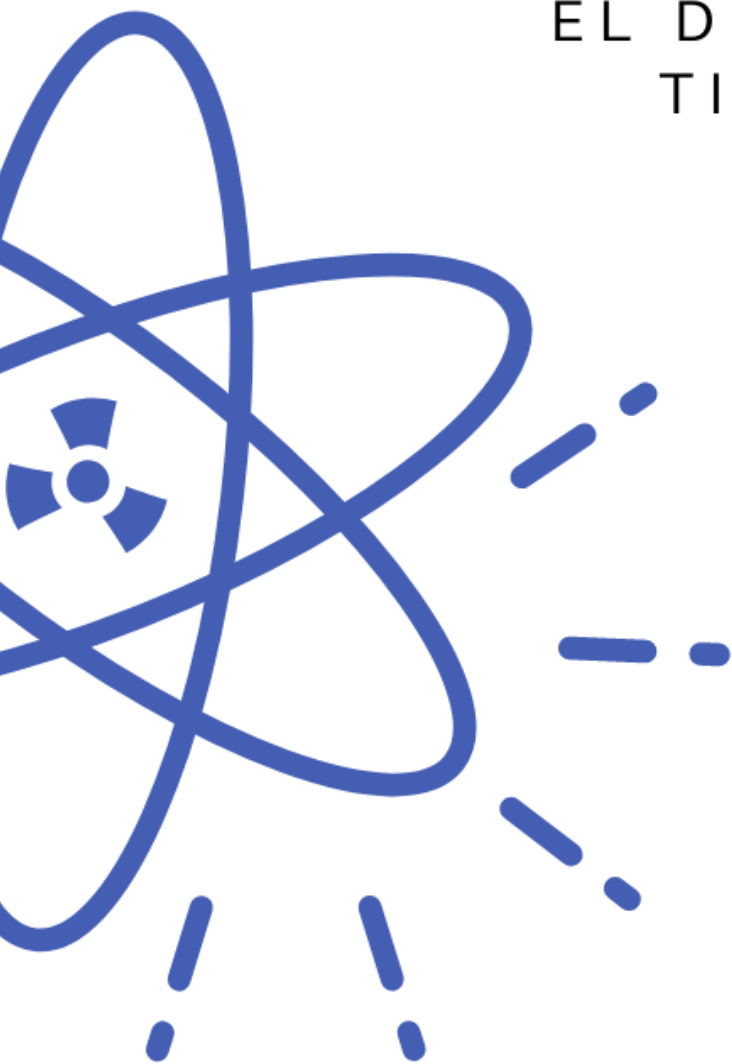


OPTIMITZANT LA
GESTIÓ DE
RESIDUS
RADIOACTIUS AMB
EL DETECTOR
TIMEPIX



Emma Sierra
Naji Abdallah

Col·legi Santo Àngel

2n Batxillerat

Modalitat: Científic-Tecnològic

Tutor/a: Sonia Tarancón
Oriol Ramírez

Abstract :

A radioactive material is any substance that emits ionizing radiation. The aim of this work was to optimize the radioactivity measurement of solid radioactive materials by means of using a particular detection device, the Timepix, a portable USB device with an attached 256-pixel sensor. First and foremost, pure beta and alpha emitter materials were measured so as to set up the optimal measurement conditions, such as background and measurement time, to ensure the quality of radioactivity data. Secondly, sample thickness and distance between detector and sample were systematically modified to study their influence on the detection efficiency of ^{40}K and ^{241}Am activity by using KNO_3 salt and a cellulose filter spiked with ^{241}Am . Finally, two NORM reference materials, more complex and representative of solid radwaste, were chosen and the same experimental design was applied. From our study, the viability of using the TimePix detector in routine control of ^{40}K and ^{241}Am activity in NORM waste has been checked. Although it can be considered a less time-consuming, cheaper and easy to implement technique, more research is needed to overcome the intrinsic limitations of the detector that makes it not suitable for real scenarios.

Key words: Radioactivity, Detection, Parameters, NORM, Efficiency

Resumen:

Un material radiactivo es cualquier sustancia que emite radiaciones ionizantes. El objetivo de este trabajo era optimizar la medición de la radiactividad de materiales radiactivos sólidos mediante el uso de un dispositivo de detección particular, el Timepix, un dispositivo USB portátil con un sensor de 256 píxeles incorporado. En primer lugar, se midieron materiales emisores beta y alfa puros con el fin de establecer las condiciones de medición óptimas, como el fondo y el tiempo de medición, para garantizar la calidad de los datos de radiactividad. En segundo lugar, se modificaron sistemáticamente el grosor de la muestra y la distancia entre el detector y la muestra para estudiar su influencia en la eficiencia de detección de la actividad de ^{40}K y ^{241}Am utilizando sal KNO_3 y un filtro de celulosa enriquecido con ^{241}Am . Por último, se eligieron dos materiales de referencia NORM, más complejos y representativos de los residuos radiactivos sólidos, y se aplicó el mismo diseño experimental. A partir de nuestro estudio, se ha comprobado la viabilidad de utilizar el detector TimePix en el control rutinario de la actividad de ^{40}K y ^{241}Am en residuos NORM. Aunque puede considerarse una técnica que requiere menos tiempo, es más barata y fácil de aplicar, es necesario seguir investigando para superar las limitaciones intrínsecas del detector que hacen que no sea adecuado para escenarios reales.

Palabras clave: Radiactividad, Detección, Parámetros, NORM, Eficiencia.

Índex:

I. Introducció	4
II. Part teòrica	6
1. Conceptes bàsics sobre radioactivitat	6
1.1 Què és la radioactivitat ?	6
1.2 Backstory: com es va descobrir ?	6
1.3 Fonts de radioactivitat	7
2. Fenomen de desintegració radioactiva	8
2.1 Desintegració radioactiva	8
2.2 Desintegració alfa (α)	10
2.3 Desintegració beta (β)	10
2.4 Desintegració gamma (γ)	11
3. Interaccions de les radiacions ionitzants amb la matèria	11
3.1 Degradació de l'energia	11
3.2 Dispersió	12
3.3 Captura o transformació	12
3.4 Efectes de les interaccions coulombianes entre partícules subatòmiques	13
4. Efectes de les radiacions ionitzants en els éssers vius	13
4.1 Absorció de l'energia	14
4.1.1 Acció directa i modificacions bioquímiques	14
4.1.2 Acció indirecta i modificacions de l'ADN	14
5. Detecció i mesura de la radioactivitat	15
5.1 Tipus de Detectors	16
5.1.1 Detectors basats en ionitzacions	16
5.1.2 Detectors basats en excitacions	19
5.2 El nostre aparell de detecció: TimePix	20
5.2.1 Com funciona?	20
5.2.2 Per què aquests materials?	21
5.2.3 Discriminació de partícules en el programa Pixet Pro	22
6. Dosimetria i activitat radiològica	23
6.1 Magnituds i unitats radiològiques	23
6.2 Concepte d'activitat	24
6.3 Concepte de dosis	25
7. Radioactivitat associada als NORMS	29
7.1 Els materials NORM i la indústria TeNORM	29
7.2 Control i gestió de residus TeNORM	30

III. Part pràctica	32
8. Establiment del fons i relació amb el temps de mesura	32
8.1 Determinació del fons	32
9. Optimització del procés de mesura	34
9.1 Mesures d'emissors alfa i beta en materials purs	34
9.1.1 Radioisòtops utilitzats	34
9.2 Resultats i discussió de mostres pures d'emissors alfa i beta	35
10. Avaluació de la pèrdua d'eficiència de detecció	37
10.1 Disseny experimental per l'avaluació de l'eficiència de detecció	37
10.2 Avaluació de la pèrdua d'eficiència de detecció en emissors alfa	38
10.3 Avaluació de la pèrdua d'eficiència de detecció en emissors beta	40
10.3.1 Pèrdua d'eficiència de detecció en emissors beta segons la distància entre detector i mostra	40
10.3.2 Pèrdua d'eficiència de detecció en emissors beta segons el gruix	42
10.4 Diferent afectació dels paràmetres estudiats a les dues partícules	44
11. Aplicació a la indústria NORM	45
11.1 Procediment experimental aplicat a materials NORM	45
11.2 Experiments amb NORM	47
11.2.1 Materials de referència	47
11.2.2 Pèrdua d'eficiència de detecció en materials NORM segons la distància entre detector i mostra	47
11.2.2 Pèrdua d'eficiència de detecció en materials NORM en funció del gruix	53
11.3 Interpretació de resultats	56
IV. Conclusions	57
V. Bibliografia-Webgrafia	59
VI. Annex	62

I. Introducció

El nostre treball tracta sobre la mesura d'activitat radioactiva utilitzant un detector en forma d'USB, anomenat TimePix, i l'aplicació d'aquest en l'àmbit de gestió de substàncies NORM (de l'anglès: *Naturally Occurring Radioactive Material*). Concretament, en aquest treball de recerca ens hem volgut centrar en donar resposta a la següent pregunta: "És possible la dinamització del procés de gestió de les substàncies NORM amb la utilització del detector TimePix?".

Les raons que ens fan plantejar aquesta pregunta venen d'investigacions anteriors portades a terme amb el detector, les quals demostren que aquest aparell té cert potencial a l'hora de mesurar radioactivitat i també permet diferenciar els tipus de desintegracions radioactives que detecta.

S'ha de reconèixer que treballar amb materials NORM per mesurar la seva activitat amb el Timepix és complicat degut a certes característiques de la substància, com per exemple la diversitat de tipus de radioisòtops que presenta. No obstant, la nostra hipòtesi suggereix la utilitat del detector en el camp de residus NORM un cop determinada la optimització i parametrització de les mesures.

En base aquesta hipòtesi, es vam marcar uns objectius concrets: d'una banda, trobar quines són les condicions més òptimes en el marc d'acció que ens permet el detector per mesurar mostres radioactives. D'altra banda, volíem comprovar si un detector TimePix és adient, en les condicions òptimes predefinides, per analitzar les substàncies NORM quan aquestes són gestionades com a residu.

La nostra principal motivació per fer aquest treball va ser el que volem estudiar i l'àmbit on ens volem dedicar: els graus de Física i de Química. Llavors, vam veure que aquest tema, encara que estigui una mica més relacionat amb la química, ens oferia una mena de síntesi de disciplines trobades entre radioquímica i física de partícules, així escollint el tema des del nostre interès. A més a més, és cert que entre moltes branques d'aquestes ciències, la radioactivitat sempre ha donat lloc a polèmica i debat entre la comunitat científica, sent això una raó més que justifica l'atracció per treballar en aquest tema.

No obstant això, la radioactivitat és un tema molt extens i realment va costar trobar una aplicació pràctica, concreta i possible amb els recursos disponibles.

Davant d'aquesta situació, vam haver de fer una recerca d'informació per entendre el que nosaltres consideraríem tres blocs teòrics d'aquesta treball: els tipus de radiacions ionitzants i com aquestes interactuen amb la matèria; com funciona el TimePix; i per últim, qué són les substàncies NORM i com es gestionen.

Pel que fa la part pràctica, teníem previst un objectiu específic principal: comprovar quines eren les millors condicions per realitzar pràctiques de mesura d'activitat amb el detector i veure, si és afectada, la tendència de variació de la seva eficiència a l'hora de fer la seva funció segons es canviaven les condicions de mesura. A continuació, i per tal de complir aquest objectiu, la metodologia que vam fer servir en la part pràctica va ser dividida en 4 blocs: avaluació de fons, condicions de mesura, avaluació de pèrdua d'eficiència de detecció en matrius pures alfa i beta en funció de paràmetres variables (altura, gruix) i, per últim, l'avaluació de pèrdua d'eficiència de detecció en materials de referència NORM en funció dels mateixos paràmetres variables. Els tres primers blocs es van concebir amb la finalitat d'agilitzar i aplicar els resultats obtinguts en l'últim bloc.

Finalment, per dur a terme l'últim bloc de la part pràctica vam tenir l'oportunitat de posar-nos en contacte amb la Dra. Anna Rigol i amb el Dr. Àlex Tarancón, ambdós membres del grup QÜESTRAM del departament de Química Anàlitica de la Universitat de Barcelona. Amb la seva ajuda, vam poder treballar amb els materials de referència NORM necessaris per aplicar el disseny experimental elaborat en mostres representatives de residus radioactius sòlids i així poder avaluar la viabilitat i idoneïtat de les mesures amb el detector TimePix en escenaris reals de gestió de NORMs.

II. Part teòrica

1. Conceptes bàsics sobre radioactivitat

1.1 Què és la radioactivitat?

La radioactivitat és un procés natural i espontani en el qual àtoms inestables d'un element emeten o irradien l'excés d'energia del seu nucli i, així, canvien (o decauen) a àtoms d'un element diferent o un estat d'energia menor del mateix element. Els àtoms aconseguixen ser estables variant l'energia dels seus electrons, dels seus nucleons o variant d'isòtop. Els elements o cossos anomenats radioactius, emeten radiacions que tenen la propietat d'impressionar plaques fotogràfiques, ionitzar gasos, produir fluorescència, etc. (La radiactividad - C.Sánchez)

1.2 Backstory: descobriment de la radiació

A la fi del segle XIX, el descobriment de Henri Becquerel de la radioactivitat de manera accidental va donar lloc a diverses recerques sobre el tema, a part de proporcionar a Henri el Premi Nobel de Física. Henri estudiava els efectes de l'exposició als raigs X sobre diversos materials fosforescents quan va observar que les sals d'urani emetien espontàniament una radiació de naturalesa similar als llamps en qüestió, provocant ionitzacions en els gasos amb els quals interactuaven. El matrimoni francès de Pierre i Marie Curie van poder ampliar el descobriment i deduir l'existència del poloni i el radi, amb efectes radioactius milers de vegades més intensos que els observats en sals d'urani (estudi de Henri). La recerca va seguir a Anglaterra, especificant la naturalesa de la radiació emesa i el fenomen en si mateix. Ernest Rutherford i Frederick Soddy van poder concloure que la radiació emesa era de tres classes diferents anomenades alfa, beta, i gamma. També van afegir que durant el procés, l'àtom original s'estava transformant a un de naturalesa diferent, procés que anomenem desintegració. (La radiactividad - C.Sánchez)

1.3 Fonts de radioactivitat

Parlem de fonts de radioactivitat distingint entre les fonts naturals (on també s'inclouen les còsmiques) i les artificials. Com hem esmentat, les fonts naturals seran les que provenen de les variacions radioactives dels elements (radioisòtops), com per exemple el tori 232 (^{232}Th) o el radó 222 (^{222}Rn) els quals són exemples als que estem molt exposats, ja que representen el 37% de l'exposició radioactiva que pateix una persona mitjana als Estats Units d'Amèrica (EPA, 2022). Tres quartes parts de la radioactivitat que hi ha en el medi ambient procedeixen dels elements naturals. No tots els llocs de la Terra tenen el mateix nivell de radioactivitat. En algunes zones de l'Índia, per exemple, la radioactivitat és 10 vegades major que la mitjana europea. La raó està en les sorres de l'Índia, que tenen tori, un element radioactiu natural. Els Alps i altres serralades també tenen un nivell de radioactivitat relativament elevat, a causa de la composició dels seus granits i l'exposició d'aquestes zones a radiacions còsmiques. Cal esmentar que la radiació còsmica és aquella que prové en major proporció de l'activitat solar, variant segons la latitud, l'altitud i el camp magnètic de la terra i representa un 5% de la exposició produïda (EPA, 2022).

En canvi, el quart restant de la radiació actual ve de fonts artificials les quals són creades per l'ésser humà. En 1895, el físic Röntgen va produir la primera font de radiació artificial, que en aquest cas, es van produir raigs X (Radiació electromagnètica), aquests tenen lloc quan un feix de raigs catòdics xoquen contra un sòlid. Per tant, a partir de descobriments com aquest es va anar investigant les aplicacions de la radiació en diferents àmbits, sent un d'ells la medicina; on s'utilitzen les radiacions ionitzants com a eina de diagnòstic clínic (raigs X) o com a tractament contra el càncer. La utilització d'aquestes radiacions en medicina crea una exposició que representa un 45 % de l'exposició a la radioactivitat tota (EPA, 2022).

Des d'un punt de vista més industrial, les radiacions també s'utilitzen per al mesurament industrial o el control de plagues entre altres aplicacions. Finalment, també s'utilitzen fenòmens radioactius com la fissió nuclear en centrals nuclears pel proveïment d'energia. (Radiación natural y artificial - CSN) La proporció en relació a la procedència de les exposicions radioactives es pot veure en la següent figura:

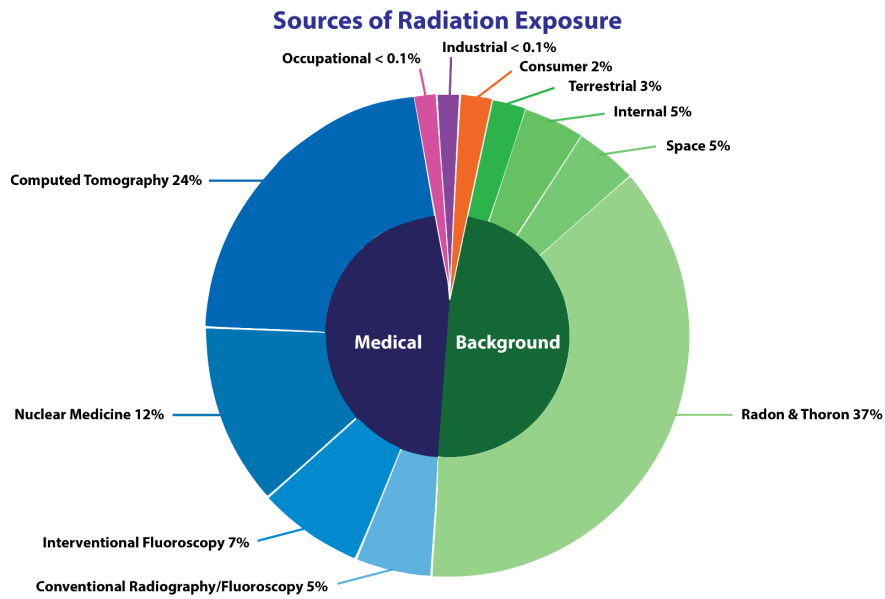


Figura 1: Diagrama de procedència de les radiacions ionitzants. (EPA, 2022).

2. Fenomen de desintegració radioactiva

2.1 Desintegració radioactiva

La desintegració es dona quan el nucli d'un àtom no té una configuració estable, és a dir, quan el nombre màssic¹ d'un isòtop² en particular no constitueix una combinació de protons i neutrons adequada. En conseqüència, el nucli inestable començarà a emetre partícules per a aproximar-se a una configuració estable. Aquesta desintegració és constant en el temps, la qual cosa significa que si deixem un compost emetent radiació, aquest acabarà desapareixent ja que ha estat perdent matèria de manera constant.

¹ Suma de protons i neutrons d'un àtom.

² Variacions del nombre màssic en nuclis del mateix element, per tant, amb els mateixos protons en totes les variacions, però amb diferent nombre de neutrons.

Com s'ha comentat anteriorment, hi ha isòtops d'un mateix element químic que són estables a diferència d'uns altres que provenen del mateix element.

Per exemple, el carboni 12 (^{12}C) és estable, característica que no té un isòtop del mateix element anomenat carboni 14 (^{14}C).

La desintegració és un procés estadístic del qual no podem conèixer el moment en el qual comença si només considerem un sol àtom. Però, quan observem un nombre elevat d'àtoms de la mateixa espècie, podem conèixer la tendència que segueix aquest tipus de radionúclid, a l'ésser del mateix tipus, la probabilitat de desintegració per unitat de temps és la mateixa. Aquesta constant dins d'una mateixa espècie de núclids es coneix com a constant de desintegració (λ). (La radiactividad - C. Sánchez)

- **Diagrames de desintegració:** aquests diagrames (veure **Figura 2**) permeten representar com s'ha desintegrat un radionúclid, que tipus de radiacions ha emès i en què nou element ha transmutado. En aquests esquemes també s'aconsegueix determinar el nivell d'excitació nuclear.

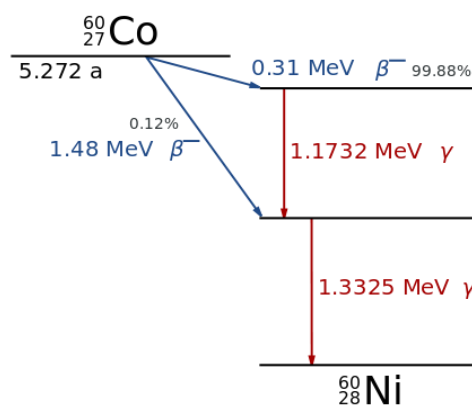


Figura 2: Diagrama de desintegració de l'isòtop ^{60}Co (Wikipedia, 2022a)

Amb l'objectiu d'aconseguir una configuració estable, els isotopos radioactius adoptaran tres maneres de desintegrar-se que poden variar segons l'isòtop del qual es tracti. Aquests tres tipus de desintegració són els següents: desintegració alfa, desintegració beta i desintegració gamma; les quals varien quant a partícules emeses i característiques.

2.2 Desintegració alfa (α)

Formada per nuclis d'heli. En emetre una partícula alfa, el nucli perd dos protons i dos neutrons. Es tracta d'una partícula relativament pesada, amb una càrrega positiva de $+2|e|$ i que interacciona fortament amb la matèria. És molt ionitzant i, per tant, poc penetrant (Sanchez, 2007). Per modelitzar el concepte, hi és la següent figura:

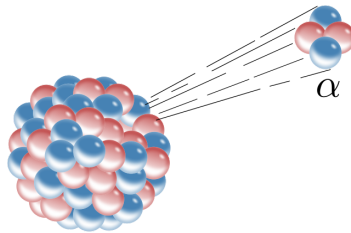


Figura 3: representació d'una partícula alfa (α). (Wikipedia, 2022b)

2.3 Desintegració beta (β)

Formada per electrons (β^-) o positrons (β^+) emesos pel nucli (model exposat a la **figura 4**). En emetre una partícula beta, un neutró lliure, el qual ha estat expulsat del nucli amb la finalitat d'aconseguir una configuració estable. En el cas de l'emissió β^- , es converteix en un protó, un electró i en un antineutrí electrònic. Quan es tracta de l'emissió β^+ , un protó transmuta en un neutró, un positró, i en un neutrí electrònic. Es tracta de partícules unes 1800 vegades més lleugeres que l'anterior i amb una càrrega de valor $|e|$ (la meitat de l'anterior) i per tant molt menys ionitzant, que interaccionen menys amb la matèria i en conseqüència tenen molta més penetració.

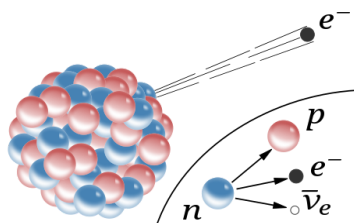


Figura 4: representació d'una partícula beta (β) (Wikipedia, 2022c)

2.4 Desintegració gamma (γ)

Presentada en la **figura 5**, la radiació gamma és formada per fotons (ones electromagnètiques) d'alta energia. En emetre fotons el nucli no canvia la seva naturalesa, sinó que només s'allibera de l'energia sobrant. Es tracta de la partícula més lleugera (un fotó no té massa) i per tant, interacciona molt menys amb la matèria, cosa que la fa molt més penetrant (no obstant això, els fotons interactuen amb la matèria via efecte fotoelèctric, l'absorció/re-emissió (scattering de Compton i de Rayleigh), i la generació de parells electró/positró). Aquesta radiació manca de càrrega elèctrica i no es veu afectada per cap camp elèctric ni magnètic.

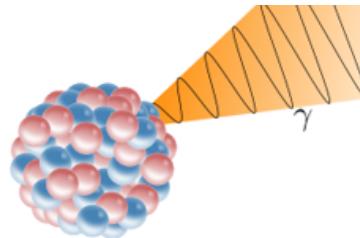


Figura 5: representació de radiació gamma (γ). (Planas, 2019)

3. Interaccions de les radiacions ionitzants amb la matèria

La interacció de les radiacions ionitzants donades als diferents processos de desintegració poden propagar-se per un medi i donar lloc a diversos fenòmens. (Interacción de las partículas cargadas con la materia - J. Baró)

3.1 Degradació de l'energia

La partícula va perdent energia cinètica a mesura que travessa el medi material perquè la va transmetent als àtoms que es va trobant, en aquest procés té lloc la transferència línia d'energia (LET, de l'anglès *Linear Energy Transmission*) que depèn del tipus de partícula que incideix.

“La transferència lineal d'energia es defineix com l'energia transmesa de la partícula ionitzant al medi per unitat de longitud” (Sociedad Nuclear Española).

3.2 Dispersió

Canvia la direcció del moviment de la partícula degut a forces externes com la força elèctrica de repulsió entre càrregues.

3.3 Captura o transformació

Aquesta interacció es dona quan una radiació ionitzant traça una trajectòria dins del material. La partícula carregada lliure interacciona amb altres càrregues dins dels àtoms del medi material. Aquesta interacció entre les partícules carregades elèctricament es denomina interacció coulombiana. Aquest tipus d'interaccions són molt comunes amb els electrons atòmics del medi material, on en cadascuna d'elles, la partícula lliure que es desplaça va perdent la seva energia cinètica.

És a dir com més es desplaça la partícula incident, més interaccions coulombianes experimenta, per tant més energia cinètica perd en el procés. Pot haver-hi canvi en el desplaçament de la partícules carregades depenent de la classificació que tinguin; si aquesta càrrega incident és un electró (β^-), aquest veurà modificat la seva direcció dins del medi material pel qual es desplaça a causa de les forces de repulsió, provinents d'altres electrons atòmics, que actúan sobre el. Un altre fenomen que es pot donar és la ionització; on l'energia de l'electró lliure és transferida a un electró de la perifèria d'un àtom del mitjà, aquesta energia és suficient com per a arrencar l'electró i donar-li una certa energia cinètica, llavors aquesta nova càrrega lliure o electró secundari repetirà el procés descrit ionitzant altres electrons.

En el cas que la càrrega sigui positiva, és a dir, un positró (β^+), es repeteix el mateix procés només que al final de la trajectòria del positró, quan no tingui energia cinètica, la càrrega es combinarà amb un electró donant lloc a dos fotons d'aniquilació (radiació gamma).

A continuació, si la partícula incident és un protó, partícula alfa... les quals són molts més massives que un electró o positró, les seves trajectòries dins del medi seran pràcticament rectes, excepte quan xoquin amb un nucli atòmic. Una altra característica que les diferencia dels electrons i positrons és la seva menor velocitat de propagació, factor que permet més interaccions coulombianes, per tant més pèrdua d'energia cinètica i recorreguts més curts. La longitud del recorregut dins del mitjà material es denomina abast i depèn de: el tipus de material, energia cinètica de la partícula, l'estat físic del mitjà i la densitat del material.

3.4 Efectes de les interaccions coulombianes entre partícules subatòmiques

Durant el recorregut, la partícula pot originar diversos efectes en les partícules subatòmiques del material:

- Excitació

L'energia de la càrrega incident és transferida a un electró de perifèria que a causa d'aquest excedent augmenta de nivell energètic per a després desprendre aquest excedent en forma de fotó. Aquest efecte s'utilitza per als detectors de centelleig.

- Ionització

Com s'ha descrit anteriorment en la interaccions es transmet energia, però a vegades aquesta és suficient com per a arrencar electrons atòmics (Energia lliardar o potencial de ionització) de les seves òrbites” i convertir-los en càrregues lliures dins del mitjà, al seu torn aquest àtom al qual se li ha arrencat l'electró es converteix en un catió.

- Emissió de radiació electromagnètica

Quan la partícula carregada frena s'origina la radiació de frenat o de “bremsstrahlung”.

Quan la partícula incident es mou a una velocitat major que la velocitat del llum en un mitjà (radiació Cerenkov). Un exemple serien les betes positives en l'aigua.

4. Efectes de les radiacions ionitzants en els éssers vius

Els éssers vius, com gairebé tot a l'univers, estem formats per matèria, llavors és indubtable que si les radiacions ionitzants interactuen amb la matèria aquestes també ho facin amb les nostres cèl·lules. Les radiacions ionitzants més energètiques podran fins i tot afectar l'estructura química de les cèl·lules, alterant la informació genètica d'aquestes i potencialment provocant modificacions negatives pels éssers vius. (Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes - I. Rafecas)

4.1 Absorció de l'energia

Els efectes biològics de les radiacions ionitzants, des de la interacció d'aquestes a nivell molecular, en les quals dipositen la seva energia en la matèria provocant ionitzacions, fins a les alteracions funcionals finals, són estudiades per la Radiobiologia. Sense entrar massa en detall, sabem que l'energia transferida al material biològic ve determinada per la transferència lineal d'energia (LET) de la radiació incident. Les radiacions amb més poder de penetració en la matèria (radiacions X o gamma) es caracteritzen per una baixa LET, mentre les que tenen una menor penetració (alfes i betes) presenten una LET alta (són més ionitzants). Es distingeixen dos processos pels quals pot tenir lloc aquesta interacció.

4.1.1 Acció directa i modificacions bioquímiques

L'acció directa es produeix quan la radiació interacciona directament amb macromolècules (lípid, proteïnes...). Com a conseqüència, algunes d'aquestes molècules poden ionitzar-se o excitar-se, acabant amb canvis biològics significatius. El fet que les molècules excitades siguin inestables al costat dels efectes de la ionització pot provocar el trencament d'enllaços entre àtoms.

4.1.2 Acció indirecta i modificacions de l'ADN

L'acció indirecta és l'absorció de l'energia de la radiació pot produir una reacció química que condueix a la formació de radicals lliures (àtom o molècula lliure amb un electró desaparellat en la seva capa externa, la qual cosa li confereix un alt grau de reactivitat química.) Aquests radicals lliures poden actuar com a agents oxidants o reductors i formar peròxids (molt estables però tòxics). Com a conseqüència, poden danyar components crítics de la cèl·lula com per exemple el material genètic, l'ADN. Les alteracions són varies, però es resumeixen en canvis o pèrdues de bases i trencaments de ponts d'hidrogen, de l'hèlix simple o el doble. Aquestes lesions poden alterar la capacitat de replicació i/o de transcripció de l'ADN.

5. Detecció i mesura de la radioactivitat

Pel fet que l'humà manca del poder de detecció de radioactivitat sense instruments externs, existeixen equips que posen de manifest l'existència de radioactivitat. Aquesta instrumentació rep el nom de "detectors", la qual cosa és genèrica. En algunes mesures dosimètriques només interessa saber la presència de radioactivitat, en altres ocasions pot interessar el coneixement dels efectes que produeix sobre la matèria, i en casos extrems pot exigir una caracterització de la radiació: la seva naturalesa, intensitat i energia. (Detección y medidas de la radiación - I. Rafecas)

Seguidament, tractem la radiació en dos tipus: directament i indirectament ionitzant.

- **Radiació directament ionitzant:**

Fa referència a les partícules alfa i beta. La informació necessària per a detectar la seva presència consisteix a saber les excitacions o les ionitzacions hagudes en els àtoms del mitjà matèria de la zona sensible (zona de detecció) del detector.

- **Radiació indirectament ionitzant:**

Al seu torn, dividim la radiació indirectament ionitzant en dues altres subtipus, fotons i neutrons. Per a la seva detecció, es requereix un agent intermedi causant de ionitzacions i excitacions.

Fotons: en el cas dels fotons, usant l'exemple de radiació gamma, l'agent esmentat abans serà el conjunt d'electrons energètics alliberats a l'hora d'interaccionar amb el detector. Aquests electrons produeixen les ionitzacions i excitacions necessàries per a trobar la presència de radiació.

Neutrons: es necessita distingir de nou entre dos tipus diferents de neutrons: tèrmics (lents) i ràpids. Els primers, lents, tenen un procés més directe i basat en una reacció (alfa) que produeix partícules alfa ionitzants.

Ara bé, els ràpids necessiten convertir-se en neutrons tèrmics abans de poder seguir el procés. Aquesta transformació s'aconsegueix mitjançant col·lisions mecàniques amb nucleos lleugers.

En breus paraules, en tot cas interessa obtenir ionitzacions i excitacions produïdes per la radiació, el qual fenomen es detecta a continuació. No obstant això, cal esmentar que no tota l'energia incident s'inverteix a produir els processos esmentats, sinó que gran part es perd en efectes mecànics o tèrmics, com poden ser les vibracions o les energies cinètiques dels àtoms i molècules.

5.1 Tipus de Detectores

5.1.1 Detectores basats en ionitzacions

Els detectors de ionització tenen un recinte ple d'un gas a pressió en el qual es disposen dos elèctrodes als quals se'ls aplica una tensió de polarització (diferència de potencial), així doncs creen un camp elèctric a l'interior del volum del detector. Degut a que els gasos són aïllants, en condicions normals, no circula corrent elèctric entre els elèctrodes, però, si la radiació ionitzant aconsegueix ionitzar ("alliberar" un electró de l'escorça atòmica) un àtom entre els elèctrodes, el camp elèctric existent donarà lloc a que les càrregues elèctriques generades (electrons lliures) per la interacció es moguin cap als elèctrodes de signe contrari. El pas de corrent en el circuit de detecció pot ser mesurat per a revelar l'arribada de la radiació al detector. Com es pot veure a la **figura 6**, la detecció varia segons la tensió de polarització. (Detectores de ionización gaseosa - I. Rafecas)

Amb baixa tensió de polarització: es formen parells d'electrons que són recol·lectats en els elèctrodes, però el camp elèctric és insuficient per a prevenir la recombinació d'alguns dels ions formats (recombinació immediata: detectors de gas, detectors semiconductors de Ge i Si).

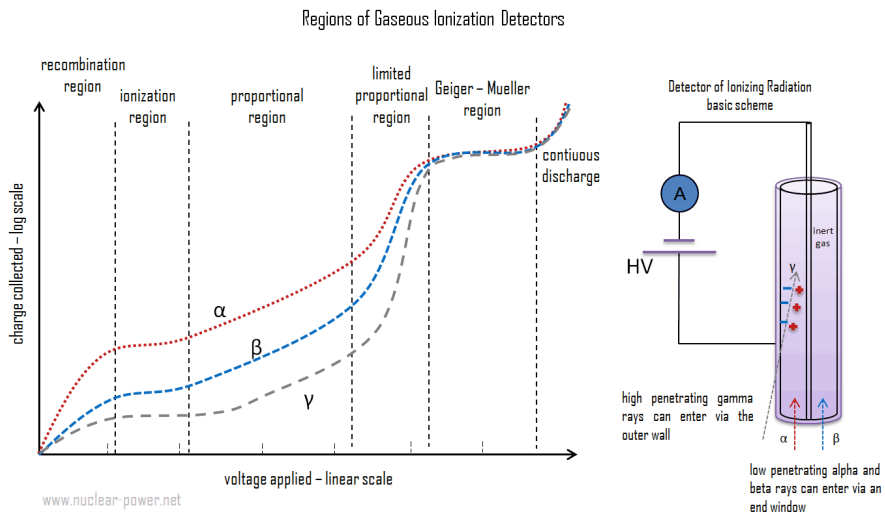


Figura 6: Detector basat en ionitzacions. Voltatge del detector. (Nuclear Power).

Cambres de ionització: augmentant la tensió, aconseguim el camp elèctric suficient per a prevenir la recombinació i que tots els electrons siguin recollits en els elèctrodes (zona plana: 200-250 volts). La geometria dels elèctrodes sol ser plana o paral·lela (veure **figura 7**), la qual cosa facilita un camp elèctric més uniforme a l'interior de la zona sensible. Aquestes càmeres que funcionen en règim d'impulsos elèctrics (no hi ha multiplicació) només serveixen per a detectar partícules molt ionitzants (alfa o ions molt pesats) ja que aquestes últimes poden produir impulsos amplis que no seran emmascarats pel soroll de fons de la instrumentació elèctrica que porten associada.

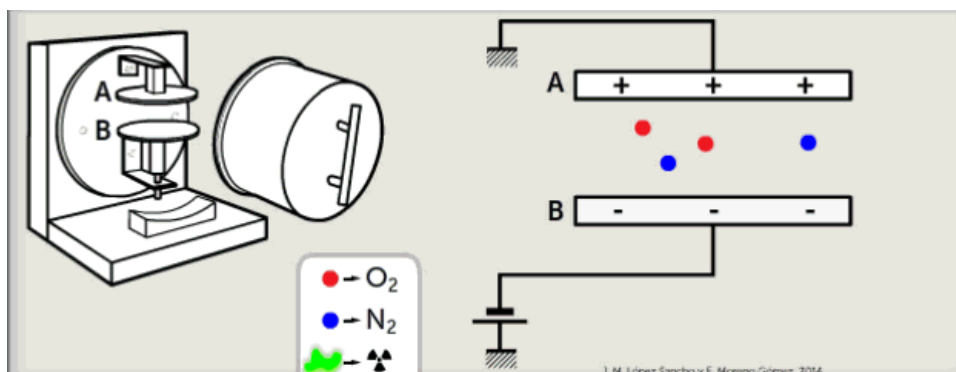


Figura 7: Esquema de cambra de ionització. (J. M. López Sancho y Esteban Moreno Gómez, 2014).

Comptadors proporcionals: en la tercera zona, parlem de l'efecte de multiplicació, quan els electrons primaris amb alta velocitat per l'elevada diferència de potencial poden donar lloc a altres ionitzacions (secundàries) de camí als elèctrodes. És a dir, cada electró primari genera un gran nombre d'electrons en el procés de multiplicació, donant lloc a una allau d'electrons (allau de Townsend). La zona és anomenada zona de proporcionalitat atès que la amplitud del senyal és proporcional a l'energia dipositada per la partícula en el detector ($n \cdot A$: producte del nombre d'ions dipositats i l'amplificació = ions produïts). Aquest factor de multiplicació és constant, i per això mateix, amb els comptadors proporcionals podem discriminar entre radiació alfa i la barreja de alfa més beta. La geometria dels elèctrodes en aquest cas seria cilíndrica per l'alta diferència de potencial.

Zona de proporcionalitat limitada: Amb l'augment del camp elèctric, la proporcionalitat deixa de ser estricta, aconseguint-se la zona de proporcionalitat limitada (els ions formats constitueixen una important càrrega lliure en el gas que acaba per afeblir el camp elèctric dels elèctrodes). En altres paraules, podríem dir que el nombre d'ions produïts ja no és simplement el producte dels dipositats i l'amplificació, sinó que pot ser major o menor.

Detectors Geiger: Prop dels mil volts, es provoca un increment del radi crític, del factor de multiplicació (A) i una extensió espacial de l'allau. La descàrrega ocasionada per la radiació ionitzant s'estén a tot el volum del comptador, ja que el nombre d'ions recol·lectats és independent del nombre d'ions primaris, independent de l'energia de la radiació incident. Com en els comptadors proporcionals, la geometria dels elèctrodes és cilíndrica.

5.1.2 Detectors basats en excitacions

La propietat d'alguns sòlids cristal·lins d'emetre l'energia absorbida en forma de llum visible o ultraviolada permet una altra variant dels sistemes de detecció, els detectors de centelleig basats en excitacions. Són formats per una substància luminescent i un dispositiu fotoelèctric anomenat fotomultiplicador, que converteix els centellejos lluminosos en impulsos elèctrics i mesura la llum emesa per la substància luminescent. (Detectores de centelleo - I. Rafecas)

La conversió d'energia emesa a radiació pot donar en dos tipus:

Fluorescent: emissió ràpida de llum visible de la substància després de l'excitació.

Fosforescent: També dit fluorescència diferida, és una emissió més lenta de la llum, és a dir, major temps transcorregut des de l'excitació a l'emissió luminescent, i és caracteritzada per major longitud d'ona.

El material luminescent ha de maximitzar la conversió d'energia a radiació fluorescent i minimitzar la conversió a radiació fosforescent. Les deteccions basades en l'excitació, per l'últim, depenen en veritat de la desexcitació dels electrons, on el temps de tornada al seu estat fonamental determina l'ús del detector.

Desexcitació ràpida: susceptible de generar luminescència (centelleig) en substàncies orgàniques o inorgàniques.

- Centellejadors orgànics: excitació molecular
- Centellejadors inorgànics: excitació a nivell de xarxa cristal·lina - NaI(TL) iodur de sodi activat amb tal·li, utilitzat en gammacàmeres en medicina nuclear.

Desexcitació diferida: és el cas que no es produeix immediatament, ja que es veu afectat per la temperatura; a temperatura ambient és molt improbable, mentre que augmenta la seva probabilitat amb l'augment de temperatura del material.

Detectors de termoluminiscència (TLD - dosímetres)

Resumint, en el cas dels detectors basats en ionització, l'aplicació d'un camp elèctric que faciliti la recol·lecció de les càrregues alliberades abans de la seva recombinació posa de manifest la presència d'aquestes càrregues en forma de corrent elèctric. Ara bé, en el cas dels detectors basats en excitacions, amb l'ajuda d'un fotomultiplicador, els fotons luminescents es converteixen en corrent elèctric.

5.2 El nostre aparell de detecció: TimePix

Havent-nos apropat més al tema de radiació al llarg del nostre treball de recerca , i finalment al camp de detecció de partícules ionitzants, vam tenir l'oportunitat de col·laborar amb el projecte ADMIRA (Activitats amb Detectores Medipix per Investigar la Radiació a l'Aula). Aquest projecte pretén crear una xarxa d'escoles al voltant de l'ús de Detectores Timepix dissenyats al CERN. L'objectiu és apropar als Instituts a la investigació que es fa en Universitats i Centres de Recerca. Un grup d'escoles que han participat en un procés de selecció utilitzaran aquests dispositius a les seves aules. Llavors, aprofitant l'oportunitat, vam poder aconseguir un d'aquests detectors. En la figura a continuació (**figura 8**) es mostra el detector amb el que treballem. (Timepix detectors track cosmic radiation on the ISS | CERN)

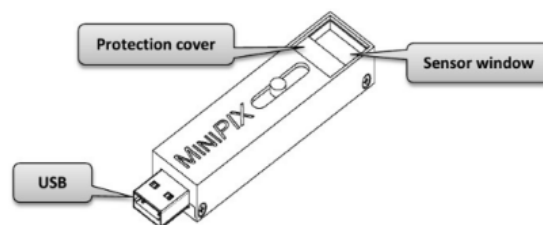


Figura 8: Parts del detector Timepix (ADMIRA, 2022).

5.2.1 Com funciona?

El detector Timepix, desenvolupat pel CERN amb tecnologia MediPix, és un detector individual de partícules, és a dir, fa un seguiment d'aquestes. Es pot classificar com un detector de tipus híbrid, “ l'aparell és una matriu d'elements microscòpics sensibles a la radiació i que estan connectats a una electrònica de lectura” (Ballabriga Suñer, R. 2021).

A nivell d'estructura, té incorporat un detector Single Timepix (256 x 256 píxeles amb una superfície de $55 \mu\text{m}^2$ cadascun). L'aparell en qüestió és un USB amb un sensor de silici estàndard de 300 micres de gruix, és capaç de llegir fins a 30fps.

La detecció funciona de la següent manera: la radiació ionitzant impacta contra el sensor de silici (material semiconductor - **figura 9**) excitant als electrons de valència en el procés que a causa de la seva excitació creen forats amb càrrega positiva. Aquestes càrregues lliures deriven als elèctrodes del dispositiu creant un senyal elèctric o pols. Aquests polsos són importants per a identificar el tipus de radiació que impacta en la placa perquè el número d'aquests polsos per unitat de temps, factor que ens permet mesurar l'energia de la partícula incident i també la durada de la seva interacció, sabent que l'energia mínima per a captar un senyal de corrent és d'uns 3,62 eV.

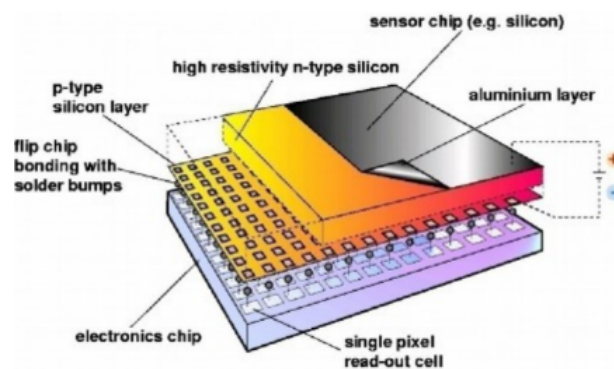


Figura 9: Capes de la part sensora del detector TimePix. (Ballabriga Suñer, R. 2021).

5.2.2 Per què aquests materials?

El sensor de silici que ve incorporat en el detector TimePix és la part més interessant a nivell físic. La seva propietat de semiconductor és la que ens permet detectar les radiacions ionitzants, principalment de partícules carregades. Definim el material semiconductor com tot aquell material que, depenent de les circumstàncies —temperatura, pressió, radiació i camps magnètics— pot actuar com a conductor, permetent el pas del corrent, o com a aïllant, impedit el pas d'aquest. Per tant, amb aquest detector s'intenta que aquest material rebi l'energia suficient per part de partícules incidents com perquè la placa pugui conduir l'electricitat per tal de detectar el pols elèctric. El silici o el germani són exemples clars d'aquesta mena de material i tots dos s'utilitzen per a la detecció de radiació. En el cas del silici, és per a rastrejar partícules carregades i raigs X tous. En canvi, el germani s'utilitza per a la espectroscòpia de raigs gamma. (Connor, 2022).

5.2.3 Discriminació de partícules en el programa Pixet Pro

El programa fet servir per la recaptació de dades i canvi de la configuració de detecció del TimePix ha sigut el Pixet Pro. Les variables de configuració més importants que trobem són: el mode en el que es registren les interaccions a la pantalla on pots escollir si es guarden per frames o de mode integral on s'acaben registrants totes les interaccions de les partícules amb el detector; en segon lloc, trobem el "Threshold" (veure **figura 10**) que defineix els llindars del dispositiu, és a dir, quines energies de partícules o radiacions mesurarà el detector. Aquest valor està donat en energia (keV); en segon lloc, hi ha el "Bias" que serveix per establir una tensió de polarització del sensor del detector (diferència de potencial); a continuació, el "Clock" defineix el clock del sensor; i per últim, a la part de "Mode" hi han 3 disponibles: "Counting", "Energy" i "Time".

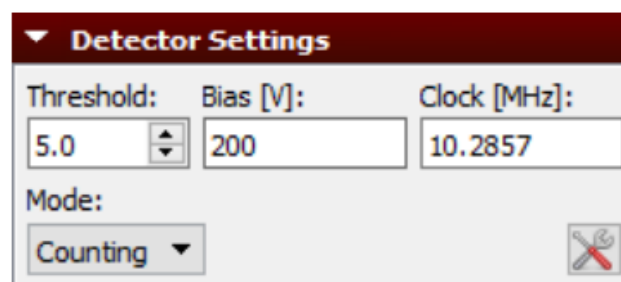


Figura 10: Configuració del detector en el software TimePix. (Servipartícules, 2022).

Quan establim els paràmetres anteriors, el detector ens possibilita diferenciar de manera gràfica les radiacions ionitzants que ha captat:

- Partícules alfa (α): tal i com s'observa a la **figura 11** són punts de molts pixels degut a que la seva LET és molt elevada, és a dir, transmet molta energia al sensor, creant un punt relativament gran.



Figura 11: partícula alfa detectada amb el TimePix. Font pròpia.

- Partícula beta (β): les betes deixen trajectòries serpentinades o allargades com les de la **figura 12**. Això és degut a que la seva LET no és tan gran com la de les partícules alfa, fent que les seves trajectòries en la placa de silici del detector tingui aquestes característiques



Figura 12: partícula beta detectada amb el TimePix. Font pròpia.

- Radiació gamma (γ): les desintegracions gammes són punts d'un sol píxel (**figura 13**) normalment degut a que la seva LET és ínfima i que la radiació electromagnètica no interactua gaire amb la matèria, per tant, no transmet molta energia.



Figura 13: radiació gamma captada pel detector TimePix. Font Pròpia

6. Dosimetria i activitat radiològica

6.1 Magnituds i unitats radiològiques

Des de la introducció de la radioactivitat als camps de la medicina, indústria i recerca pels descobriments històrics (guanyadors de premis Nobel de Física) del matrimoni Curie i Becquerel, van començar a manifestar-se efectes que demostren la perillositat de radiacions. És per això que en 1925 es va crear la Comissió Internacional de Mesures i Unitats Radiològiques, la qual va establir les definicions de magnituds com a dosi absorbida entre altres que veurem a continuació. (Magnitudes y unidades radiológicas - C. Sánchez)

- **Magnitud física:** qualsevol propietat dels cossos que sigui possible mesurar i expressar numèricament acompanyada de la unitat corresponent.
- **Unitat:** és la quantitat que es pren per mesura o mostra de referència d'una magnitud. El sistema d'unitats més utilitzat actualment és el sistema Internacional (SI).

Totes les magnituds que s'utilitzen en el camp de radiologia es poden classificar en cinc categories:

1. **Radiometria:** tracta amb magnituds associades a un camp de radiació.
2. **Coefficients d'interacció:** s'associa amb magnituds associades a la interacció de la radiació amb la matèria.
3. **Dosimetria:** tracta amb magnituds relacionades amb la mesura de l'energia absorbida i de la seva distribució. Acostumen a ser producte de les dues magnituds anteriors
4. **Radioactivitat:** té present magnituds que tenen relació amb un material generador d'un camp de radiació.
5. **Radioprotecció:** està formada per magnituds amb les que es pot deduir l'efecte biològic de determinades magnituds presents a la classificació de dosimetria.

6.2 Concepte d'activitat

La magnitud radiològica més present al nostre treball serà l'activitat, classificada dins del grup de magnituds anomenada radioactivitat. L'activitat va referida a la que té una mostra de material radioactiu en un estat energètic determinat. Aquesta es defineix com "el nombre de transicions nuclears espontànies (desintegracions) que ocorren desde l'estat d'energia determinat en un interval de temps" (C. Sánchez, 2007). Es pot expressar de la següent forma:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

Les unitats que s'utilitzen per quantificar aquesta magnitud són les desintegracions per segon, en sistema internacional aquesta unitat rep el nom de Becquerel (Bq), és a dir, un Becquerel equival a una desintegració per segon.

6.3 Concepte de dosis

Aquest terme fa referència a l'energia produïda per radiacions ionitzants que ha absorbit una quantitat de matèria determinada. (Gamo Pascual, 2008)

Hi ha diferents tipus de magnituds relacionades amb el concepte de dosis, entre els quals trobem els següents :

- **Dosis absorbida:**

L'energia transmesa per una certa mena de la radiació ionitzant R per unitat de massa de material irradiat es coneix com a "dosi absorbida", i es representa amb el símbol D_R . La unitat de dosi absorbida correspon a 1 J/kg, i es diu Gray (Gy).

Quan el mitjà irradiat és un òrgan o un teixit biològic T (d'una persona, per exemple), és interessant obtenir el valor de dosi absorbida mitjana, representada per D_{TR} .

Els efectes en la matèria que pugui produir un valor de dosis absorbida determinada depenen del temps d'exposició, no és el mateix que la dosis absorbida sigui instantània que aquesta sigui assolida en un temps concret. Per això, amb la finalitat de poder comparar ambdues situacions va sorgir la taxa de dosis absorbida, definida com la dosis absorbida per unitat de temps.

Els efectes negatius en un organisme viu irradiat no són directament proporcionals a la dosi absorbida, sinó que depenen també de la densitat de ionització lineal o ionització específica definida com el nombre d'ions produïts per la partícula en el transcurs de la trajectòria d'aquesta en l'organisme (associat amb la transferència d'energia lineal). La ionització específica és característica a cada tipus de partícula d'aquesta manera, el mal biològic també varia segons el tipus de radiació ionitzants. Per exemple, la radiació α causa danys biològics més greus que la radiació γ , ja que la seva ionització específica és major.

Per valorar la diferència de ionització específica de cada radiació ionitzant s'utilitzen el que es coneix com factors de ponderació (W_R), presentats a la **taula 1**, que representen l'eficàcia relativa de cada radiació a nivell biològic. Això ens permet saber quines radiacions són més perilloses per als éssers vius.

Taula 1: Factors de ponderació (W_R) de cada radiació ionitzant. (Gamo Pascual, 2008).

Tipo de radiación	Factores de ponderación (W_R)
β y γ	1
Neutrones	5, 10, 20
Protones	5
α y nucleidos pesados	20

- **Dosis equivalent (a un òrgan o teixit) (H_{TR}):**

Aquesta magnitud s'obté del producte de la dosi absorbida mitjana i del factor de ponderació corresponent a la radiació ionitzant causant. S'utilitza per valorar les conseqüències biològiques que tindria una dosi absorbida mitjana determinada.

$$HTR = DRT \cdot WR$$

$$HT = \Sigma HTR = \Sigma HTR \cdot WR \text{ (Expressió utilitzada per a diferents tipus de radiacions implicades)}$$

La dosi equivalent es mesura en Sieverts (Sv) (J/kg). Quan relacionem aquesta magnitud amb una unitat determinada de temps obtenim la tasa de dosi equivalent (H^*_{RT} o H^*_T) i es mesura en Sv/s.

- **Dosis efectiva (E)**

La dosi efectiva és un terme que sorgeix de la correcció de la dosi equivalent quan un òrgan o teixit està sent irradiat ja que no tots els teixits i òrgans són igual de sensibles a la exposició radioactiva.

Aquesta característica provoca que els efectes negatius en un teixit concret siguin més greus en comparació a altre malgrat que hagi estat exposats a la mateixa dosi equivalent. Per corregir aquesta dada sorgeixen altres factors de ponderació (W_T), presentats a les **taula 2 i taula 3**.

Taula 2: Factors de ponderació associats a òrgans i teixits (W_T). (Gamo Pascual, 2008).

Tejido u Órgano	Factores de ponderación (W_T)
Gónadas	0.20
Colon, pulmones, estómago y médula ósea	0.12(*)

Taula 3: Factors de ponderació associats a òrgans i teixits (W_T). (Gamo Pascual, 2008).

Tejido u Órgano	Factores de ponderación (W_T)
Vejiga, mama, hígado, esófago y tiroides	0.05(*)
Piel y huesos	0.01(*)
Otros	0.05(*)

La dosis efectiva es calcula amb el producte de la suma ponderada de totes les dosis equivalents d'òrgans i teixits del cos.

$$E = \sum W_T \cdot HT$$

$$E = \sum W_T \cdot \sum WR \cdot DTR \quad (\text{Expressió per diferents tipus de radiacions implicades})$$

Aquesta magnitud també es mesura amb Sieverts (Sv). Quan es relaciona la dosis efectiva amb unitat de temps sorgeix la taxa de dosis efectiva (\dot{E}) que s'expressa en Sv / s.

- **Dosis compromesa**

Quan un organisme i els seus teixits són irradiats es poden donar dos situacions: la primera és que l'exposició dels teixits a la radioactivitat sigui tan duradora com l'absorció d'energia per part d'aquests; la segona és que el cos sigui exposat a la radiació d'isòtops presents al propi cos, fent que l'exposició dels teixits a la radiació sigui igual, temporalment, a la durada de la font radioactiva, és a dir, al temps de desintegració fins que el cos elimina els residus a partir de la orina o els excrements.

Quan es té en compte diferents magnituds de dosis amb el temps, sorgeixen dos conceptes més:

- Dosis equivalent compromesa ($H_{(T)}$): t és el temps que la font radioactiva roman al cos desde la incorporació d'aquest. Quan no es sap el temps per conveni s'ha estipulat valors estandarditzats per adults (50 anys) i nens (70 anys). La seva unitat es Sieverts (Sv) per unitat de temps (Sv * t).
- Dosis efectiva compromesa ($E_{(T)}$): correspon al valor resultant de corregir la dosis equivalent compromesa amb el diferents factor de ponderació associats a cada teixit i òrgan (W_T). També s'expressa en Sieverts per unitat de temps (Sv * t).

$$E(T) = \sum W_t * H_t T$$

- **Dosis col·lectiva**

Quan volem valorar un grup de persones que han rebut una dosis de radiació determinada. La dosis col·lectiva és el sumatori de les dosis efectives individuals o també com la dosis efectiva mitjana (E_M) pel número de persones del grup. S'expressa en Sieverts per persona (Sv/persona).

$$S = \sum E_i = E_M \cdot N$$

7. Radioactivitat associada als NORMS

7.1 Els materials NORM i la indústria TeNORM

Després de descartar diferents aplicacions útils per al detector en qüestió i arribar a saber que la condició ideal seria “un sòlid d'alta activitat”, la relacionem amb la definició de les substàncies NORM: “Naturally Occurring Radioactive Substances”.

Tots els minerals i matèries primeres contenen radionúclids d'origen natural. Els més importants per als propòsits de la protecció contra la radiació són els radionúclids de la sèrie de desintegració U-238 i Th-232. Per a la majoria de les activitats humanes que impliquen minerals i matèries primeres, els nivells d'exposició a aquests radionúclids no són significativament superiors als nivells normals de fons i no són motiu de preocupació per la protecció contra la radiació. No obstant això, unes certes activitats de treball poden donar lloc a exposicions significativament millorades que poden necessitar ser controlades per la normativa. Els materials que donen lloc a aquestes exposicions millorades s'han conegut com a material radioactiu natural (NORM) potencialment inclou tots els elements radioactius que es troben al medi. No obstant això, el terme s'utilitza més específicament per a tots els materials radioactius naturals *on les activitats humanes han augmentat el potencial d'exposició en comparació amb la situació inalterada*. Les concentracions de radionúclids reals poden o no haver estat incrementades; si ho han fet, es pot utilitzar el concepte de TENORM.

Per a ser més concrets, les fàbriques que tracten amb material que conté algun tipus de radiació principalment no tenen una activitat preocupant. Durant el procés de fabricació, es filtren i s'acumulen aquests tipus de radiació en masses menors, la qual cosa augmenta la seva activitat relativament. Això no seria un problema si les empreses no haguessin de complir unes normes determinades per la legislació.

7.2 Control i gestió de residus TeNORM

Com hem esmentat en l'apartat anterior, diversos treballs filtren residus sòlids amb alta concentració de material radioactiu durant els seus processos laborals, com pot ser durant les operacions de centrals nuclears. A base d'aquestes premisses, s'ha de reconèixer que la gestió de tals productes que poden suposar conseqüències per a nosaltres, els humans, necessita de realitzar determinades actuacions prèvies. Aquestes actuacions prèvies venen determinades per l'Ordre Ministerial, on les últimes aconseguen els productes sòlids el titular dels quals no els preveu cap ús (CSN, s.f). Entre les determinacions esmentats trobem les següents:

- La caracterització radiològica dels residus per a comprovar si el seu contingut radioactiu és o no inferior als nivells de desclassificació que es recullen en l'annex a l'Ordre.
- Si el contingut radioactiu és inferior o igual als nivells de desclassificació, els residus podran ser gestionats per les vies convencionals habituals, d'acord amb la normativa legal que els sigui aplicable.

La desclassificació és aconsellada, al seu torn, per la Unió Europea, en la seva publicació "Application of the concepts of exemption and clearance to natural radiation sources" . Per a establir la desclassificació, es van tenir en compte les següents consideracions:

- 1) Dosi efectiva anual de 300 μ Sv/any.
- 2) Considera totes les vies d'exposició a la radiació (inhalació, ingestió, exposició externa).
- 3) Considera escenaris i paràmetres envolupants.
- 4) Analitza totes les vies d'exposició en cadascun dels escenaris considerats, seleccionant per a cada radionúclido el més restrictiu i determinant l'activitat específica que donaria lloc als 300 μ Sv /any.

L'empresa central que s'encarrega de la gestió del residus radioactius és l'empresa pública anomenada ENRESA que, per normativa, ha de l'encarregada de rebre tots el residus provinents d'altres empreses que tracten amb aquests materials.

A més, una Ordre Ministerial imposa que aquests residus han de ser gestionats de la següent manera: s'ha de portar a terme diferents procediments per la caracterització, classificació i gestió dels residus NORM. Aquests procediments són realitzats dins d'un sistema de control de qualitat i amb un sistema de registre i arxiu que asseguri la traçabilitat del procés de gestió. Tota la documentació i registres associats estaran a la disposició de la inspecció del CSN.

(Residuos NORM - CSN)

III. Part pràctica

8. Establiment del fons i relació amb el temps de mesura

Com ja hem esmentat en parlar de les diferents fonts radioactives, sabem que estem exposats a radiació des del fons còsmic, aquella que impactant des de l'espai arriba a travessar el camp magnètic de la terra. A més hem de tenir en compte altres fonts de caràcter natural que es donen en la terra o les de caràcter artificial creades per l'ésser humà, un exemple d'això seria el radioisòtop de radó 222 (^{222}Rn) present en les infraestructures dels nostres edificis. Llavors, a l'hora de treballar amb diferents mostres on l'objectiu és tenir en compte únicament les seves emissions, hem de trobar maneres d'ignorar el “soroll” de fons.

8.1 Determinació del fons

Per a determinar el fons radioactiu present en el lloc on realitzem les mesures, vam fer 10 mesures, d'una durada de 30 minuts cadascuna, deixant el sensor en lliure contacte amb l'entorn. La mitjana aritmètica d'aquests mesuraments corregida pel temps va acabar sent d'uns **0,3 cps** (*tenint un total de 550 cps en els 30 minuts de temps*). Aprofitem la detecció del fons per a també calcular la desviació estàndard³. Quan les mesures es produïen en aquest interval de temps observem una desviació estàndard de 0,00338, és a dir, de mitjana, els valors registrats es diferencien de la mitjana aritmètica en un 0,339%, la qual cosa no genera problemes sent un valor considerablement baix. Per tant, intentem comprovar si les mesures no patien una desviació estàndard molt gran si repetim el procés durant intervals de mesura de 15 minuts amb l'objectiu de guanyar temps. A continuació, repetim el mateix procés que havíem realitzat amb anterioritat amb l'única modificació del temps

³ La desviació es defineix com la separació del valor producte de la mitjana aritmètica d'una variable determinada, és la separació de mitjana una sèrie de valors registrats.

Evidentment, com el procés era igual, també calculem la mitjana aritmètica, la qual va resultar ser de 0.32 cps, i la desviació estàndard, amb un resultat del 1,2%, per tant, vam poder concloure que la desviació estàndard associada a les mesura de 15 minuts no era tan superior com per a no considerar aquest interval de temps com no eficient per a la mesura de les mostres. Aquesta desviació calculada, en els dos intervals de temps, es pot observar de manera conceptual i numèrica en les figures següents.

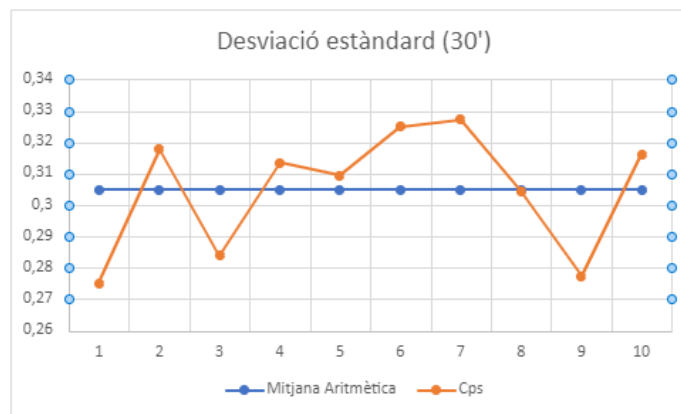


Figura 14: Desviació estàndard dels valors obtinguts en intervals de 30 minuts respecte la mitjana aritmètica. Font pròpia.

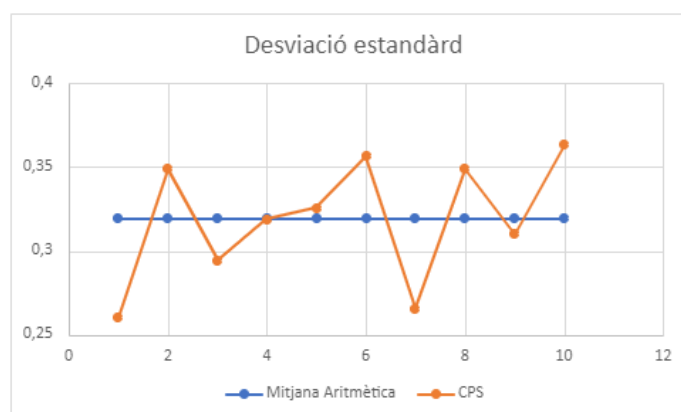


Figura 15: Desviació estàndard dels valors obtinguts en intervals de 15 minuts respecte la mitjana aritmètica. Font pròpia.

9. Optimització del procés de mesura

9.1 Mesures d'emissors alfa i beta en materials purs

En un primer disseny experimental, vam decidir col·locar el detector en una superfície horitzontal, així situant la mostra en contacte amb la part sensora de manera indirecta. Això és pel fet que, en cas de l'emissor alfa, la placa de plàstic on estava la mostra, separava l'última d'estar en contacte íntim o directe amb la part sensora. En el cas de l'emissor beta, el vial que contenia la sal la separava de la part sensora, tal com vam veure amb la primera mostra.

A base del disseny esmentat, vam fer experiments que integraven els comptes de la mostra al llarg d'un temps determinat. Vam tenir la llibertat de treballar amb intervals de temps bastant llargs, així acumular les incidències d'una mostra amb el sensor de silici durant 12 hores, passant per durades d'1 i 4 hores.

En quant el lloc on es van prendre les mostres, aquest era un pis a la població de Gavà.

9.1.1 Radioisòtops utilitzats

Tenint en compte la disponibilitat de mostres que contenen isòtops radioactius en el laboratori d'ús, vam poder treballar amb dos radioisòtops diferents, així aconseguint un tipus d'emissió radioactiva per cada mostra. Per al mesurament d'emissions alfa, hem pogut utilitzar una mostra Americi-241 (^{241}Am), la qual estava dipositada en un filtre de nitrocel·lulosa en forma de làmina circular. En el cas de partícules beta, vam utilitzar una mostra de nitrat de potassi, una sal (sòlid) en la qual destaquem la presència de l'isòtop Potassi-40 (^{40}K), el nostre emissor de partícules beta. Per últim, vam decidir no fer un estudi de les partícules gamma pel fet de que aquestes deixen una "petjada" d'un píxel a la placa del sensor, i això fa que sigui indistingible a simple vista de la radiació de fons i que no sigui funcional en el moment de fer un estudi quantitatiu perquè hauríem de calcular, a partir de la seva energia, de quin isòtop ha sortit per verificar si ve de la mostra o de l'entorn.

9.2 Resultats i discussió de mostres pures d'emissors alfa i beta

Acabades les mesures preliminars, ens van retornar resultats que van provocar deduccions i canvis en el nostre procés pràctic. Els resultats en qüestió es mostren a la taula següent :

Taula 4: Resultats de les mesures preliminars de matrius alfa i beta. Font pròpia.

Compost	Pixel count (1h)	Pixel count (4h)	Pixel count (12h)
Fons	1322	4606	12125
Nitrat de Potassi (KNO₃) - (⁴⁰K)	1395	3853	8446
Americio (²⁴¹Am)	1261	4673	12502

Com es pot apreciar en els resultats, els comptes dels compostos coincidien amb els comptes detectats en el fons. Podem prendre l'exemple de la sal de potassi i l'americium, que en un primer instant, tenint diferent activitat, haurien de tenir diferents comptes; no obstant això, en un interval de 1h, coincidien en més o menys uns 1300 comptes. En segon lloc, veiem que a part de coincidir entre elles, en el mateix interval de temps, van ser detectades els mateixos comptes de fons. L'observació de les dades ens conclou no haver pogut mesurar la radiació que emetien els compostos, sinó que continuàvem mesurant el soroll de fons en les mesures d'emissors de baixa activitat.

Ens preguntem, quin va ser el problema que ens va impedir detectar les emissions radioactives de les mostres en qüestió? Primerament, descartem que sigui un problema del detector o programari després de reconèixer el seu funcionament detectant el fons (si no funcionés bé, no detectaria res). Llavors, pensem que el fet que no es detectin les emissions es tradueix a un problema de la seva arribada a la part sensora, provocat per com havíem col·locat el detector respecte al material.

Conegudes les circumstàncies, podem deduir que el problema es limita a la barrera entre la mostra i el detector, sent aquesta el recipient que la conté.

Ara bé, volent corregir el procés de detecció, s'havia de trobar un mètode en el qual s'aconsegueix un contacte íntim de la mostra i la part sensora del detector, sense cap barrera entremig que pugui impedir l'arribada d'esmentades emissions. Un disseny simple proposat per a solucionar l'assumpte es resumia a col·locar la mostra en la superfície plana, i damunt, posicionar el detector on la seva part sensora acaba enfront de la mostra. D'aquesta manera, aconseguim que les emissions de les mostres vagin a parar directament en la placa de silici del Medipix. Determinat el nou disseny experimental, els resultats que vam poder obtenir es mostren en la següent taula:

Taula 5: Emissions registrades orientant “cara-cara” el detector i la mostra. Font pròpia.

Compost	Activitat (Bqs)	Emissions registrades
Nitrat de Potassi	60,91	12973
Americi	0,887	2439
Fons	-	1927

Com es pot observar en la taula anterior, les emissions de les mostres en aquest cas sí que han pogut arribar a la placa de silici, així detectant-se i superant els comptes del soroll de fons detectat en el mateix interval de temps.

Corregit el disseny experimental després de modificar la posició del detector respecte la mostra ha resultat reeixit. No obstant això, les mesures són considerades des de contacte íntim entre els emissors i el detector. En tal cas, ens sorgeix un nou problema: Què passaria si ara allunyéssim el detector de la mostra? Què passaria si augmentéssim la massa de la mostra?. Per a respondre aquestes preguntes i valorar la variació dels resultats després de modificar la distància que separa la mostra del detector o la massa de la mostra, determinem un nou disseny experimental.

10. Avaluació de la pèrdua d'eficiència de detecció

10.1 Disseny experimental per l'avaluació de l'eficiència de detecció

Com s'ha esmentat abans, l'objectiu principal d'aquest disseny experimental era mesurar les emissions que arribaven al detector modificant factors que afecten les condicions de mesura i els resultats d'aquesta. En primer lloc vam estipular un temps de mesura de dues hores. No obstant això, és cert que vam comprovar que mesures compreses en intervals de temps de 15 minuts eren perfectament viables (*Veure 8.1: Determinació del Fons*), però amb l'objectiu que les mesures tinguessin el mínim error associat decidim que la millor opció seria triar les 2 hores com a durada de la pràctica.

Com a material a mesurar, vam seguir utilitzant els dos radioisòtops de l'experiència preliminar a aquesta (*Veure punt 9.1.1: Radioisòtops utilitzats*).

A continuació per a aconseguir el contacte íntim entre matriu i detector utilitzarem un suport de laboratori amb una nou de laboratori enganxada amb la qual podíem subjectar i modificar l'altura del detector sobre la matriu fixa en el suport. En el cas del nitrat de potassi, vam fer servir una placa de petri per a contenir la sal. Les dimensions de la placa de petri eren un diàmetre de 5 centímetres i una altura d'1 centímetre. En la següent figura es mostra com s'ha col·locat el material:

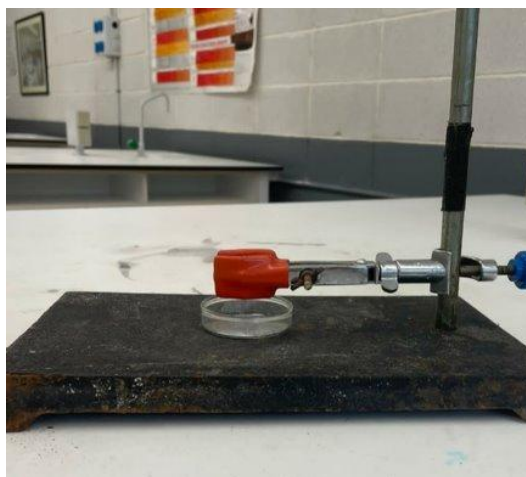


Figura 16: Estructura i material de laboratori utilitzat per mesurar. Font pròpia.

10.2 Avaluació de la pèrdua d'eficiència de detecció en emissors alfa

Les variables que poden modificar la detecció, i, per tant, la seva eficiència, són la distància detector-mostra i la massa de les mostres pel fet que si posem més massa, la mostra és més gruixuda, per tant, és més difícil per a les emissions produïdes en la base del material arribar al sensor.

L'eficiència de la detecció és bàsicament la consecució d'un cert nombre de comptes, i per a determinar-la, realitzem una sèrie d'experiments. Per al nostre emissor alfa, atès que és americi dipositat en una placa de plàstic, no podem augmentar la seva massa, però si modificar la distància que la separa del detector. Les modificacions i els seus resultats es mostren en la següent taula:

Taula 6: Emissions registrades del patró d' ^{241}Am en funció de la distància del detector. Font pròpia.

Distància en americi (cm)	Emissions registrades
0	2439
1	812
5	0

Per a la distància de 0 cm, cal dir que és determinada per la distància ens permet la geometria del detector (la forma de la part sensora limita la distància mínima a 1 mm, i per a la facilitat de comparació amb diferents distàncies, la considerem com el contacte íntim detector-mostra, la mínima que es pot aconseguir). Ara bé, en l'interval de temps de 2 hores, es van poder registrar uns 2439 comptes quan el detector estava separat per la mínima distància possible. En augmentar la distància tan sols 1 cm, les emissions detectades disminueixen a més de la meitat, aconseguint 812 comptes en el mateix interval de temps. Els comptes provinents de l'americi arriben a ser nul·les quan es determinen els 5 cm de separació.

Amb aquests resultats, vam obtenir la següent gràfica (**figura 17**). Aquesta gràfica ens introdueix una tendència interessant de la perduda de deteccions a l'hora de modificar la distància el detector de la mostra, i com veurem, aquesta tendència ens acompanyarà durant la resta del treball:

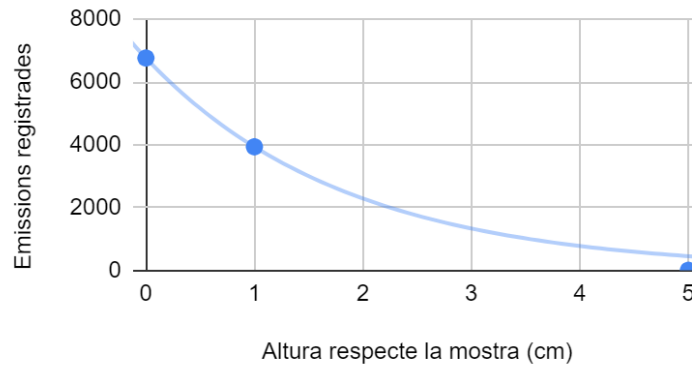


Figura 17: Gràfica de la variació de les deteccions en funció de la distància en una matriu de ^{241}Am . Font pròpia.

Un cop fetes les mesures, sabíem que l'activitat del patró ^{241}Am era d'uns 0,887 Bqs (desintegracions per segon). Així que per a calcular l'eficiència necessitem saber les desintegracions per segon que havia registrat el detector a partir dels comptes totals en 2 hores de mesurament i, després, establir la relació de comptes obtinguts respecte els comptes teòrics aconseguint el percentatge d'eficiència segons l'altura en aquesta matriu alfa. Un cop aconseguit, els resultats es poden traduir gràficament, vist a la **figura 18**.

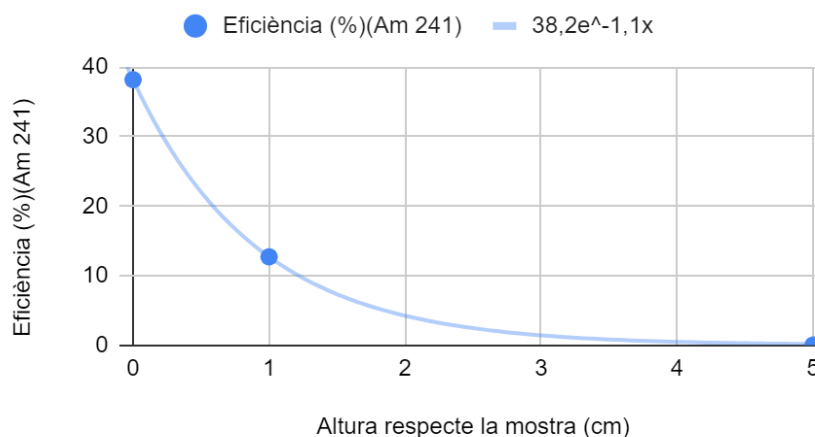


Figura 18: Gràfica de eficiència de detecció en funció de la distància - Matriu ^{241}Am . Font pròpia.

10.3 Avaluació de la pèrdua d'eficiència de detecció en emissors beta

10.3.1 Pèrdua d'eficiència de detecció en emissors beta segons la distància entre detector i mostra

En el cas del nitrat de potassi, la matriu ens permet diferents variacions tant de distància com de gruix de la mostra (variació de la seva massa). Per a cada variació de massa, es van fer mesures a diferents distàncies. En aquest cas, la sal anava continguda en una placa de petri que per la seva pròpia geometria no ens permetia acostar el detector a menys de 9 mm, per tant, ho considerem com el màxim contacte íntim possible. Aquest era un problema que no afectava tant la mostra d'americium ja que aquesta estava continguda en forma de làmina en una placa plana que permetia un contacte íntim molt estret. Començant amb el nitrat de potassi, vam obtenir els resultats que es mostren a la **taula 7**.

Taula 7: Emissions registrades i eficiència de detecció en funció de la distància del detector - Matriu de ^{40}K (1 mm). Font pròpia.

Gruix de 1mm		
Distància en matriu de 1 mm	Emissions registrades	Eficiència (%)
0	12973	2,958
5	2108	0,4807
10	950	0,2166
20	9	0,00205

Com esperàvem, els comptes registrats disminueixen a mesura que augmenta la distància entre el detector i la mostra. En el cas de l'emissor beta també vam poder realitzar el càlcul que ens permet saber l'eficiència de la detecció (aplicant el càlcul de l'activitat de la mostra), així analitzant els resultats de manera més directa, reflexats a la **figura 19**.

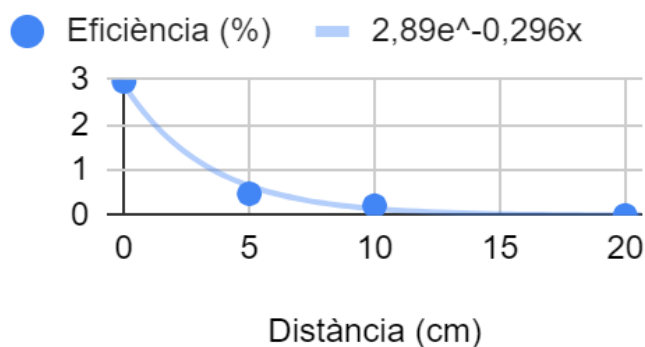


Figura 19: Eficiència en funció de la distància en una matriu de ^{40}K (1 mm). Font pròpia.

Seguidament, realitzem les mateixes modificacions de distància a la mostra, però tenint diferents quantitats de l'última, és a dir, modificant el gruix. Els resultats estan compilats a les següents taules:

Taula 8: Emissions registradas i eficiència de detecció en funció de la distancia del detector - Matriu de ^{40}K (5 mm). Font pròpia.

Gruix de 5mm		
Altuera en matriu 5mm	Emissions registrades	Eficiència (%)
0	13954	0,99
5	3294	0,23
10	974	0,069
20	206	0,0147

Taula 9: Emissions registradas i eficiència de detecció en funció de la distancia del detector - Matriu de ^{40}K (10 mm). Font pròpia.

Gruix de 10mm		
Altuera en matriu 10mm	Emissions registrades	Eficiència (%)
0	14920	0,654
5	4029	0,18
10	1396	0,0612
20	306	0,0134

Vistes les dades, es representa la tendència amb aquesta gràfica conjunta:

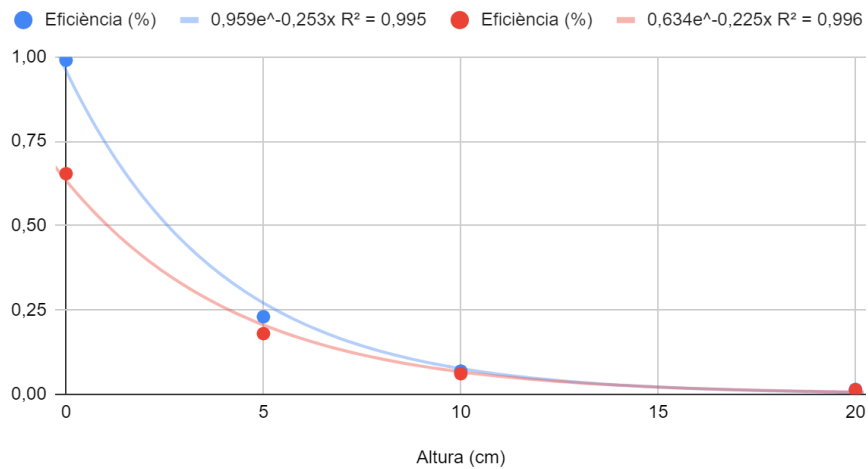


Figura 20: Eficiència en funció de la distància en una matriu de ^{40}K (5 i 10 mm). Font pròpia.

Com es pot observar tant a nivell numèric, en les taules 8 i 9, com a nivell més visual en les gràfiques, la tendència és la mateixa, encara que augmentem el gruix. A mesura que augmenta la distància que separa la mostra del detector, disminueix la seva eficiència. Es pot mencionar l'augment del nombre d'emissions registrades, justificant el fet com a efecte d'augmentar la massa de la mostra, és a dir, la seva activitat.

10.3.2 Pèrdua d'eficiència de detecció en emissors beta segons el gruix

El gruix de la mostra no és més que una quantitat determinada de massa que ocupa cert volum, el qual mesurarem, amb la finalitat de facilitar el càlcul, en una dimensió, considerant simplement el gruix. De la mateixa manera en què hem calculat l'eficiència en els casos on la variable era la distància, també hem utilitzat la mateixa fórmula que en el càlcul d'eficiència segons la distància, de manera que també establirem una relació entre els comptes obtinguts i les desintegracions teòriques, tenint en compte que ara el que varia és el gruix, per a finalment obtenir el percentatge d'eficiència en funció d'aquesta nova variable.

Recalçant la disminució de l'eficiència a diferents distàncies d'un mateix gruix, si ens fixem en diferents gruixos, però amb la mateixa distància detector-mostra, podem veure que s'aplica al segon i el tercer cas, on encara que augmentem la massa (és a dir, l'activitat) de la mostra, es continuen perdent comptes fins i tot mantenint la distància entre el detector i la mostra. Respecte la diferència entre els tres casos, l'augment del gruix de les mostres, realitzem una comparació, tenint en compte les dades de les taules anteriors i les gràfiques que es mostren a continuació:

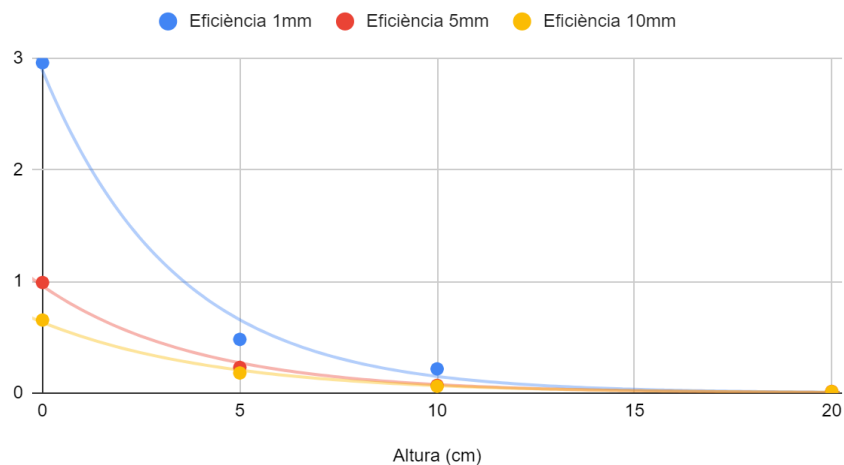


Figura 21: Eficiències en funció de l'altura en diferents gruixos de matriu beta.

Font pròpia.

En un primer instant i per culpa de la intuïció, es pot pensar que l'eficiència augmentaria si augmentem l'activitat de la mostra pel fet que es produeixen moltes més desintegracions, però passa tot el contrari. En la matriu d'1 mm, i en comparació amb les matrius de 5 mm i de 10 mm a la mateixa altura, veiem que la matriu d'1 mm té més eficiència. Per a cada altura, s'aplica el mateix raonament.

Per a acabar de veure la pèrdua de l'eficiència segons el gruix de la mostra d'una manera més directa, deixem una gràfica (**figura 22**) en la qual la variable de la qual depèn l'eficiència serà solament el gruix de la mostra. Per a aquesta gràfica, hem tingut en compte una sola distància detector-mostra, una que els separa 5 mm.

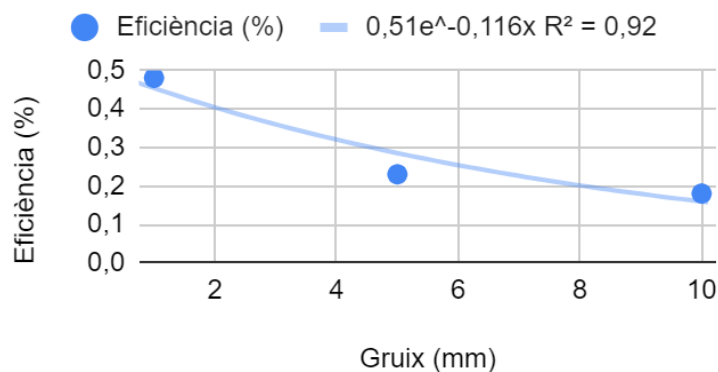


Figura 22: Eficiència en funció del gruix en una matriu de ^{40}K (5 mm de distància).

Font pròpia.

10.4 Diferent afectació dels paràmetres estudiats a les dues partícules

Com havíem intuït des d'un principi, veïem que queda demostrat definitivament el fet de que els paràmetres variats durant totes les experiències són clau a l'hora de mesurar les partícules ionitzants amb la màxima eficiència possible.

En primer lloc, l'altura juga un paper important quan volem detectar cert tipus de partícules. Perquè, com hem vist, les partícules beta eren relativament poc afectades per petites variacions de la distància degut a la seva poca interacció amb el medi material present en totes i cada una de les mesures realitzades; l'aire. Llavors, aquesta característica de les partícules beta ens permetia ampliar el valor de l'altura del detector fins 20 centímetres respecte la mostra. En canvi, les partícules alfa emeses pel patró d'americí deixaven de ser detectades quan l'altura era superior a 5 centímetres, és a dir, les partícules alfa interactuaven tant amb el medi material que la seva energia cinètica era transema ràpidament a altres partícules presents a l'aire, fent més difícil la seva arribada, per tant detecció, a la part sensora. En segon lloc, trobem que el segon paràmetre estudiat, el gruix, també empitjora l'eficiència de detecció. Trobem l'explicació d'aquest efecte en el fenomen de l'autoabsorció dels materials. Aquest efecte és molt semblant al que causa l'aire en les partícules que aconseguen sortir de la matriu, degut a que l'energia cinètica d'aquestes també és veu disminuïda i absorbida per partícules de la mateixa espècie, així que quan més gruix posem, més partícules afecten a la trajectòria de partícules causades per desintegracions i és més difícil detectar-les. Aquest fenomen afecta de la mateixa manera que ho fa l'aire en les partícules de tipus beta i les de tipus alfa.

11. Aplicació a la indústria NORM

Els experiments realitzats anteriorment ens permeten deduir la limitació del detector en qüestió a la detecció de materials sòlids, per la qual cosa decidim dirigir la seva aplicació a la indústria NORM. Per a portar l'anàlisi a terme, vam tenir l'oportunitat de visitar la Universitat de Barcelona per realitzar uns experiments amb materials NORM de referència, així estudiant els paràmetres dels nostres assajos preliminars aplicats a aquest camp.

11.1 Procediment experimental aplicat a materials NORM

Per a realitzar l'última part de la nostra part pràctica ens vam desplaçar a la Universitat de Barcelona amb l'objectiu de mesurar els materials de referència NORM que disposa el laboratori de la facultat, variant els mateixos paràmetres de les altres experiències, la distància i el gruix d'aquests en el procés. Treballem amb dos emissors, el primer sent el material de referència A22-001 amb una activitat total de $27081 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, i el segon sent el de referència A22-002 amb una activitat de $14492 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Utilitzem el mateix sistema de mesura amb el qual vam realitzar els experiments preliminars amb ajuda dels mateixos materials; suport universal, nou de laboratori, placa de petri i un ordinador juntament amb el programa i el detector.

Com ja hem explicat anteriorment, la forma correcta d'orientar el detector és "cara a cara" amb la mostra, la qual canvia en aquest disseny experimental.

A continuació, vam estipular un temps de mesura de 15 minuts amb l'objectiu que les mostres es fessin d'una forma més eficient (Veure punt 8.1 Determinació del Fons).

A més, també afegim una disminució en les altures distància-detector amb la finalitat de que partícules amb menys abast en el mitjà material (en aquest cas l'aire), com per exemple les partícules alfes, poguessin arribar al detector sense problema i que el seu LET afectés el mínim possible en la mesura. Les altures escollides són les següents; contacte íntim, 20 mil·límetres i 40 mil·límetres.

Finalment, en utilitzar les mateixa plaques de petri que en anteriors experiments vam poder mantenir les condicions de mesura en totes les nostres pràctiques, però per a saber la massa que complia amb els gruixos fixats; 1 mil·límetre, 5 mil·límetres i 10 mil·límetres; aconseguim els valors de la massa a partir de un estudi del volum del recipient que ocuparia cada gruix i de la densitat del propi material amb ajuda d'una proveta i una bàscula amb l'objectiu de calcular la massa exacta que necessitariem per complir amb el gruix corresponent.

De mitjana i en les condicions de la ubicació (sent a Barcelona a diferència dels assajos preliminars a Gavà), coneixem que el soroll de fons equival a uns 0,27 cps (una mitjana de 240 comptes en un interval de 15 minuts).

Seguint amb la rèplica, els paràmetres avaluats eren els mateixos que havien estat experimentats a nivell preliminar, així sent aplicats al camp NORM en aquest assaig.

La finalitat dels experiments realitzats amb el material de referència era estudiar el comportament dels emissors en productes com els NORM, així trobant una aplicació útil del detector. A la figura adjunta es pot apreciar amb quin material es realitzaven les mesures (**figura 23**).

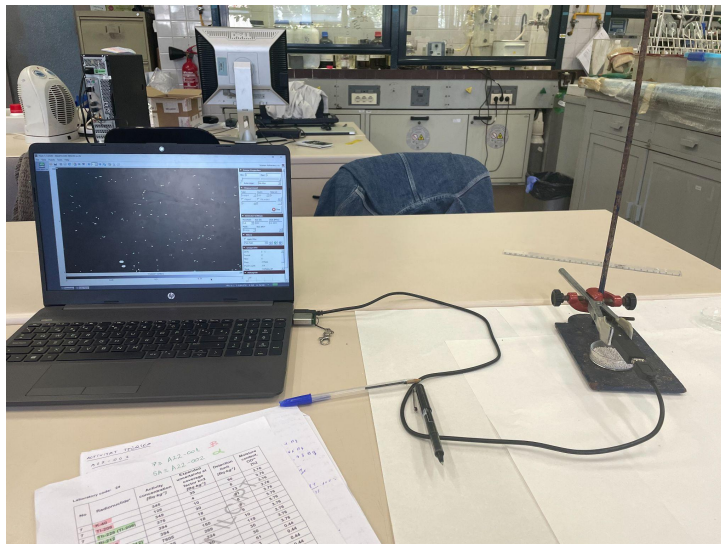


Figura 23: Sistema de mesura realitzat a la Universitat de Barcelona. Font pròpia.

11.2 Experiments amb NORM

11.2.1 Materials de referència

Els materials de referència certificats (MRCs o CRMs per les seves sigles en anglès) són controls o patrons utilitzats per a comprovar la qualitat i la traçabilitat dels productes de metrologia, per a validar els mètodes de mesurament analítics, o per al calibratge dels instruments. Un material de referència certificat és un patró de referència per a una unitat de mesura. És un artefacte que ofereix un valor de referència per al calibratge d'una tècnica analítica instrumental donada. Un material de referència certificat és una forma particular d'estàndard de mesurament.

Com que la majoria de la instrumentació analítica és comparativa, ja que gairebé no s'usen mètodes absoluts (quantitatius) d'anàlisi com la gravimetria o la coulombimetria, es requereix una mostra de composició coneguda (material de referència) per a un calibratge precís. Aquests materials de referència són produïts sota estrictes procediments de fabricació i es diferencien dels reactius de laboratori per la seva certificació i traçabilitat de les dades proporcionades. Els materials de referència són particularment importants per a la química analítica i anàlisis clíniques.

11.2.2 Pèrdua d'eficiència de detecció en materials NORM segons la distància entre detector i mostra

A22-001

Començant amb el primer material NORM, amb referència A22-001, el paràmetre de la distància va ser avaluat a diferents gruixos de la mostra, sent el primer gruix un d'1 mm, el qual ens va donar els resultats a continuació:

Taula 10: Emissions registrades i eficiència de detecció en funció de la distància del detector - NORM A22-001 (Gruix de 1 mm). Font pròpia.

A22-001: Gruix 1mm (1,836g)		
Distància (mm)	Emissions registrades	Eficiència total (%)
0	1687	3,72
20	862	1,899
40	333	1

Amb una massa concreta (1,836 grams) que representa un mil·límetre de gruix, i en contacte íntim amb la mostra, s'obté un 3,72% d'eficiència de detecció amb l'aparell. A mesura que augmentem la distància que separa el detector de la mostra (interval·ls de 2 mm) notem la disminució de l'eficiència, tendència vista en la següent gràfica:

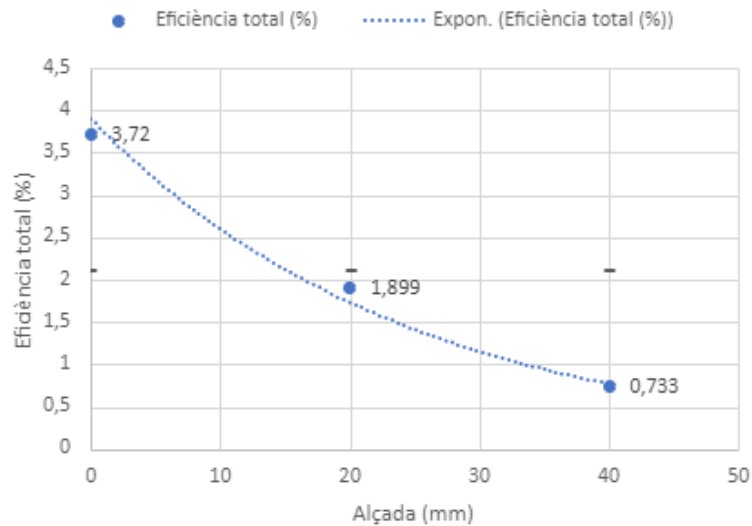


Figura 24: Eficiència en funció de la distància en una matriu d'1 mm A22-001. Font pròpia.

Repetim els experiments amb diferents gruixos del material, en els quals obtenim resultats que es poden interpretar de la mateixa manera respecte l'estudi de la pèrdua d'eficiència segons la distància. Els podem veure en les següents taules.

Taula 11: Emissions registrades i eficiència de detecció en funció de la distància del detector - NORM A22-001 (Gruix de 5 mm). Font pròpia.

A22-001: Gruix 5 mm 9,18 g		
Distància (mm)	Comptes	Eficiència total (%)
0	3148	1,38
20	1583	0,697
40	933	0,411

Taula 12: Emissions registradas i eficiència de detecció en funció de la distància del detector - NORM A22-001 (Gruix de 10 mm). Font pròpia.

A22-001: Gruix 10mm 18,36 g		
Distància (mm)	Comptes	Eficiència total (%)
0	3006	0,66
20	2249	0,495
40	1019	0,22

Per visualitzar la tendència en qüestió, il·lustrem els resultats en la **figura 25**

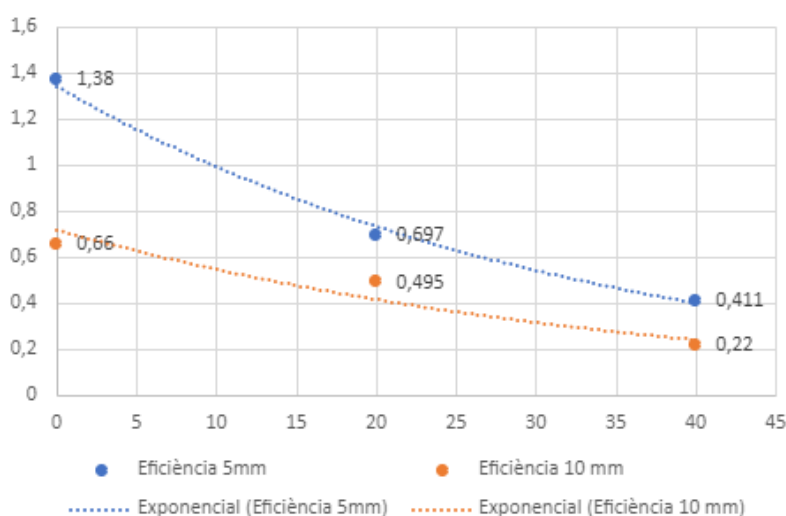


Figura 25: Eficiència en funció de la distància en una matriu de A22-001 (Gruixos de 5 i 10 mm). Font pròpia.

Amb la mateixa tendència de l'experiment amb 1 mil·límetre de gruix, veiem que a mesura que augmentem el gruix de la mostra, la distància continua tenint el seu mateix efecte sobre el procés de detecció, resumint-se a fer-lo menys eficient com més distància de separació hi hagi. D'aquesta manera, el contacte íntim de la mostra amb el detector és la que ens assegura les màximes deteccions possibles dels emissors NORM.

A22-002

Seguidament, realitzem la mateixa sèrie d'experiments al segon material NORM, de referència A22-002, així avaluant com afecta la distància en l'eficiència de detecció amb diferents gruixos del material. La repetició del disseny amb un altre material ens permet comparar la tendència de l'eficiència de detecció amb diferents paràmetres, així arribant a unes conclusions o altres depenent dels resultats. Per a un primer gruix d'1 mil·límetre amb el material esmentat, vam obtenir els resultats mostrats en la taula a continuació:

Taula 13: Emissions registradas i eficiència de detecció en funció de la distancia del detector - NORM A22-002 (Gruix de 1 mm). Font primària.

A22-002: Gruix 1mm (2,19g)		
Distància (mm)	Comptes	Eficiència total (%)
0	731	2,55
20	326	1.14
40	216	0.76

Amb la finalitat de realitzar l'estudi de la tendència, deixem els resultats obtinguts en una gràfica:

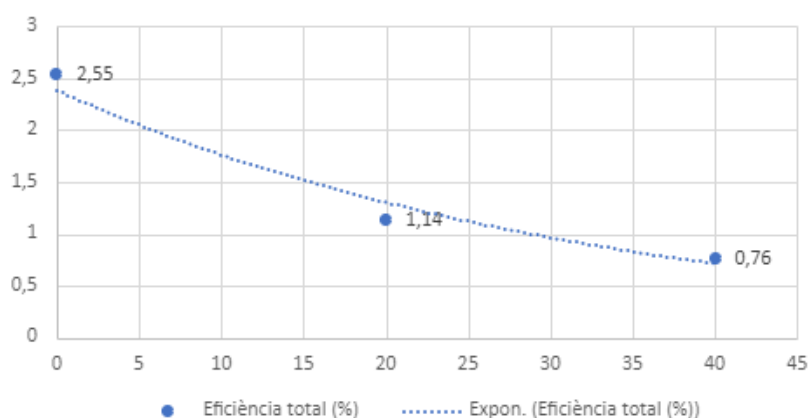


Figura 26: Eficiència en funció de la distància en una matriu d'1 mm A22-002. Font pròpia.

Cal destacar que l'única diferència trobada entre els resultats del primer material i el segon no recau en la tendència (vista ser la mateixa), sinó en els valors numèrics obtinguts a nivell de comptes. Aquesta observació és fàcilment justificada quan ens fixem en l'activitat de cada material, directament proporcional a les emissions que tindrà i, per tant, als comptes detectats. El primer material estudiat (A22-001) tenia una activitat de $27081 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, mentre que el segon (A22-002), té una activitat menor, sent de $14492 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Basant-nos en el mateix disseny experimental, augmentem el gruix de la mostra a 5 mil·límetres, i després a 10 mil·límetres. En cada gruix, s'avalua l'eficiència de detecció a les 3 distàncies establertes, per a resultar amb les següents taules:

Taula 14: Emissions registradas i eficiència de detecció en funció de la distancia del detector - NORM A22-002 (Gruix de 5 mm). Font pròpia.

A22-002: Gruix 5 mm (10,924g)		
Distància (mm)	Comptes	Eficiència total (%)
0	1088	0,76
20	704	0.494
40	330	0.232

Taula 15: Emissions registradas i eficiència de detecció en funció de la distancia del detector - NORM A22-002 (Gruix de 10 mm). Font pròpia.

A22-002: Gruix 10 mm (21,85g)		
Distància (mm)	Comptes	Eficiència total (%)
0	1199	0.38
20	670	0.24
40	424	0.15

Com era d'esperar, els resultats obtinguts són, en essència, semblants entre gruixos i entre materials. Amb l'augment de la distància que separa el Medipix de la mostra, els comptes detectats de les emissions en la part sensora es redueixen, així causant la disminució de l'eficiència del detector. Encara que els valors canviïn, destaquem la repetició de l'orientació de la gràfica, vista a continuació.

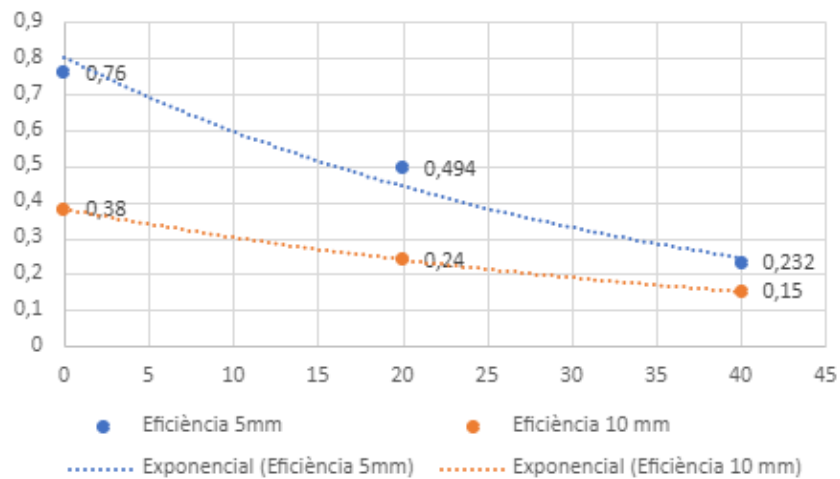


Figura 27: Eficiència en funció de la distància en una matriu de A22-001 (Gruixos de 5 i 10 mm). Font pròpia.

11.2.2 Pèrdua d'eficiència de detecció en materials NORM en funció del gruix

Els experiments efectuats anteriorment es van fer amb la intenció d'estudiar l'efecte del paràmetre de la distància que separa el detector de la mostra a diferents gruixos. Seguidament, realitzem una comparació entre els diferents gruixos a una mateixa distància, així destacant l'altre paràmetre, la quantitat de la mostra, i el seu efecte en l'eficiència del detector.

A22-001

En primer lloc, insistim en la equivalent tendència que es veu en les gràfiques a diferents gruixos, però la diferència en els valors que pren l'eficiència com a variable dependent de tant la distància com el gruix. Per a visualitzar el que s'ha dit, tornem a veure les gràfiques presentades anteriorment:

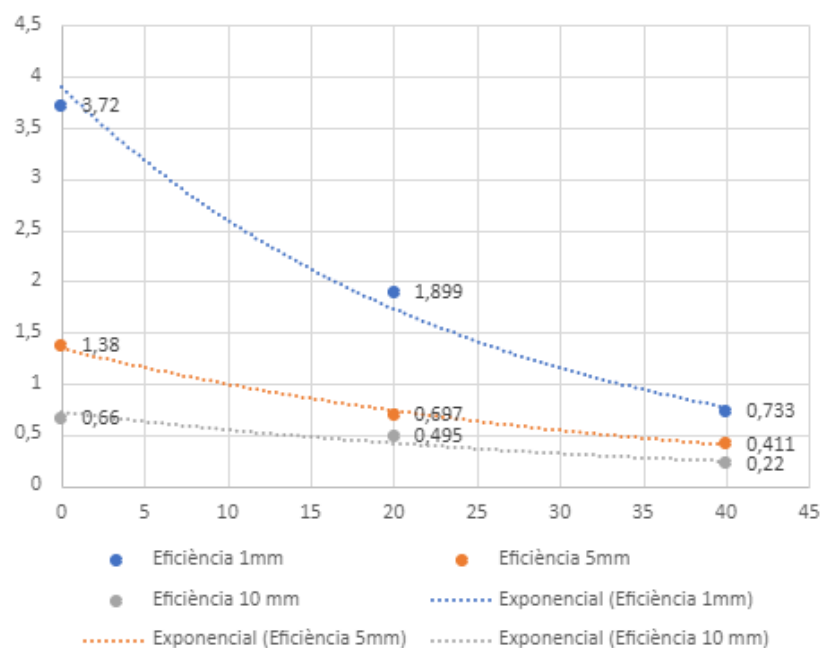


Figura 28: Eficiència en funció de l'altura en diverses matrius del material de referència A22-001. Font pròpia.

Ara bé, amb la finalitat de facilitar l'estudi de les conseqüències de la modificació de gruixos, deixem que l'eficiència depengui només del gruix a una sola distància determinada, en aquest cas, veiem la gràfica (**figura 29**) quan la distància és la mínima possible:

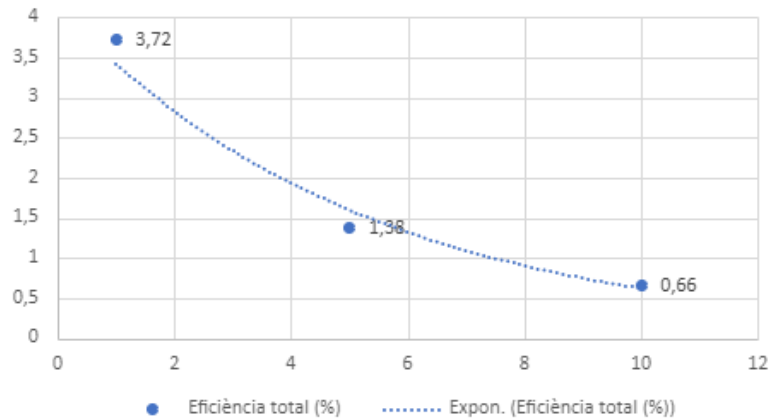


Figura 29: Eficiència en funció del gruix de la matriu d'1 mm del material de referència A22-001 en contacte íntim amb el detector. Font pròpia.

A22-002

D'igual manera, duem a terme la mateixa comparació de diferents gruixos del material per a diferents altures, així veient les anteriors gràfiques on la variació de l'eficiència segueix la mateixa orientació, però pren diferents valors. (**figura 30**)

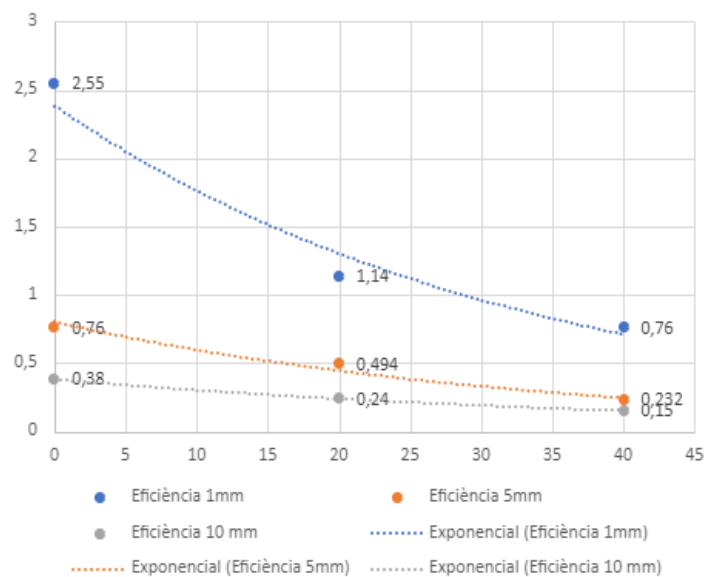


Figura 30: Eficiència en funció de l'altura en diferents matrius del material A22-002. Font pròpia.

Per portar a la pràctica l'estudi exclusiu de l'impacte de la modificació del gruix en l'eficiència de detecció respecte la mostra en qüestió, presentem la gràfica següent (**figura 31**), simbolitzant la dependència entre els paràmetres. Veient-lo a una determinada altura, sent en aquest cas la mínima possible, afavorint la coherència de comparació amb el primer material.

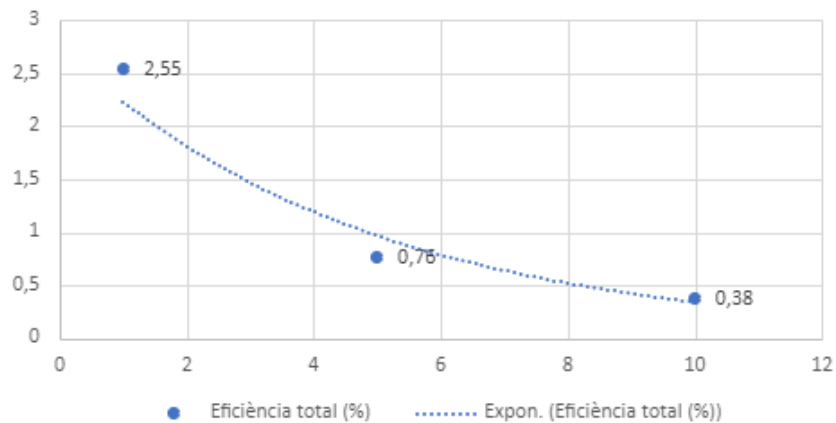


Figura 31: Eficiència en funció del gruix de la matriu d'1 mm del material de referència A22-002 en contacte íntim amb el detector. Font pròpia.

En comparació amb la primera mostra, s'observa la reproducció de la tendència de pèrdua d'eficiència. No obstant això, sent el segon material estudiat de menor activitat que el primer, l'eficiència a una mateixa altura és menor, fenomen que ens dirigeix feia unes certes limitacions de l'aparell en ús.

11.3 Interpretació de resultats

Un cop exposats els resultats de l'aplicació del disseny experimental, veiem que vam trobar més dificultats en el procés de la mesura d'un NORM en comparació a la mesura de substàncies quasi o totalment pures en quant a tipus de desintegració radioactiva que emeten, com poden ser el nitrat de potassi o el americi. En els dos casos anteriors, les partícules ionitzants que es detecten provenen del seu respectiu isòtop i d'un només, fent que l'energia de les partícules detectades sigui més o menys la mateixa .

Per tant, es pot arribar a determinar quina és l'altura perfecta pel tipus de radiació ionitzant que s'emet. Però, en el cas de les substàncies NORM trobem que hi ha una barreja d'isòtops, on cadascun d'aquests té una activitat, energia i tipus de desintegració diferent. Aquesta característica dels NORM resulta en un augment de dificultat a l'hora de saber l'impacte real que tenen els paràmetres modificats en l'eficiència de detecció. Això és degut a que, com hem dit abans, existeix una barreja d'isòtops i les condicions fixades no seran les més òptimes per tots els isòtops. No obstant aquesta situació, es poden observar les tendències de l'eficiència de detecció en funció dels paràmetres, destacant la seva semblança després de modificar l'altura tant en un material radioactiu pur com en un material de referència NORM. Així doncs, la millor eficiència s'aconsegueix amb un contacte íntim entre mostra i detector i un gruix petit de matriu.

D'altra banda, és cert que el detector no és gens eficient en discriminar els diferents tipus de desintegracions radioactives. Encara que a partir de la seva transferència lineal d'energia i trajectòria registrada podem saber quin és el tipus de cadascuna de les deteccions, el detector en si mateix no genera cap índex que dinamitzi el procés de comptatge de les partícules alfa, beta i fins i tot gamma.

IV. Conclusions

Al començar aquest treball, ens vam marcar uns objectius en base d'una hipòtesi inicial on ens plantejàvem la possibilitat de trobar uns paràmetres concrets que optimitzessin el procés de mesura de l'activitat de materials NORM utilitzant un detector Timepix.

Quan vam començar la investigació, creíem que la forma de mesurar del detector Timepix seria suficient com per determinar com es podrien gestionar les substàncies NORM. A mesura que es va anar avançant en el treball ens vam adonar que hi havia molts factors a tenir en compte i, la resposta a si havíem aconseguit aquest objectiu no era massa clara. Primer de tot, hem de tenir present que hi ha diverses fonts de radioactivitat, ja siguin naturals o artificials, que creen una exposició continuada a la radiació que afecta als éssers vius i a les mesures d'activitat que es vulguin fer d'un material, així provocant el que s'anomena radiació de fons la qual ha estat una limitació o, millor dit, un factor a tenir en compte.

D'altra banda, es coneix que hi ha diferents tipus de desintegracions radioactives i que aquestes es diferencien en energia i en com interaccionen amb la matèria en funció de les seves característiques. Les partícules alfa interaccionen molt amb la matèria i transmeten molta de la seva energia durant el procés, per tant es queden sense energia per continuar el seu recorregut i com a conseqüència tracen trajectòries curtes; les partícules beta al ser més petites interaccionen en un menor grau amb la matèria, per tant no transmeten tanta energia i penetren més en el medi, és a dir, experimenten trajectòries més llargues. Quan es detecta una partícula amb el Timepix és gràcies a aquestes diferents interaccions i formes de trajectòria que deixen al programa que podem distingir-les, però això, com hem demostrat a la part pràctica, també presenta una complicació a l'hora de detectar-les. Per tant, en canviar els factors d'altura i gruix de la mesura jugàvem amb aquestes diferents característiques, demostrant que quant més medi (aire o la pròpia matriu) es posi entremig de la font de partícules i la part sensora, més baixa és l'eficiència del detector. Per tant, amb aquest raonament, hem solucionat part dels nostres objectius; la forma més eficient per detectar radiació és amb matrius de gruix no molt elevat per evitar l'efecte de autoabsorció i amb la mínima altura possible entre detector i mostra per a que les partícules ionitzants, sobretot les alfa, puguin arribar a la part sensora.

En segon lloc, en relació amb el nostre segon objectiu i hipòtesi en general, era trobar la resposta a la pregunta de si era possible utilitzar el Timepix com eina per a la gestió de substàncies NORM. La resposta a aquesta pregunta és que aquest no és adient completament per la gestió d'aquest residus. Encara aquesta premissa, no significa que el detector no tingui cap funció en relació amb els residus NORM. S'ha demostrat que aquest aparell pot fer-se servir per calcular l'activitat d'una mostra només sabent el resultat de la mesura òptima (contacte íntim i gruix petit) feta amb el Timepix i la eficiència de detecció d'aquest en les condicions òptimes de l'experiment.

En canvi, quan es tracta de gestió d'aquests residus trobem el problema de que les normes de gestió de residus radioactius utilitzen la magnitud de dosis per saber com tractar amb aquests perquè, com s'ha dit abans, la dosis relaciona l'energia absorbida amb unitats de massa, com poden ser els quilograms, i permet quantificar d'alguna forma com aquesta exposició afectaria als humans. Específicament, la magnitud de dosi que s'utilitza és la dosis efectiva, la qual es presenta com la relació d'energia absorbida per unitat de matèria, però corregida amb el que s'anomenen factors de ponderació en funció de: quin òrgan o teixit està sent irradiat (els efectes de que el ronyó sigui irradiat no són els mateixos que quan les gònades són l'òrgan irradiat); segons el tipus de radiació que està interactuant amb el cos i tenint present el temps d'exposició a la font radioactiva.

Llavors, com afecta aquesta informació en el fet de que el Timepix no sigui adient per la tasca de gestió? Primer de tot el programa de PixetPro és molt rudimentari a l'hora de quantificar l'energia ja que ho fa partícula per partícula i s'ha d'estar individualment prenent dades d'energia. També és poc eficient en l'aspecte de discriminació de partícules, és a dir, el programa fa que si vols saber quantes partícules beta s'han registrat les hakis de comptar una a una, dificultant molt l'estudi de l'energia transmesa per cada tipus de radiació ionitzant amb l'objectiu d'aconseguir dades per utilitzar la magnitud de dosis efectiva.

En definitiva, el detector és més eficient a l'hora de mesurar l'activitat en les condicions de contacte íntim entre detector i material a investigar. Encara així, el software no és adient per la interpretació de resultats de detecció així dificultant la aplicació de gestió de NORM.

V. Bibliografía-Webgrafía

Ballabriga Suñer, R. (2021) *Introducción a los chips Medipix/Timepix: Tecnología y aplicaciones* [Presentació de PowerPoint].

https://indico.cern.ch/event/1052549/contributions/4467704/attachments/2290212/3893593/PresentationSpanishTeachersBallabriga_noAdditional.pdf

Baró, J. (2007). Interacción de las partículas cargadas con la materia. *Curso de formación de supervisores. Instalaciones radiactivas Fuentes no encapsuladas*. Universitat de Barcelona.

Connor, N. (2022, 9 març). *Qué es el detector de silicio - Principio de funcionamiento - Definición*. Radiation Dosimetry. Recuperat 11 d'abril de 2022, de <https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-el-detector-de-silicio-principio-de-funcionamiento-definicion/>

Consejo de Seguridad Nuclear. (s. f.). *Radiación natural y artificial - CSN*. Recuperat 12 d'abril de 2022, de <https://www.csn.es/radiacion-natural-y-artificial2>

Fonts naturals de Radiacions ionitzants. (2017, 2 novembre). Universitat de Barcelona. Recuperat 13 de desembre de 2022, de <http://www.ub.edu/spr/htm/fonts-naturals-2nov2017>

Gómez, C.-. E. M. (2014). *Cámaras de ionización*. Museo Virtual de la Ciencia del CSIC. Recuperat 15 d'abril de 2022, de https://museovirtual.csic.es/csic75/instrumentos/camara_ionizacion/camara_ionizacion.html

Gamo Pascual. (2008). Dosis de radiación. En *Módulo 0: Conceptos básicos sobre protección radiológicas*. Consejo de Seguridad Nuclear.

<https://www.csn.es/documents/10182/950714/Curso+General+de+Formaci%C3%B3n+de+Actuantes+en+Emergencias+Nucleares.+TEMA+00.+Conceptos+b%C3%A1sicos+sobre+protecci%C3%B3n+radiol%C3%B3gica>

Operating Regions of Ionizing Detectors – Detector Voltage. (s. f.). Nuclear Power. Recuperat 13 d'abril de 2022, de <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/radiation-detection/gaseous-ionization-detector/operating-regions-of-ionizing-detectors-detector-voltage/>

Planas. (2019, 24 octubre). *¿Qué son los rayos gamma?* Energía nuclear. Recuperat 2 de desembre de 2022, de <https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/radioactividad/rayos-gamma>

Rafecas, I. (2007). Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. En *Curso de formación de supervisores. Instalaciones radiactivas Fuentes no encapsuladas*. Universitat de Barcelona.

Rafecas, I. (2007). Detectores de centelleo. En *Curso de formación de supervisores. Instalaciones radiactivas Fuentes no encapsuladas*. Universitat de Barcelona.

Rafecas, I. (2007). Detectores de ionización gaseosa. En *Curso de formación de supervisores. Instalaciones radiactivas Fuentes no encapsuladas*. Universitat de Barcelona.

Rafecas, I. (2007). Detección y medidas de la radiación. En *Curso de formación de supervisores. Instalaciones radiactivas Fuentes no encapsuladas*. Universitat de Barcelona.

Residuos NORM - CSN. (s. f.). Consejo de Seguridad Nuclear. Recuperat 26 de novembre de 2022, de <https://www.csn.es/residuos-norm>

Ruíz. (2014, 28 març). *9 Detección y medida de la RI*. [Video]. YouTube. Recuperat 11 d'abril de 2022, de <https://www.youtube.com/watch?v=clujcFWLKzk>

Sánchez, C. (2007). La radiactividad. A *Curso de formación de supervisores. Instalaciones radiactivas Fuentes no encapsuladas*. Universitat de Barcelona.

Sánchez, C. (2007). Magnitudes y unidades radiológicas. En *Curso de formación de supervisores. Instalaciones radiactivas Fuentes no encapsuladas*. Universitat de Barcelona.

Transferencia lineal de energía. (s. f.). Sociedad Nuclear Española. Recuperat 5 d'octubre de 2022, de

<https://www.sne.es/diccionario-nuclear/transferencia-lineal-de-energia/>

United States Environmental Protection Agency (Octubre 24, 2022). *Radiation Sources and Doses*. Recuperat 30 de novembre de 2022, de

<https://www.epa.gov/radiation/radiation-sources-and-doses>

Universitat de Barcelona & ADMIRA. (2022). *Iniciació al Medipix. Estudi de la Radiació i les seves propietats. Comparació dels models clàssic i relativista en la radiació alfa i beta*. Servipartícules.

https://serviparticules.ub.edu/sites/serviparticules/files/2019-11/fitxer1_ActivitatPracticaTimepix_1.pdf

Wikipedia. (2022, 12 septiembere). *Esquema de desintegración*. Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperat 2 de diciembre de 2022, de

https://es.wikipedia.org/wiki/Esquema_de_desintegraci%C3%B3n

Wikipedia. (2020, 11 abril). *Material de referencia certificado*. Wikipedia. Recuperat 25 de noviembre de 2022, de

https://es.wikipedia.org/wiki/Material_de_referencia_certificado

Wikipedia. (2022a, 11 novembre). *Partícula alfa*. Wikipedia. Recuperat 2 de diciembre de 2022, de https://es.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADcula_alfa

Wikipedia. (2022b, 19 novembre). *Partícula beta*. Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperado 2 de diciembre de 2022, de

https://es.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADcula_beta

VI. Annex

7 = A22-001

5A = A22-002

No	Radionuclide	Activity concentration (Bq·kg ⁻¹)
7	K-40	345
7	Tl-208	126
7	Th-228 (Tl-208)	349
7	Bi-212	376
7	Pb-212	394
7	Ra-224 (Pb-212)	394
7	Bi-214	7605
7	Pb-214	8335
7	Ra-226	8604
7	Ac-228	272
7	Ra-228 (Ac-228)	272
5A	K-40	220
5A	Tl-208	269
5A	Th-228 (Tl-208)	750
5A	Bi-212	995
5A	Pb-212	861
5A	Ra-224 (Pb-212)	861
5A	Bi-214	2044
5A	Pb-214	2242
5A	Ra-226	2378
5A	Ac-228	1936
5A	Ra-228 (Ac-228)	1936

Presentació de càlculs de la segona pràctica:

- Període de semidesintegració del potassi 40 (^{40}K)

Per calcular la constant de semidesintegració $[\lambda]$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \rightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t}$$

- Les N_0 (número d'àtoms radioactius) s'anul·len. N correspon als àtoms radioactius que en aquell moment no s'ha desintegrat.
- t = període de semidesintegració del potassi 40 = $1,25 \cdot 10^9$ anys

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t} \rightarrow \ln \frac{1}{2} = -\lambda t \ln e \rightarrow -0,69 = -\lambda t$$

$$\lambda = 5,52 \cdot 10^{-10} \text{ anys}^{-1} = 1,75 \cdot 10^{-17} \text{ s}^{-1}$$

- Càlcul de l'activitat present a diferents mostres de nitrat de potassi

Abundància relativa de l'isòtop potassi 40 (^{40}K) = 0,017 %

$M(\text{KNO}_3) = 101,1 \text{ g/mol}$

$A(\text{activitat radiològica}) = \lambda N$

$$5 \text{ g } \text{KNO}_3 \cdot \frac{1 \text{ mol } \text{KNO}_3}{101,1 \text{ g } \text{KNO}_3} \cdot \frac{1 \text{ mol de K}}{1 \text{ mol } \text{KNO}_3} \cdot \frac{6,022 \cdot 10^{23} \text{ àtoms K}}{1 \text{ mol de } \text{KNO}_3} \cdot \frac{1,17 \cdot 10^{-2} \text{ } ^{40}\text{K}}{100 \text{ àtoms K}} =$$
$$= 3,48 \cdot 10^{18} \text{ àtoms de } ^{40}\text{K}$$

$$16 \text{ g } \text{KNO}_3 \cdot \frac{1 \text{ mol } \text{KNO}_3}{101,1 \text{ g } \text{KNO}_3} \cdot \frac{1 \text{ mol de K}}{1 \text{ mol } \text{KNO}_3} \cdot \frac{6,022 \cdot 10^{23} \text{ àtoms K}}{1 \text{ mol de } \text{KNO}_3} \cdot \frac{1,17 \cdot 10^{-2} \text{ } ^{40}\text{K}}{100 \text{ àtoms K}} =$$
$$= 1,115 \cdot 10^{19} \text{ àtoms de } ^{40}\text{K}$$

$$24 \text{ g } \text{KNO}_3 \cdot \frac{1 \text{ mol } \text{KNO}_3}{101,1 \text{ g } \text{KNO}_3} \cdot \frac{1 \text{ mol de K}}{1 \text{ mol } \text{KNO}_3} \cdot \frac{6,022 \cdot 10^{23} \text{ àtoms K}}{1 \text{ mol de } \text{KNO}_3} \cdot \frac{1,17 \cdot 10^{-2} \text{ } ^{40}\text{K}}{100 \text{ àtoms K}} =$$
$$= 1,81 \cdot 10^{19} \text{ àtoms de } ^{40}\text{K}$$

$$A(5g) = 3,48 \cdot 10^{18} \cdot 1,75 \cdot 10^{-17} = 60,9 \text{ Bq}$$

$$A(16g) = 1,115 \cdot 10^{19} \cdot 1,75 \cdot 10^{-17} = 195,17 \text{ Bq}$$

$$A(26g) = 1,81 \cdot 10^{19} \cdot 1,75 \cdot 10^{-17} = 316,75 \text{ Bq}$$

- Eficiència segons gruix i altura en matrius de nitrat de potassi

$$\text{Eficiència (\%)} = \frac{\text{comptes registrades/segon}}{\text{Activitat teòrica}} \cdot 100$$

$$\text{Eficiència en matriu d'1 mm} = \frac{1,8}{60,9} \cdot 100 = 2,94 \% \text{ (en contacte íntim)}$$

$$\text{Eficiència en matriu de 5 mm} = \frac{1,94}{195,17} \cdot 100 = 0,99 \% \text{ (en contacte íntim)}$$

$$\text{Eficiència en matriu de 10 mm} = \frac{2,072}{316,8} \cdot 100 = 0,65 \% \text{ (en contacte íntim)}$$

Presentació de càlculs de la tercera pràctica:

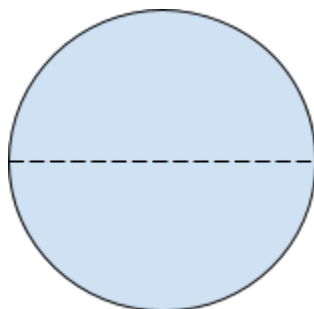
Activitat total NORM

$$A(A22-001) = 27081 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$A(A22-002) = 14492 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

- Estudi del volum del recipient i massa requerida

Placa de petri des de dalt



Diàmetre = 5 cm

Altura = 1 cm

$$S = \pi R^2 = \pi (2,5)^2 = 19,63 \text{ cm}^2$$

$$\rho = m/V$$

$$\text{a) A22-001} \quad \rho_1 = 0,935 \text{ g/cm}^3$$

Matriu d'1 mm

$$V_1 = 19,63 \cdot 10^{-1} = 1,963 \text{ cm}^3$$

$$m_1 = 1,963 \cdot 0,935 = 1,836 \text{ g}$$

$$A(1 \text{ mm}) = 1,836 \cdot 10^{-3} \cdot 27081 = 50,435 \text{ Bq}$$

$$\text{Eficiència (\%)} = \frac{\text{cps}}{\text{Activitat teòrica}} \cdot 100$$

$$\text{Eficiència màxima (altura 0 i gruix 1 mm)} = 1,874/50,435 \cdot 100 = 3,72 \%$$

$$\text{b) A22-002} \quad \rho_2 = 1,113 \text{ g/cm}^3$$

Matriu d'1 mm

$$V_2 = 19,63 \cdot 10^{-1} = 1,963 \text{ cm}^3$$

$$m_2 = 1,963 \cdot 1,113 = 2,19 \text{ g}$$

$$A(1 \text{ mm}) = 2,19 \cdot 10^{-3} \cdot 14492 = 31,73 \text{ Bq}$$

$$\text{Eficiència (\%)} = \frac{\text{cps}}{\text{Activitat teòrica}} \cdot 100$$

$$\text{Eficiència màxima (altura 0 i gruix 1 mm)} = 0,81/31,73 \cdot 100 = 2,55 \%$$