuario* [14] que contiene las especificaciones del equipo e ilustra como navegar por los menús de la consola. También se dispone del *manual técnico* [15] en el que se indica el funcionamiento interno del aparato así como los esquemas de las placas electrónicas y cada uno de sus componentes y los procedimientos de mantenimiento y ajuste recomendados.

**Ilustración 6.1: MAMMOMAT 1000.**

El sistema MAMMOMAT 1000 utiliza un tubo de rayos X de molibdeno con ánodo giratorio de molibdeno y dos focos.

La tensión nominal máxima del tubo es de 35 kV con una intensidad de 134 mA.

El colimador tiene un filtro fijo de molibdeno de 30 µm fijado al soporte.

Las condiciones ambientales en las que el equipo funciona correctamente son con una temperatura ambiente entre los -10º y 40 ºC, con una humedad relativa entre 30 y 70 % y una presión atmosférica de 700 hasta 1060 kPa.

El generador de rayos X es pues apto para ser utilizado en los ensayos de la norma *IEC 61267* [2], las condiciones ambientales de funcionamiento se cumplen fácilmente en el laboratorio.

### 6.1.2 Equipo de medición de parámetros eléctricos Keithley 2400.

De acuerdo con la *IEC 61267* [2], los haces de radiación se definen por la tensión eléctrica (25, 28, 30, 35 kV) que utiliza el tubo de rayos X.

Para realizar las comprobaciones eléctricas correspondientes, se utiliza un generador y medidor de tensión e intensidad Keithley modelo 2400 nº de serie 0649182, número de inventario 9808004.01.

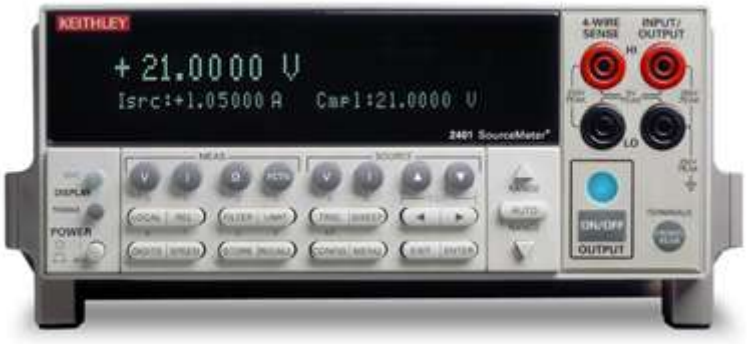



**Ilustración 6.2: Keithley 2400.**

Para realizar las medidas se ha estudiado el *manual de usuario del Keithley* [6] para saber cómo medir los parámetros eléctricos, poniendo especial atención al capítulo sobre almacenamiento de datos, *Data Store*. Con la toma guardada podemos obtener los valores del pico de tensión al efectuar el disparo del mamógrafo.

El keithley 2400 trabaja a máxima precisión en el rango de humedad relativa inferior al 70% RH y a una temperatura de 23 ± 5ºC. Por encima o por debajo de estos niveles necesita de un coeficiente de corrección extra según el manual [6].

### 6.1.3 Equipos de medición del kerma en aire o magnitudes radiológicas derivadas.

En los ensayos de la norma *IEC 61267* [2] debemos medir el kerma en aire o magnitud derivada, para las calidades RQR-M.

#### 6.1.3.1 Equipo patrón para la medida del kerma en aire.

El laboratorio de mamografía dispone de una cámara de ionización PTW TM77334 nº de serie 2251 conectada a un electrómetro PTW UNIDOS nº de serie 11508 que será el equipo patrón de referencia para poder llevar a cabo la calibración de los equipos de los usuarios del Laboratorio. Este equipo se ha calibrado en el Laboratorio Nacional Alemán PTB *(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)*. El certificado del PTB[10] establece el coeficiente de calibración del equipo para determinar el kerma en aire a partir de la medida de la carga registrada en el electrómetro.

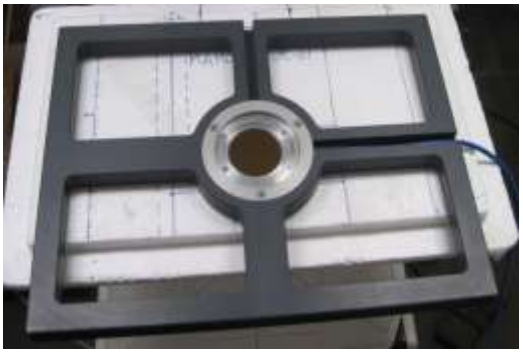


**Ilustración 6.3: Cámara de ionización PTW.**

**Ilustración 6.4: Fuente de verificación PTW.**

Como complemento, para verificar la estabilidad del conjunto, se dispone de una fuente de verificación de C-14, marca PTW modelo 894 nº de serie DW492. Con una tasa de dosis de 30mSv/h a 1 cm de distancia en aire.

Dicha fuente permite comparar la señal del electrómetro en condiciones controladas y en particular respecto a su calibración original.

Concretamente la fuente tiene un valor de dosis de $0{,}4146 \cdot 10^{-12}$ amperios detectada por la cámara de ionización PTW según el *certificado de calibración* [10].

El PTW UNIDOS T10001 es un electrómetro de alto rendimiento diseñado para calibración y dosimetría. El fabricante ofrece unas buenas especificaciones de linealidad, estabilidad, reproducibilidad y fuga.

**Ilustración 6.5: Electrómetro PTW UNIDOS.**

Puede medir valores de carga eléctrica, intensidad o de kerma en aire y tasa de kerma en aire. En los procedimientos de calibración se utilizarán las medidas en unidades de carga eléctrica, columbios (C). *Manual de usuario PTW* [12].

### *6.1.3.2 PMX – III QA System.*

**Ilustración 6.6: PMX III.**

Como ejemplo de calibraciones que se llevarán a cabo en el Laboratorio del INTE, se ha seleccionado el equipo PMX-III. Es un sistema no invasivo para el control de calidad en radiología. Dicho equipo puede medir diferentes magnitudes: kVp, tiempo de exposición, exposición, kerma en aire. En el proyecto se ha medido la exposición pero se ha calculado el kerma en aire respecto a este valor de exposición.

**Ilustración 6.7: Sonda MX.**

Con diferentes sondas adicionales también se puede medir la tasa de kerma en aire, la luminiscencia, la dosis/fotograma, la intensidad y la carga de trabajo [5]. En este proyecto se ha utilizado el detector interno para la calibración de la tensión de polarización y la sonda MX que se muestra en la ilustración 6.7 para la medida de la exposición y posterior cálculo del kerma en aire a partir de la exposición.

### 6.1.4 Estación atmosférica Oregon Scientific.

Según el apartado 5.3.2 de la norma *ISO 17025* [1] *"El laboratorio debe monitorear, controlar y registrar las condiciones ambientales, acorde con las especificaciones, métodos y procedimientos utilizados, o cuando éstas puedan afectar la calidad de los resultados".*

**Ilustración 6.8: Estación atmosf. Oregon Scientific.**

Además las medidas del equipo patrón (cámara PTW) deben tener en cuenta el factor de corrección por la densidad del aire. Para calcularlo se necesitan los valores de la presión atmosférica y la temperatura ambiente.

Por lo tanto para realizar el control de los parámetros atmosféricos y asegurarnos que trabajamos dentro de los rangos del mamógrafo que indica el fabricante, utilizaremos una estación atmosférica para uso científico. En el apartado 6.1.1 se especifican las condiciones atmosféricas de trabajo del MAMMOMAT 1000.

El equipo utilizado para la medida de las condiciones atmosféricas es la estación atmosférica OREGON SCIENTIFIC modelo BAR 898 HG nº de serie 05003. Dispone de termómetro, barómetro e higrómetro. Dicho equipo tiene una compensación del error de +1ºC y +10 bares de presión y un +6% de humedad relativa según su certificado de calibración externa [4] realizado por APPLUS.

## 6.2 PROCEDIMIENTOS Y ENSAYOS.

Previo a la realización de los ensayos de la norma IEC 61267 debe asegurarse que el mamógrafo está en perfectas condiciones de uso, para ello la primera tarea a realizar es una revisión del equipo.

Se debe revisar el mamógrafo siguiendo el procedimiento de mantenimiento del equipo de rayos X de baja energía para mamografía [9] descrito en el apartado 6*.2.1 Mantenimiento del mamógrafo.* Cerciorándose que la parte mecánica funcione correctamente. Que el aviso de seguridad luminoso de la sala se enciende correctamente al encender el equipo y al realizar disparos. Y que las señales de los leds de las placas del equipo no indiquen ninguna irregularidad.

A continuación se deben realizar las comprobaciones de los parámetros eléctricos del equipo, apartado *6.2.2 Obtención de los parámetros eléctricos*. De esta forma se obtendrá el voltaje real que llega al tubo de rayos X. Asegurando que se cumple con los voltajes requeridos para los ensayos RQR-M de la norma *IEC 61267* [2]. Se necesitan unos voltajes de 25, 28, 30 y 35 kV con un error máximo del1,5 kV.

El siguiente paso es verificar la cámara de ionización PTW y el electrómetro UNIDOS con la fuente de verificación PTW. Comparando los resultados con el valor del *certificado de calibración* [10].

A continuación debe llevarse a cabo la determinación de las capas de hemirredución [8] con filtros de aluminio para confirmar que se dispone de haces RQR-M según se define en la norma *IEC 61267* [2].

Una vez caracterizados los haces se pueden obtener valores de referencia del kerma en aire para cada calidad con la cámara patrón a una distancia del foco del tubo controlada. Las medidas de tensión y de kerma en aire se utilizarán como valores de referencia para calibrar equipos de los clientes del Laboratorio como el equipo PMX III.

### 6.2.1 Mantenimiento del mamógrafo.

Periódicamente debe realizarse el procedimiento de mantenimiento del mamógrafo [9] para comprobar que funcionan correctamente sus componentes mecánicos, electrónicos y sus sistemas de seguridad.

#### 6.2.1.1 Comprobaciones mecánicas.

Con el tubo de rayos X apagado, se deben comprobar los movimientos mecánicos del brazo tanto el movimiento lineal vertical como el movimiento rotatorio. Comprobar que el botón de paro de emergencia del equipo funciona correctamente, parándose el movimiento hasta que no se desbloquee el seguro. También el correcto funcionamiento de los pedales de activación del movimiento.

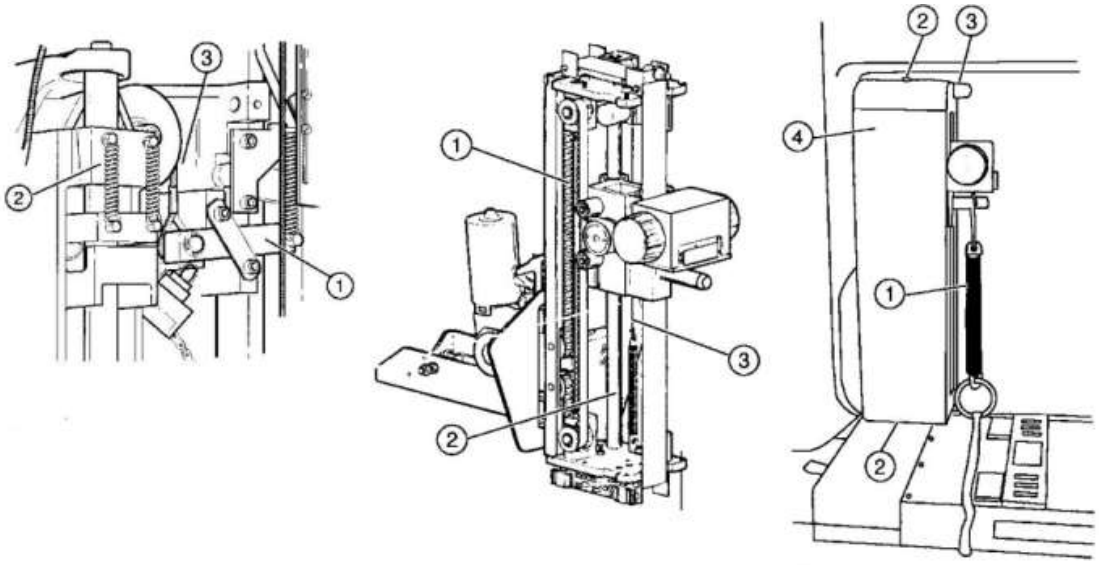



**Ilustración 6.9: Esquema de las partes mecánicas del Mammomat [14].**

Para llevar a cabo las comprobaciones mecánicas se abrirán las tapas protectoras de la parte posterior y superior del equipo de rayos X y se comprobará que los frenos y cables de contrapesos están en buen estado.

Posteriormente se deben engrasar los cables y raíles con *grasa PD2*, un lubricante genérico para motores, así como las cadenas con *grasa viscogen* específica para cadenas.

También se debe comprobar que la lámpara de iluminación esté enfocada correctamente en la mesa de apoyo. Para ello se enciende el foco y se comprueba que el foco luminoso ilumina toda la zona de interés de la bandeja del mamógrafo.

**Ilustración 6.10: Foco del MAMMOMAT [14].**

6.2.1.2 Control de sistemas electrónicos.

También se comprobará el estado de los LEDs indicadores dentro de las placas informáticas del panel en la mampara. Para ello se debe abrir la tapa protectora debajo de la consola de mando. En la placa D701 se debe comprobar que los LEDs L1 y L4 deben estar encendidos y los L2, L3, L8, L9, L10, L11 apagados. L5, L6 y L7 pueden estar encendidos o apagados. En la placa D702 el LED L15 debe estar encendido y el resto apagados. Para la placa D711 los LEDS V9, V11 y V16 deben estar encendidos y V13 apagado.

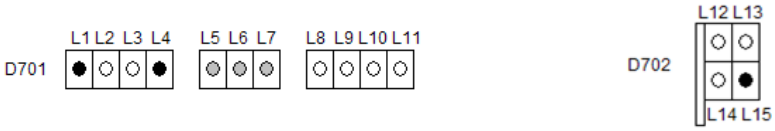



**Ilustración 6.11: Esquema de los LEDs de las placas D701 y D702 [15].**

Antes de realizar cualquier medida se comprobara que el LED V24 está apagado, este LED encendido indica que hay tensiones cercanas al kilovoltio. En caso de que esté encendido no se debe realizar ninguna medida.

A continuación se verificará la tensión a la que trabaja el equipo. Para obtener estos datos se realizarán varias medidas de tensión con el medidor de tensión e intensidad tal y como se explica en el apartado 6.*2.2.1 Método de la placa D 710.* A los voltajes e intensidades que se muestran en la tabla 6.2.

| **Tubo de rayos X** | |
|---|---|
| **V (kV)** | I (mAs) |
| **30** | 20 |
| **35** | 100 |
| **25** | 100 |
| **30** | 10 |

**Tabla 6.2: Tensión y corriente del tubo para mantenimiento.**

También se comprobará que el valor de las resistencias R1, R2 está dentro de su rango de valores y de error teórico. Conectando las pinzas del generador y medidor Keithley en los bornes X73 (R+) y X74 (S) de la placa D710 se puede medir R2, a posteriori se calcula el valor de R1.

$$R1 = 200\text{M}\Omega \pm 1\% \qquad \text{R2: } 20\ \text{k}\Omega \pm 0{,}5\% \qquad R2 = \frac{R1}{10000}$$

(Ec. 6.1).

6.2.1.3 Sistemas de Seguridad.

Antes de poner en marcha el equipo para la verificación de los sistemas de seguridad se debe realizar un precalentamiento del equipo de al menos 15 minutos. Conectando el equipo con la llave en la parte exterior de la sala, en este momento se comprueba que la luz de color ámbar está encendida. Dado que la luz roja solo se enciende cuando se disparan los rayos X, la comprobación de la misma requiere de que otra persona en el exterior verifique que se enciende la luz roja al efectuar un disparo, ya que mientras la puerta del laboratorio esté abierta no se pueden efectuar disparo, cumpliendo de esta forma la norma *ISO 17025 apartado 5.3.3* [1] *"Debe existir*

*una separación efectiva entre las áreas vecinas en donde se efectúan actividades incompatibles. Se deben tomar medidas para evitar la contaminación cruzada, así como cumpliendo con las norma de protección radiológica."*

### 6.2.2. Obtención de los parámetros eléctricos.

Partiendo del procedimiento interno del laboratorio *S2C021*[7] de calibración de los parámetros eléctricos del equipo de rayos X de baja energía para mamografía redactado para la anterior localización del laboratorio de dosimetría se ha estudiado dicho procedimiento y los manuales de cada uno de los equipos de medida eléctrica y se ha comprobado paso por paso el procedimiento, actualizándolo en las partes necesarias y verificando los resultados con la obtención de una nueva toma de datos en la actual localización del equipo. En el Anexo 1, se presenta la nueva versión actualizada.

El objetivo del procedimiento es comprobar que los parámetros de tensión y corriente eléctrica mostrados en la consola se correspondan con los valores eléctricos reales que circulan por el interior del equipo. La tensión en la pantalla de la consola se denomina valor nominal (Vnom) y los valores medidos lectura (L).

**Ilustración 6.12: Consola de mando del MAMMOMAT.**

Empezaremos asegurándonos que el tubo de rayos X del MAMMOMAT está apagado y retiraremos la tapa delantera de la consola de mando. Dentro veremos varias placas electrónicas con el sistema informático del aparato. Cada una de las placas está numerada con un código impreso en la placa. También como en cualquier otra placa informática los pines, leds y otros componentes están numerados, los

elementos donde necesitaremos medir están debidamente señalizados. Para facilitar la ejecución de las medidas se ha revisado el procedimiento *S2C021* [7] y se han añadido esquemas y fotografías que permiten identificar fácilmente los puntos de medida, ya que algunos están en una zona interna donde es difícil acceder para mirar su identificación.

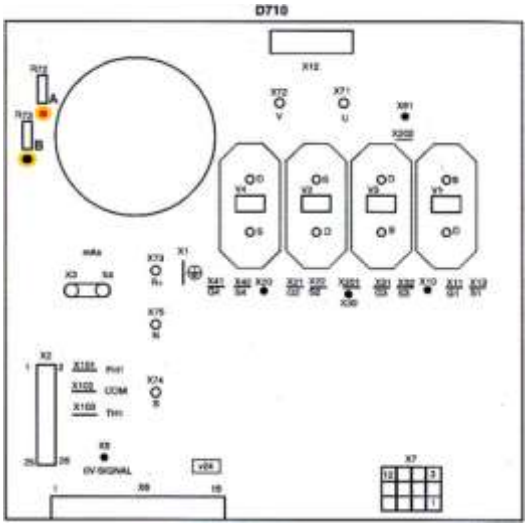
Para medir la tensión debemos conectar el medidor de tensión e intensidad Keithley dentro de las placas electrónicas del equipo. Estudiando el manual técnico del MAMMOMAT 1000 encontramos dos métodos diferentes para comprobar estos parámetros: midiendo en los pines de la placa PCB D705 o bien tomando los datos directamente en la parte inferior de las resistencias R 72 y R73 de la placa D710. A continuación se detallan ambos métodos.

**Ilustración 6.13: Fotografía del interior de la consola de mando del MAMMOMAT. Donde se pueden ver las diferentes placas PCB.**

Para acceder a dichas placas se debe retirar la mampara situada debajo de la consola de mando en la parte frontal. La placa PCB D705 se encuentra situada de perfil y la placa D710 situada en el plano frontal de la caja de la consola, ver ilustración 6.13..

#### 6.2.2.1 Método de la placa PCB D710.

Para medir los parámetros eléctricos mediante este método debemos colocar las pinzas *del generador y medidor de tensión e intensidad Keithley* en la parte inferior de las resistencias R72 y R73 (tierra) en la placa informática D710. Dichos puntos están indicados en las ilustraciones 6.14 y 6.15.




**Ilustracion 6.14: Esquema de la placa PCB D710.**

Los valores de las resistencias vienen dados por el cálculo obtenido gracias al plano del manual técnico del fabricante.

Estas resistencias reducen el voltaje en un factor divisor de ÷10 V (fao). Con una incertidumbre relativa del 1% según datos del fabricante [15].

Se coloca el cable negro del medidor en la parte inferior de la resistencia R73 y el cable rojo en la parte inferior de la resistencia R72.

De la misma forma que en el método anterior colocaremos los cables según este criterio para garantizar que los datos de todos los experimentos que realicemos tendrán los resultados con el mismo criterio de signos.

**Ilustración 6.15: Fotografía de la placa PCB D710. Con las resistencias resaltadas.**

Debemos efectuar disparos a diferentes valores de voltaje e intensidad para realizar la comprobación. Los valores de tensión que introduciremos en la consola del mamógrafo son: 25, 28, 30, 32 y 35 kV. Para cada uno de estos voltajes se realizarán series de 5 medidas a 40mA y a 100mA de intensidad.

Se debe coordinar el disparo del mamógrafo con el momento del registro de la medida (algunos segundos) ya que si esperamos demasiado el pico de voltaje generado por el disparo no aparecerá. Por lo tanto apretaremos ON en el Keithley y seguidamente dispararemos el MAMMOMAT.

A continuación se anotan en la hoja de datos el máximo del pico y 4 lecturas alrededor de éste, siempre que tengan un valor relevante y distinto del ruido basal de fondo. Tomaremos nota de algunas medidas fuera del pulso para conocer el ruido de fondo que tenemos alrededor del pulso

Se ha creado una hoja de Excel para introducir los datos obtenidos, calcular las medias, desviación típica e incertidumbres de las medidas, se puede consultar dicha hoja de cálculo en el Anexo 2. El cálculo de las incertidumbres de las medidas se ha efectuado siguiendo las recomendaciones de la Guía *ISO* para el cálculo de las incertidumbres del manual *Evaluación de la incertidumbre de medida* [16]. De acuerdo al apartado *5.4.6 Estimación de la incertidumbre* de la norma *ISO 17025* [1].

La hoja de cálculo pretende calcular el voltaje de referencia, Vref, y la incertidumbre de referencia expandida del voltaje, $U_{Vref}$, para k=2. Para ello la hoja de cálculo primero ha calculado las incertidumbres para k=1 nombradas como µ.

El método que se ha realizado sigue los pasos explicados a continuación:

La plantilla informática calcula el valor promedio $\bar{L}$ de las n>3 lecturas $L_i$ y la desviación típica de la media, $s_{\bar{L}}$:

$$\bar{L} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} L_i \ [V]$$

(Ec. 6.2).

$$s_{\bar{L}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(L_i - \bar{L})^2}{n(n-1)}}$$

(Ec. 6.3).

Después se calcula la lectura corregida, Lc, como la media de las lecturas, $\bar{L}$, menos la media de los valores del fondo $\bar{L}f$, más la corrección del certificado de calibración del KEITHLEY, $\delta$, efectuado por la empresa SIEMSA:

$$Lc = \bar{L} - \bar{L}f + \delta \ \ [V]$$

(Ec. 6.4).

En este caso la $\delta$ tiene valor nominal cero, sin embargo para calcular la incertidumbre de la lectura corregida, $\mu_{Lc}$, sí se debe tener en cuenta su incertidumbre, $\mu_{SIEMSA}$, además de la desviación de las lecturas, $S_{\bar{L}}$ , la desviación del ruido, $S^2_{\bar{L}f}$, tal y como se indica en la ecuación siguiente:

$$\mu_{Lc} = \sqrt{S^2_{\bar{L}} + S^2_{\bar{L}f} + \mu^2_{SIEMSA}} \ \ [V]$$

(Ec. 6.5).

Donde la incertidumbre relativa de la lectura corregida, $\mu'_{Lc}$, se expresa como:

$$\mu'_{Lc} = \frac{\mu_{Lc}}{Lc}$$

(Ec. 6.6).

La incertidumbre del certificado de calibración $\mu_{SIEMSA}$ se obtiene a partir del valor de su relativa ($\mu'_{SIEMSA} = 0{,}01\%$) tal y como se indica en la ecuación:

$$\mu_{SIEMSA} = \mu'_{SIEMSA} \ \cdot Lc \ [kV]$$

(Ec. 6.7).

Seguidamente se determina el valor de referencia del laboratorio para la tensión como:

$$V_{ref} = f_{ao} \cdot Lc\ [kV]$$

(Ec. 6.8).

Donde $f_{ao}$ es el factor multiplicativo del divisor de tensión determinado a partir de la medida de las resistencias [15] .

$$f_{ao} = \frac{10\ kV}{V} \pm 1{,}1\% \qquad \text{por lo tanto} \qquad \mu'_{f_{ao}} = 1{,}1\%$$

(Ec. 6.9).

Por lo que el cálculo de la incertidumbre relativa $\mu'_{Vref}$ se calcula según la expresión 6.16 como suma cuadrática de las incertidumbres relativas del factor multiplicador, incertidumbre de la lectura y la incertidumbre asociada a la estabilidad del sistema entre calibraciones internas, $\mu_{est}$. Según los controles efectuados en el Laboratorio, $\mu'_{est}$ es igual a 1,2 %.

$$\mu'_{Vref} = \sqrt{\mu'^2_{f_{ao}} + \mu'^2_{Lc} + \mu'^2_{est}}$$

(Ec. 6.10).

$$\mu_{Vref} = \mu'_{Vref} \cdot V_{ref}\ [\text{kV}]$$

(Ec. 6.11).

Como se ha dicho anteriormente $\mu_{Vref}$ corresponde a la incertidumbre para k=1, para calcular la incertidumbre expandida, $\mathrm{U_{Vref}}$ , se debe utilizar la siguiente expresión.

$$\mathrm{U_{Vref}} = k \cdot \mu_{Vref} \qquad (k=2)$$

(Ec. 6.12).

Posteriormente se calcula el factor de corrección $\varepsilon_{r-n}$, como la diferencia entre el valor de referencia y el valor nominal, que es el señalado en la consola.

$$\varepsilon_{r-n} = V_{ref} - V_{nom}\,.$$

(Ec. 6.13).

Si el factor de corrección, $\varepsilon_{r-n}$, es inferior a la incertidumbre $U_{Vref}$ el equipo no necesita una corrección en su medida, ya que su rango está contenido dentro de la incertidumbre de referencia.

Para saber si el equipo se mantiene estable a lo largo del tiempo se calcula el índice de estabilidad del sistema a partir de la diferencia entre los valores iniciales del laboratorio ($V_{ref0}$), determinados en la fase de puesta en marcha del equipo en el 2006 y los datos que se han obtenido durante los experimentos de este proyecto, normalizados por las incertidumbres correspondientes para k=2:

$$I_{est} = \frac{|V_{ref\,0} - V_{ref}\,|}{\left|\sqrt{U^2_{Vref\,0} + U^2_{Vref}}\right|}$$

Se considera que el índice de estabilidad debe tener un valor 0<I≤1

(Ec. 6.14).

Estos datos del año 2006 se realizaron con una intensidad de 40 mA. Por lo que no disponemos de un histórico para las lecturas realizadas a 100 mA. Por lo que para las lecturas a 100 mA en lugar del índice de estabilidad se ha calculado índice de compatibilidad $I_{comp}$ como factor comparativo entre los resultados obtenidos a 40 mA que si disponemos de histórico y 100 mA.

$$I_{comp\,.met\,..} = \frac{|V_{ref\ PCB\ D705} - V_{ref\ PCB\ D710}\,|}{\left|\sqrt{U^2_{Vref\ PCB\ D705} + U^2_{Vref\ PCB\ D710}}\right|}$$

(Ec. 6.15).

### 6.2.2.2 Método de la placa PCB D705.

Para medir los parámetros eléctricos mediantes este método debemos colocar las pinzas *del generador y medidor de tensión e intensidad Keithley* en los pines MAIST X707 para medir amperaje y KVIST X711 para medir la tensión, el pin de la toma de tierra es el OVA X708. Dichos pines están indicados en la ilustración 6.16.

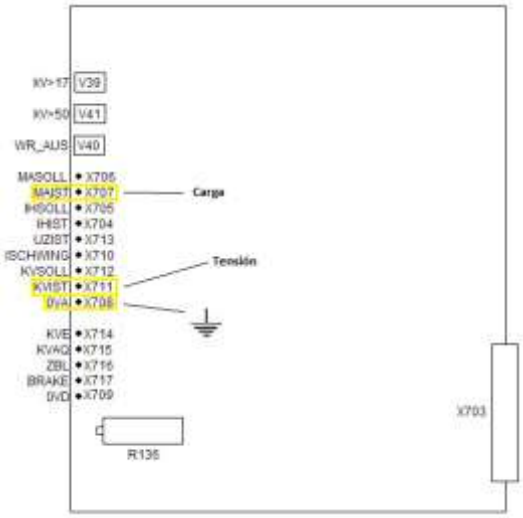



**Ilustración 6.16: Esquema de los pines de la placa PCB D705 [15].**

**Ilustración 6.17: Pines de la placa PCB D705.**

En estos pines tenemos la medida de tensión con un factor de conversión en el pin que corresponde a 5,05 kV/V reales en el tubo de rayos X [15].

Estos pines se sitúan en el lado más exterior de la placa informática, de manera que se tenga un fácil acceso para las pinzas de los aparatos de medición a la hora de hacer este tipo de comprobaciones. Tal y como se muestra en la ilustración 6.17.

El cable negro se conecta al pin de tierra (OVA) y el cable rojo se conecta al pin de la medida que queramos tomar. De esta forma siempre se tendrá los resultados con el mismo criterio de signos a la hora de realizar experimentos posteriores y compararlos con estudios realizados con anterioridad. Garantizando así la repetibilidad de los resultados y posibles confusiones.

Para el cálculo de las medidas por el método de la placa PCB D705 seguiremos aproximadamente los mismos cálculos que para el método de la placa PCB D710. Sin embargo debemos tener en cuenta dos diferencias fundamentales:

El divisor de tensión $f_{ao}$ en vez de ser un divisior de valor 10 kV/V es de 5,05 kV/V. Sin embargo el fabricante no detalla la incertidumbre de este divisor de tensión. Se ha considerado una incertidumbre asociada a la estabilidad del método igual a la del otro procedimiento, porque no se dispone de más información en este momento.

$$f_{ao} = \frac{5{,}05\ kV}{V} \pm 1.1\%$$

(Ec. 6.16).

La otra diferencia es que no se dispone de medidas históricas con este método. Por lo que no disponemos de valores de $V_{ref0}$ y $U_{Vref0}$ para calcular el índice de estabilidad. Por lo que en vez de comparar los resultados de este método con un histórico, calcularemos un índice de compatibilidad $I_{comp}$ como factor comparativo entre el método de la placa PCB D705 y el método de la placa PCB D710.

$$Icomp = \frac{\left|V_{ref\ D710} - V_{ref\ D705}\right|}{\left|\sqrt{U^2_{Vref\ D710} + U^2_{Vref\ D705}}\right|}$$

(Ec. 6.17).

El parámetro $I_{comp}$ permite valorar la consistencia entre ambos métodos, el de la placa PCB D705 y el de la placa PCB D710.

### 6.2.3 Medidas dosimétricas.

Después de realizar las comprobaciones eléctricas y verificar que los resultados del voltaje del tubo de rayos X cumple los requisitos de la norma IEC 61267[2], el voltaje cumple con la norma si el resultado está dentro de un rango de ±1,5 kV del voltaje nominal de la consola, para realizar las medidas dosimétricas se utiliza el mamógrafo.

Antes de empezar a realizar medidas con el mamógrafo se debe completar la caracterización de los haces, determinando la capa de hemirreducción y también los valores de kerma en aire a distancias conocidas del foco de rayos X para las calidades RQR-M. Estas medidas se llevan a cabo con el equipo patrón PTW.

#### 6.2.3.1 Medidas preliminares de la cámara de ionización PTW.

Primero se enciende el electrómetro UNIDOS y se espera a que haga las comprobaciones automáticas de inicio. Posteriormente se hace una puesta a cero automática pulsando la tecla NULL.

Después de la puesta a cero automática se hacen tres medidas del fondo, en unidades de carga, durante 250 s, anotando las lecturas del electrómetro en la hoja de datos. Además de la lectura del electrómetro se debe anotar: la presión atmosférica, la temperatura ambiente y la humedad en cada lectura. Estos datos ambientales se necesitan para poder calcular el factor de corrección por la densidad del aire.

A continuación se coloca la fuente de verificación de C-14 justo sobre la cámara, de manera horizontal, haciendo coincidir la muesca esférica del chasis de la cámara con el contorno de la fuente y manteniendo en paralelo las letras rojas. Se realizan cinco medidas de 250 s cada una, de la misma forma que en las medidas de fondo del párrafo anterior. Finalmente se efectúa 1 o 2 medidas de fondo adicionales.

Las lecturas de la cámara, se corrigen por la señal de fondo y por las condiciones ambientales y se comparan con los valores de referencia del equipo indicados en el certificado de calibración externo del equipo PTW realizado por el PTB *[10]*. Estas

medidas preliminares deben efectuarse sistemáticamente antes de efectuar medidas cuantitativas con la cámara PTW.

La lectura de la cámara se debe corregir, multiplicándola por el factor de corrección de la densidad del aire, ya que según la presión y temperatura ambientales la medida puede variar.

Para calcular el factor de corrección del aire $f_{P,Ta}$ se utiliza la siguiente fórmula:

$$f_{P,T^a} = \frac{P_{ref}\ (mbar)}{P_{amb}\ \ (mbar)} \cdot \frac{273{,}15 + T^{\underline{a}}{}_{amb}\ (^{\underline{o}}C)}{T^{\underline{a}}{}_{ref}\ (^{\underline{o}}K)}$$

*Presión ambiente de referencia:* $P_{ref} = 1013{,}25\ mbar$

*Presión ambiente durante el ensayo:* $P_{amb}\ \ (mbar)$

*Temperatura ambiente de referencia:* $T^{\underline{a}}{}_{ref} = 293{,}15\ ^{\underline{o}}K$

*Temperatura ambiente durante el ensayo:* $T^{\underline{a}}{}_{amb}\ (^{\underline{o}}C)$

(Ec. 6.18).

Con los datos obtenidos se puede calcular la media y desviación típica de cada grupo de medidas y fondos, normalizadas por el tiempo de irradiación. Utilizaremos la fórmula siguiente:

$$\bar{L} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\frac{Li - \dot{F}}{ti}\right) \cdot f_{P,T^a}\right]$$

*Número de mediciones: n (*$n \geq 3$*).*

*Lectura del electrómetro: Li (pC).*

*Tiempo de registro: ti (250s).*

*Media de las lecturas del fondo:* $\dot{F}$*(pC).*

*Factor de corrección del aire:* $f_{P,T^a}$.

(Ec. 6.19).

Por último se debe comparar el resultado obtenido de las lecturas en el laboratorio con el dato del certificado de calibración. Haciendo el cociente de ambos obtenemos la diferencia relativa entre ellos, $\varepsilon$ (%).

$$\varepsilon\ (\%) = \left\| 1 - \frac{^{14}C_{lec}}{^{14}C_{cal}} \right\| \cdot 100$$

*Lectura de la fuente de $^{14}C$ obtenida de las lecturas: $^{14}C_{lec}$ (pA).*

*Lectura de la fuente de $^{14}C$ del certificado de calibración: $^{14}C_{cal}$ (pA).*

(Ec. 6.20).

Debe comprobarse que el sistema se mantiene estable dentro de ± 2%. Se ha intentado exigir una estabilidad del 1% pero no se ha conseguido.

En el Anexo 4 se muestra un resumen de los resultados de los controles realizados durante un mes.

#### 6.2.3.2 Cálculo de la capa de hemirreducción.

De acuerdo con la norma IEC 61267[2], el valor de de la capa de hemirreducción medido en el Laboratorio debe permanecer en un rango del ± 0,02 mm de aluminio respecto a los valores nominales de la tabla 5.1.

Para el montaje se necesita colocar la cámara patrón en la bandeja del mamógrafo a una distancia máxima del foco de 610mm de manera que esté completamente dentro del haz de rayos X.

Para los pasos en los que hay que añadir las planchas de aluminio se deben colocar lo más próximo posible de la salida del tubo. Para ello se dispone de un utillaje para colocar las planchas a la salida del tubo, ver ilustración 6.18.

**Ilustración 6.18: Utillaje para la colocación de las planchas de aluminio a la salida del tubo de rayos X.**

**Ilustración 6.19: Planchas de aluminio de 0.1 mm de grosor certificado.**

Dichas planchas de aluminio planchas tienen un grosor de 0,1mm ± 1% cada una. Las planchas están numeradas, por lo que siempre se irán colocando en el mismo orden ascendente, empezando por la primera.

Para realizar las medidas se utiliza el electrómetro PTW UNIDOS T10001 nº11508 y la cámara de ionización PTW TM77334 nº 2295 descritos en el apartado *6.1.3.1 Equipos patrón para la medida del kerma en aire*. El intervalo de tiempo entre cada toma debe ser de al menos quince segundos y la intensidad será de 200 mA de forma común a cada uno de los voltajes.

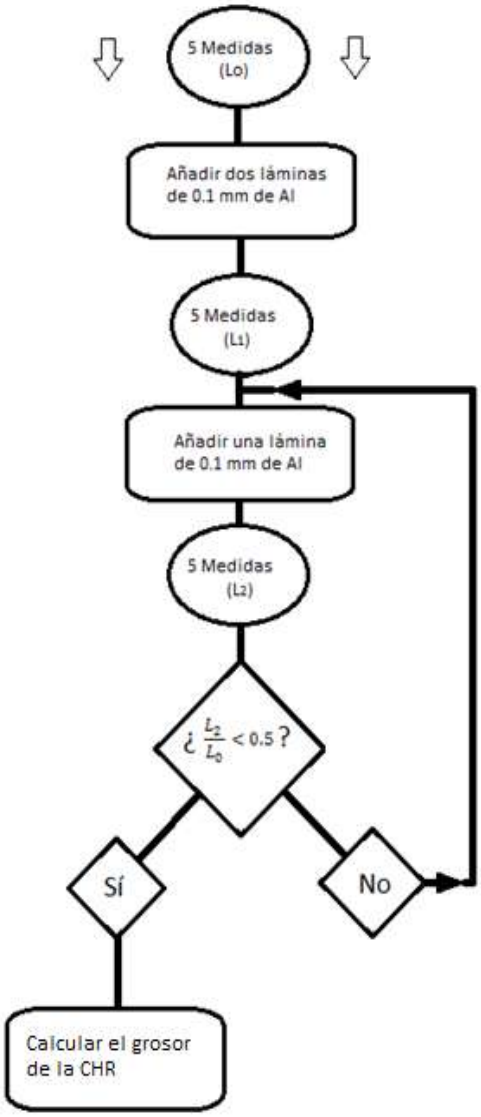



**Ilustración 6.20: Esquema del procedimiento RQR-M**

Para calcular la primera capa de hemirreducción se deben realizar los siguientes pasos, ver ilustración 6.20:

Primero se realizan cinco tomas de datos sin añadir láminas de aluminio y se anotan en la hoja de datos, obteniendo la carga eléctrica en pC detectada por la cámara. Considerando la media de estas lecturas como la lectura inicial $L_0$.

A la hora de hacer los cálculos en la tabla de Excel, al final de cada serie se realizaran otras cinco medidas sin añadir láminas de aluminio y se recalculará $L_0$ como la media de las cinco lecturas antes de empezar la serie y las cinco lecturas del final

El siguiente paso es colocar un primer filtro de 2 láminas de aluminio de 0.1 mm y se toman de nuevo cinco medidas. Su media se nombra como L1.

A continuación se debe realizar otras cinco medidas añadiendo una lámina de aluminio extra de 0.1 mm, su medida se nombra Li.

Se debe repetir este último punto añadiendo láminas de 0.1 mm de aluminio hasta que el valor del cociente entre Li y L0 sea menor que 0,5.

$$\frac{L_i}{L_0} < 0{,}5$$

(Ec. 6.21).

Para el cálculo de la segunda capa de hemirreducción se debe seguir el mismo procedimiento pero añadiendo láminas de aluminio de 0,1mm hasta que el cociente entre Li y L0 sea menor que 0,25.

$$\frac{L_i}{L_0} < 0{,}25$$

(Ec. 6.22).

Para realizar los cálculos se ha diseñado una hoja de datos en Excel que se puede consultar en el Anexo 5. Se introducen los datos de cada serie de 5 lecturas y la hoja de datos calcula la media $\bar{L}$ y la desviación típica $s_L$.

$$\bar{L} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} L_i$$

(Ec. 6.23).

$$s_{\bar{L}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(L_i - \bar{L})^2}{n-1}}$$

(Ec. 6.24).

Una vez se dispone de los datos del laboratorio calculados se deben comparar con los valores teóricos tabulados de la norma (tabla 5.1). Con los tres valores obtenidos más próximos al grosor de los valores teóricos se realiza a una regresión logarítmica.

$$\mathrm{Li} = A \cdot e^{-B\,X_{Al}} \qquad x_{Al} = -\frac{\ln\left(\frac{\mathrm{Li}}{\mathrm{A}}\right)}{B} \qquad x_{1^{\mathrm{a}}CHR} = -\frac{\ln\left(\frac{\mathrm{L0/2}}{\mathrm{A}}\right)}{B}$$

(Ec. 6.25).

Para obtener gráficamente el valor del grosor de la CHR debe cruzarse la línea que marca la mitad del valor de la carga eléctrica inicial (Lo / 2) con la regresión logarítmica del grosor de la capa de aluminio.

Se ha obtenido la ecuación de la regresión logarítmica de las tres lecturas cercanas al valor teórico de la CHR y se ha calculado su valor para el kerma en aire igual a la mitad del kerma en aire $L_0$.

A modo comparativo se han calculado valores con un segundo método, descrito más adelante, que utiliza solo los dos puntos más cercanos al valor teórico de la CHR para conocer qué resultado se ajusta mejor al valor teórico. Ya que en ocasiones el tercer punto, del método anterior, se encuentra demasiado alejado del valor teórico y desvirtúa la regresión.

Este segundo método de cálculo de las CHR utiliza la siguiente fórmula a partir de los dos puntos más cercanos al valor teórico de las CHR:

$$1^{a}\ CHR = \frac{[z_b \cdot ln(\frac{2L_a}{L_0})] - [z_a \cdot ln(\frac{2L_b}{L_0})]}{ln(\frac{L_a}{L_b})}$$

$L_0$ es el promedio de las lecturas sin filtro de Al

$L_a$ es la lectura justo superior a la mitad de $L_0$

$L_b$ es la lectura justo inferior a la mitad de $L_0$

$z_a$ es el grosor de la lámina de Al en la lectura $L_a$

$z_b$ es el grosor de la lámina de Al en la lectura $L_b$

(Ec. 6.26).

Según el procedimiento para calcular las CHR [8] las incertidumbres de los cálculos de las CHR son los siguientes:

| Incertidumbres: | (mm) |
|---|---|
| Micrómetro. | 0,001 |
| Asociada a la lámina de Al. | 0,009 |
| Cálculo de la CHR (k=1). | 0,008 |
| Incertidumbre expandida U (k=2). | 0,016 |

**Tabla 6.3: Incertidumbres relacionadas con el cálculo de las CHR.**

Para calcular la segunda capa de hemirreducción se debe seguir el mismo procedimiento que para la primera capa pero en vez de calcular el grosor para que la dosis obtenida en el detector al colocar los filtros de aluminio sea la mitad de la dosis obtenida, se debe calcular para la mitad de la mitad (1/4) de esa dosis inicial sin filtros. El error máximo tolerable en el cálculo de la capa CHR es de ± 0.02 mm de aluminio segiun el apartado 11.4 RQR-M de la Norma IEC 61267[2].

Con los resultados de la primera y segunda capa de hemirreducción se calcula el coeficiente de homogeneidad (h) como el cociente del grosor de la 1ª CHR entre el grosor de la 2ª CHR.

$$h = \frac{1^{\underline{a}}\ CHR}{2^{\underline{a}}\ CHR}$$

(Ec. 6.27).

#### 6.2.3.3 Determinación del $k_{aire}$ de referencia para las calidades RQR-M

El valor del kerma de referencia se determina situando la cámara patrón a una distancia conocida del foco. Para este proyecto se ha utilizado una distancia de 45 cm del foco.

El equipo patrón se conecta y posiciona de manera similar a las medidas sin filtro descritas en el apartado anterior. Se efectúan una serie de tres lecturas de radiación de fondo y seguidamente series de 5 medidas para cada calidad RQR-M. El tiempo de irradiación se selecciona entre 60 s y 250 s. Se selecciona un valor de intensidad de 100 mA.

El valor del kerma en aire de referencia se determina a partir de la expresión siguiente:

$$K_{aire} = k_Q \cdot \frac{k_p}{k_m} \cdot N_k \cdot M$$

M: Media de la lectura corregida del electrómetro [C]

$N_k$ Factor de calibración [Gy/C].

$k_Q$: corrección de calidad del haz.

kp: lectura de control con la fuente de 14C durante la calibración externa.

km: lectura de control con la fuente de $C_{14}$ en la medición.

$\frac{k_p}{k_m}$ se considerará igual a 1, si la lectura con la fuente se mantiene dentro del 2% que es la tolerancia que se ha considerado para la estabilidad del equipo.

(Ec. 6.28).

Los valores de los factores $N_k$ $k_Q$ y kp se encuentran en el último certificado de calibración del equipo PTW [11], trazable al PTB. Se han utilizado los datos del 2006 *[10]* porque en ese momento aún no se disponía de los datos del 2012 *[10]*:

La incertidumbre relativa para k=2 del Laboratorio $U'_{Kaire}$ es igual a 5,5 % (Tabla 6.4).

| Incertidumbres: | (%) |
|---|---|
| Factor de calibración $N_k$ $k_Q$ | 2,5 |
| Lectura | 0,1 |
| Estabilidad | 1,15 |
| Cálculo de Kaire patrón (k=1). | 2,76 |
| Incertidumbre expandida U' (k=2). | 5,5 |

**Tabla 6.4: Incertidumbres relacionadas con la medida del kerma en aire de referencia.**

### 6.2.4 Calibración de un medidor de control de calidad en mamografía.

Como primera verificación del funcionamiento del Laboratorio se llevará a cabo la calibración del equipo RTI ELECTRONICS PMX III W conectado a una Sonda MX. Este tipo de equipos son los que se calibrarán en el laboratorio de calibración de mamografía una vez esté renovada su acreditación. Entre los parámetros que pueden medirse con este equipo en el Laboratorio se llevará a cabo la calibración de la tensión y del kerma en aire. El equipo es un modelo antiguo y mide exposición, pero se determinará el kerma según se explica en el glosario de definiciones de exposición.

Antes de comenzar a disparar el mamógrafo se deben hacer unas comprobaciones previas, anotadas en la hoja de control de datos:

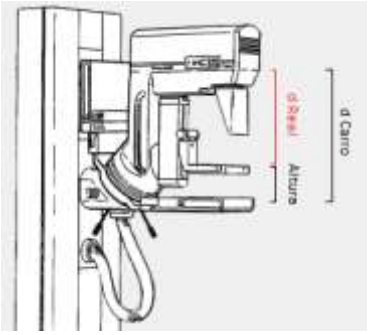



**Ilustración 6.21: Distancia al foco** *[14]* **.**

Controlar que el ambiente se mantenga a una temperatura, humedad y presión atmosférica en los rangos de uso del MAMMOMAT. Se apunta en la hoja de medida la posición del punto de referencia del equipo a calibrar.

Los detectores y cámaras de los equipos de medición se deben colocar en el centro del haz de los rayos X a una distancia comprendida entre los 45 y 65 cm. El mamógrafo dispone de una indicación digital de la distancia relativa en la que se ha situado el equipo, cuando el detector esta a distancia máxima del foco (65 cm) esa indicación es de 153 cm (*d carro*).

La distancia real se calcula restando la distancia máxima del carro (153 cm) con la distancia indicada en la consola.

$$d_{real} = 153\ cm - d_{consola}$$

(Ec. 6.29).

6.2.4.1 Medidas de tensión.

Se realiza una serie de dos medidas de tensión con el equipo PMX para cada calidad RQR-M (modo de trabajo multímetro, centrando el haz en la cara anterior del equipo señalada como “MAM”). Dichas medidas se comparan con el valor de referencia de tensión del Laboratorio determinado según se ha descrito en el apartado 6.2.3.

A continuación se determina la corrección del equipo $\varepsilon_c$ como el valor absoluto de la diferencia entre el valor de referencia $V_{ref}$ y el valor del equipo problema $V_{PMX}$ calculado a partir de las lecturas.

$$\varepsilon_c = |V_{Ref} - V_{PMX}|$$

(Ec. 6.30).

6.2.4.2 Medidas del kerma en aire.

Se realiza una serie de dos medidas con el equipo PMX en modo dosis para cada calidad RQR-M. Se centra la sonda MX respecto al haz y a la misma posición en la que se ha situado la cámara patrón (apartado 5.2.3.3). Las medidas se llevan a cabo para un tiempo de integración de 250 s y a una carga de trabajo de 100 mAs. Se anotan los resultados obtenidos en la hoja de datos. Para cada medida se debe anotar la temperatura y presión ambiente, aunque únicamente la cámara patrón requiere corrección por presión y temperatura.

A continuación se determina el coeficiente de calibración del equipo $N_k$ como cociente del valor del kerma en aire del equipo patrón PTW y el valor de kerma en aire del equipo problema PMX.

$$N_k = \frac{K_{a\ patron\ \ PTW}}{K_{a\ problema\ \ PMX}}$$

(Ec. 6.31).

# 7 RESULTADOS.

A continuación se comenta cada uno de los resultados recopilados de los experimentos y ordenados para cada apartado.

## 7.1 RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DE TENSIÓN.

Para cumplir con la norma el voltaje obtenido en las lecturas debe estar dentro del rango ±1,5 kV el valor de $V_{nom}$. Como se puede ver en las tablas 7.1 y 7.2 la diferencia entre el voltaje nominal y el voltaje de referencia, $\varepsilon_{r-n}$, es inferior a 1,5 kV que indica la norma en todos los casos. Tanto para el método de la placa PCB D710 como D705.

También se observa en ambas tablas 7.1 y 7.2 que la diferencia entre el $V_{nom}$ y $V_{Ref}$, $\varepsilon_{r-n}$, se encuentra por debajo del rango que marca la incertidumbre de referencia, $U_{VRef}$. Este hecho indica que no se necesita de una corrección del equipo.

| MÉTODO DE LA PLACA PCB D710 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Valores nominales | | Voltaje de referencia | Diferencia Vnom - Vref | Incertidumbre |
| V nom. (kV) | I (mAs) | Vref (kV) | εr-n | U VRef |
| 25 | 40 | 24,8 | 0,2 | 0,81 |
| 28 | 40 | 27,8 | 0,2 | 0,91 |
| 30 | 40 | 29,8 | 0,2 | 0,97 |
| 32 | 40 | 31,9 | 0,1 | 1,04 |
| 35 | 40 | 34,9 | 0,1 | 1,13 |
| | | | | |
| 25 | 100 | 24,8 | 0,2 | 0,81 |
| 28 | 100 | 27,8 | 0,2 | 0,91 |
| 30 | 100 | 29,8 | 0,2 | 0,97 |
| 32 | 100 | 31,9 | 0,1 | 1,04 |
| 35 | 100 | 34,9 | 0,1 | 1,14 |

**7.1: Voltajes de referencia e incertidumbres del método de la placa PCB D710.**

También se observa que la incertidumbre de referencia, $U_{VRef}$, es menor que la tolerancia de ±1,5 kV del voltaje nominal establecido por la norma.

| MÉTODO DE LA PLACA PCB D705 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Valores nominales | | Voltaje de referencia | Diferencia | Incertidumbre |
| V nom. (kV) | I (mAs) | Vref (kV) | εr-n | U VRef |
| 25 | 40 | 25,2 | 0,2 | 0,83 |
| 28 | 40 | 28,2 | 0,2 | 0,93 |
| 30 | 40 | 30,2 | 0,2 | 0,99 |
| 32 | 40 | 32,2 | 0,2 | 1,06 |
| 35 | 40 | 35,2 | 0,2 | 1,16 |
| | | | | |
| 25 | 100 | 25,2 | 0,2 | 0,83 |
| 28 | 100 | 28,2 | 0,2 | 0,93 |
| 30 | 100 | 30,2 | 0,2 | 0,99 |
| 32 | 100 | 32,2 | 0,2 | 1,06 |
| 35 | 100 | 35,6 | 0,6 | 1,16 |

**Tabla 7.2: Voltajes de referencia e incertidumbres del método de la placa PCB D705.**

También se ha comparado los resultados el método de la placa PCB D710 (I = 40mA) con los datos del histórico del año 2006. De este modo se puede controlar la estabilidad del sistema a lo largo del tiempo.

| MÉTODO DE LA PLACA PCB D710 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Valores nominales | | Voltaje de referencia | V histórico | Índice de estabilidad |
| V nom. (kV) | I (mAs) | Vref (kV) | Vref0 (kV) | I |
| 25 | 40 | 24,8 | 25,5 | 0,6824 |
| 28 | 40 | 27,8 | 28,5 | 0,6061 |
| 30 | 40 | 29,8 | 30,5 | 0,5570 |
| 32 | 40 | 31,9 | 32,6 | 0,5511 |
| 35 | 40 | 34,9 | 35,6 | 0,5208 |

**Tabla 7.3: Índices de estabilidad entre las medidas actuales y el histórico, por el método PCB D710.**

El índice de estabilidad en todos los casos es menor que uno. Indicando que las medidas del equipo se han mantenido estables desde el año 2006.

Para comprobar que ambos métodos, el de la placa D710 y D705 son compatibles entre sí se han calculado varios índices de compatibilidad. Primero el índice de compatibilidad entre el PCB D710 a 40mA y 100mA, el segundo entre los dos métodos con I=40mAs y el tercero entre los dos métodos con I=100mAs.

| | Índices de compatibilidad entre | | |
|---|---|---|---|
| Voltaje nominal<br>V nom. (kV) | PCB D710 40 mAs<br>PCB D710 100mAs | PCB D710 40 mAs<br>PCB D705 40 mAs | PCB D710 100 mAs<br>PCB D705 100 mAs |
| 25 | 0,0210 | 0,1192 | 0,1160 |
| 28 | 0,0031 | 0,1145 | 0,1138 |
| 30 | 0,0189 | 0,1071 | 0,1103 |
| 32 | 0,0273 | 0,1028 | 0,1010 |
| 35 | 0,0187 | 0,1016 | 0,0964 |

**Tabla 7.4: Índices de compatibilidad entre los métodos PCB D710 y D705.**

En todos los casos los índices de estabilidad son menores que uno, por lo que ambos métodos son compatibles entre sí. También se deduce con esta comparación que las lecturas no se ven afectadas por la intensidad de corriente del tubo.

Para la medición de los parámetros eléctricos ambos métodos propuestos son válidos, a priori al compararlos se observa que el método de la placa PCB D705 es el más recomendado: Ofrece un índice de estabilidad más ajustado y además a la hora de conectar el medidor de tensión los pines de la placa D705 están en un lugar más accesible y cómodo que las resistencias de la placa D710 y no es necesario utilizar pinzas pequeñas para realizar la conexión.

Sin embargo, como se ha comentado durante su descripción, el método de la placa D705 tiene el inconveniente que no se conoce la incertidumbre $\mu_{fao}$.

Así pues se propone utilizar el método D705 para medidas rutinarias, con periodicidad semestral, y cada dos años realizar comprobaciones de su validez con el método D710.

## 7.2 RESULTADOS DE LAS MEDIDAS PRELIMINARES DE LA CÁM. DE IONIZ. PTW.

Los resultados de kerma en aire obtenidos durante los ensayos en el laboratorio con la fuente de radiación PTW son los presentados en la tabla 7.5. Las medidas se comparan con los valores de referencia que figuran en el certificado de calibración del PTB del año 2012 *[10]*.

El primer día de ensayo los resultados no fueron los esperados, el error que aparece está por encima del exigido. Inicialmente se consideró la opción de una mala colocación de la cámara o a un error en el cable de conexión. Se decidió cambiar el cable para las tomas de datos posteriores.

Al día siguiente con el cable cambiado los resultados mejoraron, sin embargo aún se encontraban ligeramente por encima del resultado exigido. Se decidió cambiar el soporte donde reposa la cámara por una superficie horizontal de poliestireno expandido para reducir el efecto de reflexión.

| Resultados de la calibración del detector de dosis PTW | | |
|---|---|---|
| Fecha | Valor (pA) | ε (%) |
| 3 de julio 2012 | 0,4028 | 2,84 |
| 3 de julio 2012 | 0,4052 | 2,27 |
| 4 de julio 2012 | 0,4104 | 1,01 |
| 4 de julio 2012 | 0,4085 | 1,47 |
| 6 de julio 2012 | 0,4137 | 0,22 |
| 6 de julio 2012 | 0,4111 | 0,84 |
| 9 de julio 2012 | 0,4115 | 0,74 |
| 10 de julio 2012 | 0,4118 | 0,67 |
| 10 de julio 2012 | 0,4089 | 1,38 |
| 10 de julio 2012 | 0,4123 | 0,55 |
| 11 de julio 2012 | 0,4087 | 1,43 |
| 11 de julio 2012 | 0,4102 | 1,07 |
| 11 de julio 2012 | 0,4093 | 1,27 |
| 11 de julio 2012 | 0,4122 | 0,57 |
| 11 de julio 2012 | 0,4084 | 1,50 |
| 11 de julio 2012 | 0,4080 | 1,59 |
| 12 de julio 2012 | 0,4114 | 0,77 |
| 12 de julio 2012 | 0,4068 | 1,89 |
| 12 de julio 2012 | 0,4068 | 1,88 |

Notas:
Valor certificado de calibración 0,4146 pA.
Los dias 11 y 12 de julio se siguieron métodos distintos, ver hojas correspondientes.

**Tabla 7.5: Resultados obtenidos con la cámara de ionizacion PTW del kerma en aire irradiado por la fuente PTW.**

Con el nuevo montaje, rectificando el cableado y el soporte de la cámara, a partir del segundo día los resultados fueron siempre menores al 2%.

Concretamente los días 6 y 9 la desviación relativa es menor del 1%. Este resultado sería el ideal. Durante los días 6, 9 y 10 se realizó una puesta a cero antes de las series de 5 lecturas. Los días 11 y 12 se realizó una puesta a cero antes de cada lectura, pero los resultados no fueron tan buenos como los tres días anteriores. Por lo que realizando una única puesta a cero para cada serie de cinco lecturas da un mejor

resultado. En base a estos resultados, se acuerda considerar una tolerancia máxima del 2%, en la variación de la lectura de la fuente PTW, e incluir una incertidumbre debido a la falta de estabilidad de 1,15%, en el cálculo del valor de referencia del kerma en aire (Tabla 6.4).

## 7.3 RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DEL KERMA DE REFERENCIA PARA LA CALIDAD RQR-M.

Con las medidas de kerma en aire de los disparos del mamógrafo filtrado únicamente con su filtro interno de 30 µm de Mo se han obtenido los siguientes datos de kerma en aire de referencia para las calidades RQR-M y un valor de la carga a 100 mA y a una distancia de 45 cm. De acuerdo con los datos del certificado de calibración del 2006 [11] y la tabla 6.4 la incertidumbre relativa del kerma en aire es de 5,5 % (k=2).

| Tensión nominal [kV[ | Kerma en aire [Gy] |
|---|---|
| 25 | 0,01553 |
| | 0,01557 |
| 28 | 0,02216 |
| | 0,02218 |
| 30 | 0,02711 |
| | 0,02730 |
| 35 | 0,04111 |
| | 0,04113 |

**Tabla 7.6: Kerma en aire obtenido para la calidad RQR-M.**

Los datos obtenidos en la tabla 7.6 son los valores de kerma en aire que se utilizan para calcular las CHR. Debemos calcular con que grosor de aluminio obtenemos un kerma en aire mitad al valor de referencia para la 1ª CHR y un cuarto para la 2ª CHR.

## 7.4 RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LAS CHR.

Siguiendo los métodos descritos en el apartado de cálculo de las CHR. se ha obtenido una serie de lecturas para cada tensión requerida por la norma aumentando el grosor del filtro de aluminio. En el siguiente gráfico se puede observar el valor de las medias de las lecturas para cada grosor de filtro en cada tensión.

A continuación se ha obtenido la tabla 7.5 con los valores de la primera y segunda CHR de las lecturas obtenidas, siguiendo dos métodos a modo de comparación entre ellos.

| | | | Grosor teórico. | Método de la regresión log. de los tres puntos más cercanos al grosor teórico. | | | Método de la fórmula con los dos puntos más cercanos a al grosor teórico. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| V [kV] | Dosis 1ªCHR [pC] | Dosis 2ªCHR [pC] | 1ª CHR [mm Al] | 1ª CHR [mm Al] | 2ª CHR [mm Al] | ε de 1ªCHR respecto al teórico [mm] | 1ª CHR [mm Al] | 2ª CHR [mm Al] | ε de 1ªCHR respecto al teórico [mm] |
| 25 | 340,3 | 170,1 | 0,28 | 0,30 | 0,69 | 0.02 | 0,30 | 0,69 | 0.02 |
| 28 | 485,5 | 242,8 | 0,31 | 0,34 | 0,77 | 0.03 | 0,33 | 0,76 | 0.02 |
| 30 | 594,1 | 297,0 | 0,33 | 0,36 | 0,81 | 0.03 | 0,36 | 0,81 | 0.03 |
| 35 | 909,9 | 454,9 | 0,36 | 0,39 | 0,888 | 0.03 | 0,39 | 0,88 | 0.03 |

**Tabla 7.7: Grosores obtenidos de las CHR para cada método realizado.**

Según los resultados obtenidos en la tabla 7.7 el método que más se ajusta al valor teórico es el segundo, que utiliza la ecuación con dos puntos. En la página siguiente se analizan los resultados de cada método por separado.

Para el primer método se ha calculado los grosores de las CHR utilizando la ecuación de regresión logarítmica de los tres puntos más cercanos al valor teórico de la CHR, ver gráfico 7.1 y 7.2.

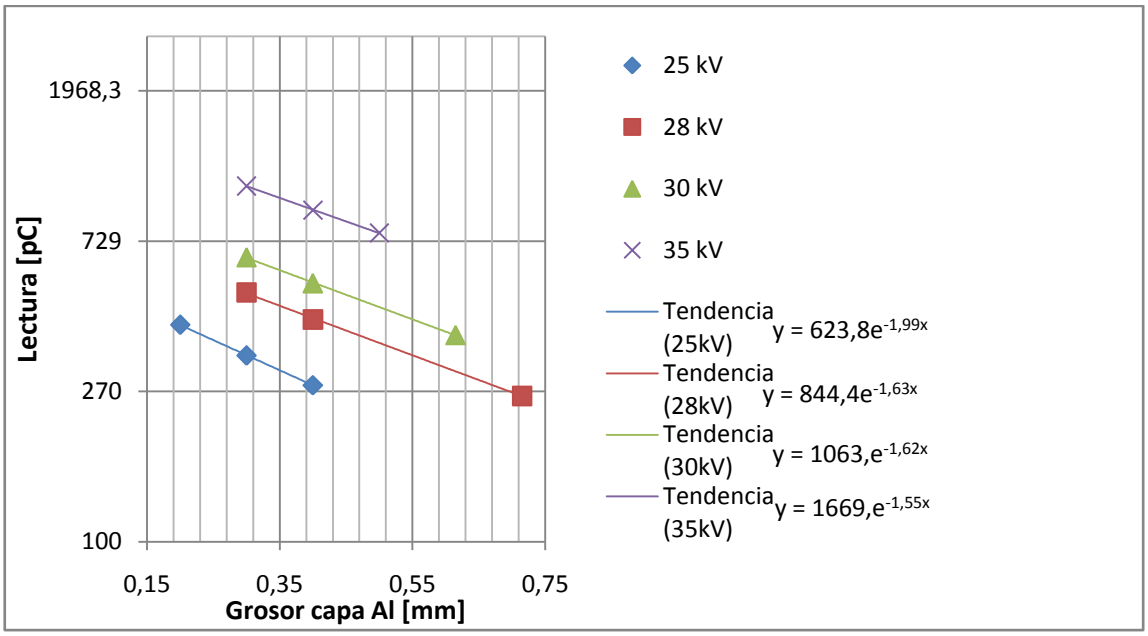



**Gráfico 7.1: Lecturas obtenidas para cada voltaje y grosores cercanos al valor de la 1ª CHR de Al.**

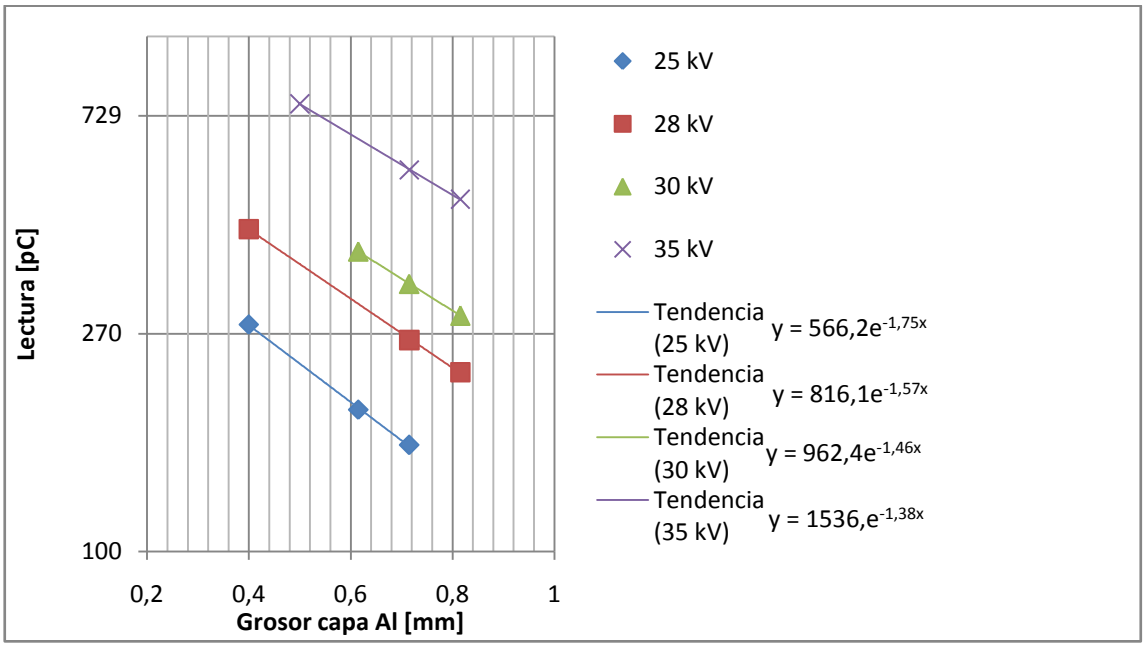



**Gráfico 7.2: Lecturas obtenidas para cada voltaje y grosores cercanos al valor de la 2ª CHR de Al.**

El problema de este método es que si el tercer punto se encuentra muy alejado de los otros dos la regresión que se utiliza para el cálculo puede desvirtuar el resultado, como se observa en el gráfico 7.1 para la 1ª CHR para 28 kV y en el gráfico 7.2 para la 2ª CHR de 25, 28 y 35 kV.

En el segundo método se ha utilizado la fórmula que calcula el valor de la CHR según una aproximación logarítmica de los dos puntos más cercanos.

$$1^{a}\ CHR = \frac{[z_b \cdot \ln(\frac{2L_a}{L_0})] - [z_a \cdot \ln(\frac{2L_b}{L_0})]}{\ln(\frac{L_a}{L_b})}$$

(Ec. 7.1)

Este segundo método es el que mejor se ajusta a los resultados teóricos tal y como se indica en la tabla 7.7. Además es más sencillo de calcular utilizando la fórmula que mediante regresión lineal y más fácil de aplicar en una hoja de cálculo informática.

En el gráfico 7.3 se puede observar los rangos de tolerancia de la norma y los resultados obtenidos para el grosor de la 1ª CHR utilizando el método de regresión por tres puntos y análogamente en el gráfico 7.4 los resultados del método por aproximación por dos puntos, ambos con su rango de incertidumbre global para un factor de cobertura k=2.

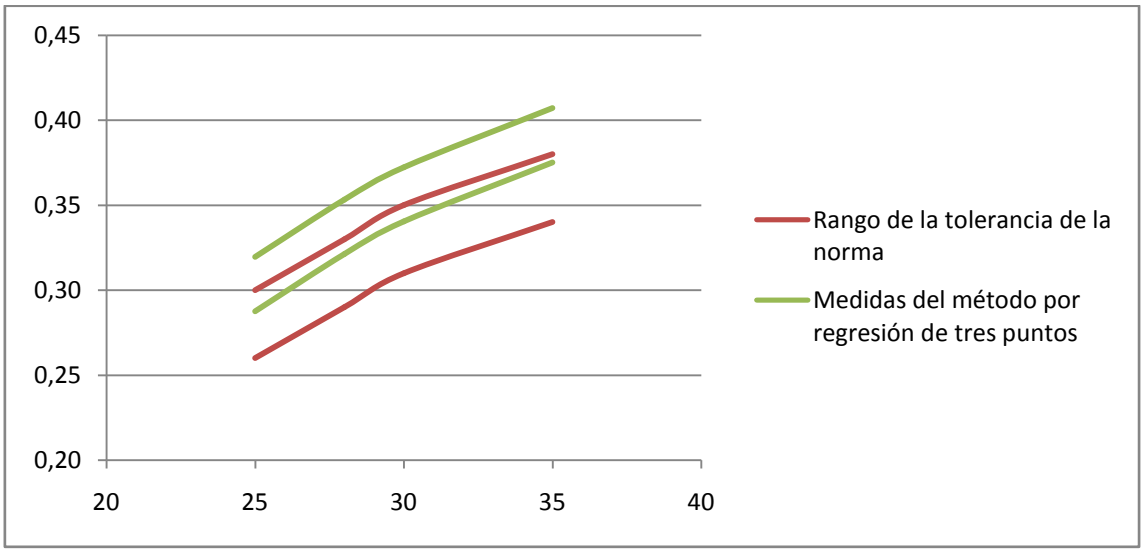



**Gráfico 7.3: Tolerancia en el valor de la CHR de la norma vs el rango de medida del valor (para k=2) obtenido mediante el método de regresión de tres puntos.**

En el gráfico 7.3 se observa claramente que el resultado del método por regresión de tres puntos comparte cierto rango con la tolerancia de la norma.

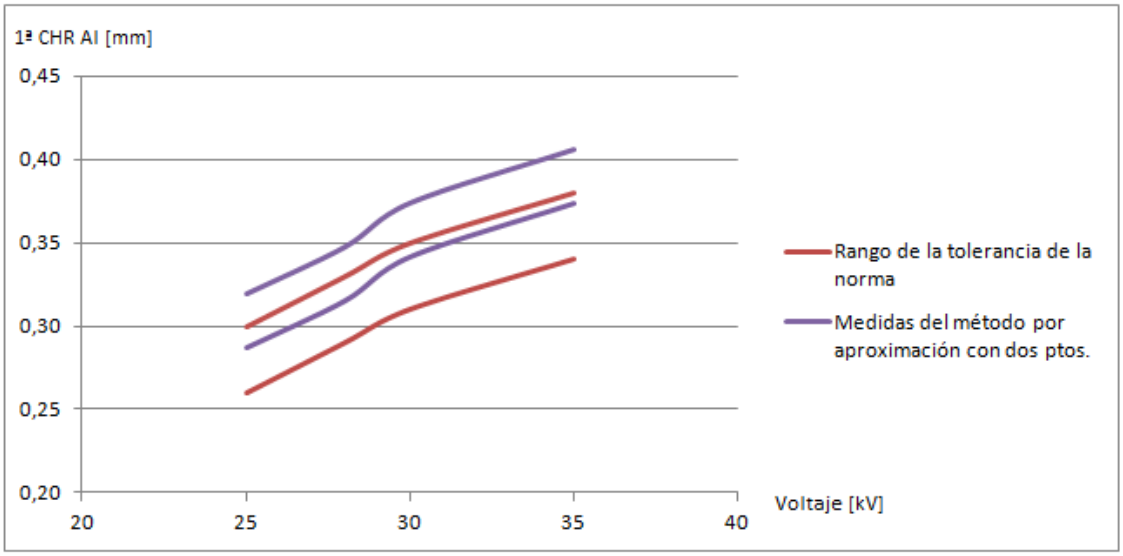



**Gráfico 7.4: Tolerancia en el valor de la CHR de la norma vs el rango de medida del valor (para k=2) obtenido mediante el método de aproximación por dos puntos.**

En el gráfico 7.4 Se puede apreciar que los resultados obtenidos por el método por aproximación con dos puntos si tienen rango en común con la tolerancia exigida por la norma.

Las calidades de 30 kV y 35 kV quedan ligeramente (0,01 mm) fuera de tolerancias, por lo que se recomienda una nueva toma de datos para asegurar la fiabilidad de los datos del cálculo de las CHR respecto a la norma. Sin embargo esta diferencia no será importante en la práctica para la calibración de equipos de control de calidad en diagnóstico.

## 7.5 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE UN MEDIDOR DE CONTROL DE CALIDAD EN MAMOGRAFÍA.

Como ejemplo de calibración se ha tomado un equipo comercial de calibración de mamografía PMX. Se han llevado a cabo las medidas de tensión y de kerma en aire que se describen en el apartado 6.2.4 y se presentan los resultados obtenidos a continuación.

a) Medidas de tensión

Tal como se ha indicado en el apartado 7.1, el voltaje del tubo del Laboratorio está dentro del rango de ± 1,5 kV el valor nominal por lo que se considera el valor de referencia, dentro de las incertidumbres el valor nominal.. En la tabla 7.8 se presenta, el valor de referencia, la lectura del equipo problema y la diferencia, $\varepsilon_{Vnom\ Vref.}$ Se comprueba que esta diferencia es en todos los casos menor que la incertidumbre del valor de referencia (2,6% k=2), por lo que el equipo problema no requiere corrección en sus lecturas de tensión.

| Tubo de rayos X | | $\varepsilon_{Vref\ Vprob.}$ |
|---|---|---|
| V ref [kV] | V problema PMX [kV] | (Vref-Vprob. PMX) [kV] |
| 25 | 24,8 ± 0,1 | 0,2 |
| 28 | 28,0 ± 0,1 | 0 |
| 30 | 30,1 ± 0,1 | 0,1 |
| 35 | 34,9 ± 0,1 | 0,1 |

**Tabla 7.8: Voltaje del tubo vs voltaje obtenido, su diferencia y rango de la norma.**

b) Calibración del kerma en aire

El equipo PMX mide la exposición expresada en R, sin embargo para este ejemplo, hemos convertido las lecturas de exposición en kerma en aire, aplicando los factores de conversión detallados en el glosario *e) Exposición*.

En la tabla 7.9 se resumen los resultados de la calibración. Para cada calidad, se indica el valor de referencia del Kerma en aire y su incertidumbre y la lectura del equipo patrón y la incertidumbre asociada a la lectura. En la última columna se presenta el factor de calibración. Se observa que el factor de calibración es cercano a 1,00 para la calidad de 25, 28 y 30kV, sin embargo a partir de este valor se aleja de la unidad, indicando que la lectura del equipo PMX se aleja del valor de referencia del kerma en aire. Se recomienda al usuario del equipo que corrija sus lecturas multiplicando por el factor por Nk(*), para tener una mejor estimación del kerma en aire.

| Tubo de rayos X | Kerma en aire | | | | Nk(*) | U Nk(*) | Nk(+) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| V consola [kV] | Ka patron PTW [Gy] | ± U PTW (k=2) | Ka problema PMX [Gy] | ± U PMX (k=2) | # | # | # |
| 25 | 0,016 | 0,00086 | 0,015 | 0,00002 | 1,07206 | 0,00086 | 0,00105 |
| 28 | 0,022 | 0,00122 | 0,022 | 0,00000 | 1,00447 | 0,00122 | 0,00010 |
| 30 | 0,027 | 0,00150 | 0,028 | 0,00002 | 0,97370 | 0,00150 | 0,00074 |
| 35 | 0,041 | 0,00225 | 0,045 | 0,00002 | 0,91070 | 0,00225 | 0,00401 |

**Tabla 7.9: $K_{aire}$ del equipo patrón PTW vs equipo problema PMX, con sus incertidumbres y diferencia.**

# 8 CONCLUSIONES.

Las tensiones medidas durante el proyecto están en el rango, que indica la norma IEC 61267, de ±1,5 kV del valor nominal. Por lo que resultan unos voltajes aceptables para generar las calidades RQR-M de la norma.

Los resultados del control de estabilidad del equipo patrón de la cámara de ionización PTW son satisfactorios, el error relativo obtenido en las medidas de control es menor del 2%. El equipo patrón se ha utilizado para determinar las CHR de las calidades RQR-M y los valores de referencia del kerma en aire.

En cuanto a los valores de la CHR para la calidad RQR-M,el método de la regresión con los tres puntos más cercanos al grueso teórico de la CHR ha sido descartado ya que difiere mucho respecto a los valores teóricos que indica la norma. Con el método de aproximación mediante los dos puntos más cercanos al grueso teórico de la CHR, para voltajes 25 y 28 kV, se corresponden con el error aceptado por la norma IEC 61267 de ± 0.02 mm. Para los voltajes 30 y 35 kV el error excede por una centésima de milímetro adicional ±0.03 mm. Se aceptan estos valores para calibrar equipos de control de calidad de diagnóstico. Aunque se aconseja otra toma de datos más extensa para verificar los resultados.

Se ha comprobado que el Laboratorio está preparado para llevar a cabo calibraciones de equipos de control de calidad de diagnóstico. Como ejemplo de equipo comercial a calibrar en el laboratorio, se ha utilizado un equipo PMX, que mide tensión y exposición o kerma en aire. Los resultados de la calibración han puesto de manifiesto que el equipo problema no requiere corrección para la medida de la tensión pero debe corregirse por el factor de calibración para la estimación de la exposición o kerma en aire.

# BIBLIOGRAFÍA.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS.


1. AENOR. UNE-EN ISO/IEC 17025 *Requisitos generales relativos a la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*. Madrid, 2000.
2. AENOR. UNE-EN ISO/IEC 61267. *Equipos de diagnóstico médico mediante rayos X: condiciones de radiación para la utilización en la determinación de características*. Madrid, 2006.
3. AENOR. UNE-EN ISO/IEC 61674. *Equipos electromédicos. Dosímetros con cámaras de ionización y/o detectores de semiconductores usados en la imagen diagnóstica por rayos X*. Madrid, 2003.
4. APPLUS. Certificado de calibración Oregon scientific. Febrero 2010.
5. ELIMPEX-MEDIZINTECHNIK. *User's Manual PMX III*. Moedling Austria, 2012.
6. KEITHLEY. *Series 2400 Source Meter User's Manual*. Rev. 09- 2011.
7. M. GINJAUME, M. A. GONZÁLEZ. INTE. *Laboratori de calibratge i dosimetría. Procedimiento S2C021. Calibración de los parámetros eléctricos del equipo de rayos X de baja energía para mamografía*. Versión 2. Barcelona, 05-2012.
8. M. GINJAUME, M. A. GONZÁLEZ. INTE. *Laboratori de calibratge i dosimetría. Procedimiento S2C022. Medida de la 1ª y 2ª capa de hemirreducción de los haces de rayos x del equipo de de rayos x de baja energía para mamografía*. Versión 1. Barcelona, 05-2007.
9. M. GINJAUME, M. A. GONZÁLEZ. INTE. *Laboratori de calibratge i dosimetría. Procedimiento S2M011 Mantenimiento del equipo de rayos X de baja energía para mamografía*. Versión 2. Barcelona, 05-2007.
10. PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (PTB) *Certificado de calibración de la cámara de ionización, estabilidad de la fuente de verificación $^{14}C$.* Freiburg, Alemania, 2012.
11. PHYSIKALISCH-TECHNISCHE WERKSTÄTTEN (PTW) *Certificado de calibración de la cámara de ionización, estabilidad de la fuente de verificación $^{14}C$ y electrómetro Unidos*. Freiburg, Alemania, 2006.

12. PHYSIKALISCH-TECHNISCHE WERKSTÄTTEN (PTW). *Instruction Manual PTW cámara de ionización, fuente de verificación $^{14}C$ y electrómetro Unidos*. Freiburg, Alemania, 2012.
13. SEFM-SEPR-SERAM. *Protocolo español de control de calidad en radiodiagnóstico.* Revisión 2011. Senda Editorial, Madrid, 2011.
14. SIEMENS. *Manual de usuario del mamomat.*
15. SIEMENS. *Manual técnico del Mammomat.*
16. TCM, TÉCNICAS DE CONTROL METROLÓGICO. Evaluación de la incertidumbre de medida. TCM S.A. Zaragoza, 2010.

**BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA.**

AENOR. CEI 61223-3-2:2007. *Ensayos de evaluación e individuales en departamentos de imagen médica. Parte 3-2: Ensayos de aceptación. Características funcionales de imagen en los equipos de rayos X de mamografía*. Madrid, 2007.

AENOR. *Directrices europeas sobre criterios de calidad de la imagen en Radiodiagnóstico pediátrico. Comisión Europea*. Publicación EUR-16261. Madrid, 1996.

AENOR*. Directrices europeas sobre criterios de calidad de la imagen en Radiodiagnóstico. Comisión Europea*. Publicación EUR-16260 Madrid, 1996.

AENOR. *Directrices europeas sobre criterios de calidad en tomografía computarizada. Comisión Europea*. Publicación EUR-16262. Madrid, 1999.

AENOR. *Guía Europea para la garantía de calidad en el cribado mamográfico*. CE. Madrid, 2006.

AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICISTS IN MEDICINE*. The Calibration and Use of Plane-Parallel Ionization Chambers for Dosimetry of Electron Beams*. Medical physics Vol 21 Issue 8. Woodbury, NY. 1994.

CÁRDENAS RETUERTO, AUGUSTO. *Cálculo de la matriz de dosis alrededor de una fuente de IR 192 para braquiterapia utilizando el formalismo* TG-43. Oficina general del sistema de bibliotecas y biblioteca central de la UNMSM. Lima 2005.

CSN.CIEMAT. *Curso de PR para dirigir instalaciones de rayos X con fines de diagnóstico médico*. Madrid, 2006.

EDWIN ROBERTO CASTRO HURTARTE. *Manual de calibración de equipos de rayos X mediante la medición de radiación electromagnética*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 2004

ENCICLOPEDIA CUBANA ECURED. *Radiaciones ionizantes*. La Habana, Cuba, 04-2011, [http://www.ecured.cu/index.php/Radiaciones_ionizantes].

F GÓMEZ, D GONZÁLEZ-CASTAÑO, A. PAZOS. *Laboratorio Secundario de Calibración para Dosimetría en Niveles de Terapia en la Universidad de Santiago*. Santiago de Chile, Chile2011. (Diapositivas).

GULF. *Manual técnico de lubricantes*. Madrid, 2012.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). *Absorbed dose determination I external beam radiotherapy: An international code of practice for dosimetry basad on standards of absorved dose to water*. Viena, Austria, 2000.

MERCÈ GINJAUME EGIDO. *Tesis Doctoral: Caracterización de haces de radiación para su aplicación en dosimetría*. INTE-UPC. Barcelona 10-1992.

MERCÈ GINJAUME EGIDO. *Metrología y calidad en niveles de diagnóstico y protección*. INTE UPC. Barcelona 2010.

PERRY SPRAWLS. *Radiation Quantities and Units*. Georgia, USA. [http://www.sprawls.org/resources/RADQU/#Air%20KERMA]

PETER R. ALMOND. *Cavity Theory Lecture. University of Texas MD Anderson Cancer Center. Department of Radiation Physics*. Texas, USA, 2011. (Diapostivas).

SOCIEDAD ANDALUZA DE EDUCACIÓN MATEMÄTICA THALES. *Magnitudes y unidades radiológicas. 05-2000.* [http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0504-01/magnitudes.html]

SWISS SOCIETY FOR RADIOBIOLOGY AND MEDICAL PHYSICS. *Dosimetry and Quality Assurance in High Dose*. Zúrich, Suiza, 2005.