Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Tesis Doctoral

Metodología para la realización de un Laboratorio Diferido de un reactor nuclear de investigación RA-4.

Figallo Gabriela Belén

Director: Dr. Hernandez Jayo, Unai

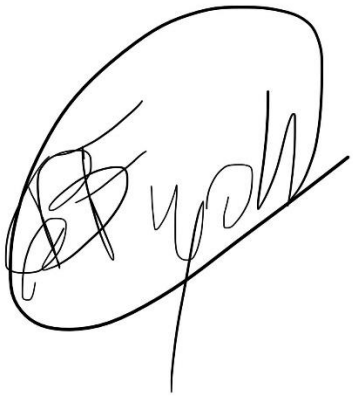
Miembros del Jurado: Dr. Garcia Loro, Felix – Dra. Clavijo, Silvia – Dra. Galassi, Mariel

Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de

Doctor en Ingeniería

Agosto de 2026

Certifico que el trabajo incluido en esta tesis es el resultado de tareas de investigación originales y que no ha sido presentado para optar a un título de postgrado en ninguna otra Universidad o Institución.



Figallo Gabriela

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero decirles a Delfi, Pedro y Santi que no existen palabras suficientes para agradecerles. Su amor incondicional, su paciencia infinita y su forma de entenderme en cada etapa de este camino fueron mi ancla y mi motor. Gracias por creer en mí, incluso en aquellos días en los que yo misma dudaba de mí. Este logro les pertenece tanto como a mí.

A mis padres y hermanos, gracias por ser mi raíz y mi sostén. Por enseñarme a no rendirme y a mirar siempre hacia adelante. Sus palabras, sus abrazos y su apoyo constante me recordaron, en cada paso, que nunca estaba sola.

A Unai, mi más profunda gratitud por su guía, por confiar en mí y por dedicar tanto tiempo y compromiso en acompañarme. Sus consejos, críticas constructivas y conocimientos marcaron un antes y un después en esta investigación. Gracias por impulsarme a ir más allá y por enseñarme tanto; fue un verdadero honor aprender a su lado.

A Luis R. y a Pablo O., por su apoyo técnico, sus aportes especializados vinculados a la plataforma LabsLand y la paciencia con la que acompañaron cada etapa de este proceso.

A Sonia, gracias por contagiarme su pasión por la investigación y por transmitirme con tanta generosidad sus saberes y entusiasmo.

A Oscar, por su confianza y por haberme dado la oportunidad de integrarme al IENRI. Su compromiso, su mirada inspiradora y su apoyo incondicional fueron motores esenciales en el desarrollo de este trabajo.

A Mauro, Yoli y a mis compañerxs de trabajo, gracias por hacer que cada día valiera la pena: por las ideas compartidas, las charlas, la colaboración y por construir juntos un espacio donde crecer.

A mis amigas, gracias por ser mi refugio fuera del mundo académico: por las risas, las charlas, los momentos de desconexión y la complicidad que me devolvía energía para seguir.

Y a todos los que, de una u otra forma, estuvieron presentes: gracias por ser parte de esta GRAN historia.

Gaby

RESUMEN

Este trabajo se desarrolla en el Instituto de Estudios Nucleares y Radiaciones Ionizantes (IENRI) de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) de la Universidad Nacional de Rosario (UNR), institución dedicada a promover el avance y la aplicación de la tecnología nuclear. El Reactor RA-4, un reactor nuclear de investigación de baja potencia, constituye un recurso esencial para la docencia, la investigación y la formación de profesionales especializados. El IENRI posibilita el estudio materiales irradiados, calibración de detectores y realización de ensayos asociados a la producción de radioisótopos. Durante los períodos de aislamiento derivados de la pandemia, se evidenciaron limitaciones críticas para sostener las prácticas experimentales presenciales, especialmente aquellas orientadas a la caracterización de radiación gamma mediante espectrometría. Esta situación puso de manifiesto la necesidad de contar con soluciones tecnológicas que garantizaran el acceso continuo a experiencias experimentales reales aun en escenarios remotos o descentralizados. El presente trabajo propone el diseño, desarrollo e implementación de un Laboratorio Remoto Diferido de Radiactividad orientado al RA-4 y especializado en experimentos de espectrometría gamma. La propuesta integra hardware y software para posibilitar el control remoto de equipos, la adquisición automática de datos, su procesamiento y la visualización de resultados en modalidad diferida. El desarrollo aborda aspectos clave como la compatibilidad con los sistemas de medición, la implementación de protocolos de comunicación seguros y la incorporación de mecanismos de monitoreo que aseguren la fiabilidad, seguridad y trazabilidad de las experiencias. En síntesis, este proyecto busca fortalecer y expandir las capacidades educativas y de investigación del RA-4 mediante tecnologías digitales que habiliten nuevas modalidades de acceso, modernizando y democratizando la experimentación en física nuclear.

Palabras Claves: Espectrometría Gamma, Laboratorio Remoto, Laboratorio Diferido

ABSTRACT

This work is carried out at the Institute of Nuclear Studies and Ionizing Radiations (IENRI) of the Faculty of Exact Sciences, Engineering, and Land Surveying (FCEIA) at the National University of Rosario (UNR), an institution dedicated to promoting the advancement and application of nuclear technology. The RA-4 Reactor, a low-power nuclear research reactor, constitutes an essential resource for teaching, research, and the training of specialized professionals. The IENRI enables the study of irradiated materials, the calibration of detectors, and the execution of tests associated with radioisotope production. During the periods of isolation caused by the pandemic, critical limitations emerged in sustaining in-person experimental practices, particularly those focused on gamma-radiation characterization through spectrometry. This situation underscored the need for technological solutions capable of ensuring continuous access to real experimental experiences, even in remote or decentralized scenarios. Accordingly, this work proposes the design, development, and implementation of a Deferred Gamma Spectrometry Laboratory oriented toward the RA-4 and specialized in gamma-spectrometry experiments. The proposal integrates hardware and software to enable remote equipment control, automatic data acquisition, data processing, and deferred-mode result visualization. The development addresses key aspects such as compatibility with measurement systems, the implementation of secure communication protocols, and the incorporation of monitoring mechanisms that ensure the reliability, safety, and traceability of experimental activities. In summary, this project aims to strengthen and expand the educational and research capabilities of the RA-4 by leveraging digital technologies that enable new modalities of access, modernizing and democratizing experimentation in nuclear physics.

Keywords: Gamma Spectrometry, Remote Laboratory, Deferred Laboratory

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS 3
RESUMEN 4
ABSTRACT 5
LISTA DE FIGURAS 9
LISTA DE TABLAS 11
GLOSARIO 12
CAPÍTULO 1. INTRODUCCION 13
1.1 Antecedentes y Motivación 14
1.2 El Problema de la Investigación 15
1.3 Objetivos 16
1.4 Metodología 16
1.5 Organización y Estructura de la Tesis 18
1.6 Síntesis 18
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE 21
2.1 Procesos Radiactivos 21
2.1.1 Decaimiento alfa 22
2.1.2 Decaimiento beta 22
2.1.3 Decaimiento gamma 23
2.1.4 Ley de desintegración radiactiva *23*
2.2 Reacciones Nucleares 25
2.2.1 Fusión Nuclear 26
2.2.2 Fisión Nuclear 26
2.3 Reactores Nucleares 27
2.4 Espectrometría 32
2.4.1 Detectores de centelleo 34
2.4.2 Fotomultiplicador 37
2.4.3 Blindajes 39
2.5 Estudio Experimental de Espectrometría Gamma 40
2.6 Laboratorio Tradicional 42
2.7 Sistemas de Gestión de Laboratorios Remotos (RLMS) 50
2.8 Laboratorio Remoto 50
2.9 Laboratorio Diferido 58

2.10 Laboratorios Virtuales 61
2.11 Ejemplos de Laboratorios Remotos y Repositorios 65
2.11.1 Laboratorio Remoto del Grupo Galileo 66
2.11.2 Go – Lab 68
2.11.3 e-Laboratory Project 69
2.11.4 RemLabNet 71
2.11.5 LabsLand 72
2.11.6 LabRem-FCEIA 74
2.12 Revisión Comparativa de Laboratorios Remotos 77
2.13 Conclusión 79
CAPITULO 3. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL LABORATORIO DIFERIDO 83
3.1 Introducción 83
3.2 Enfoque Metodológico 84
3.3 Análisis de requisitos 86
3.4 Diseño y Montaje 87
3.4.1 Capa de adquisición de datos 88
3.4.2 Capa de gestión de datos 88
3.4.3 Capa de interfaz de usuario 89
3.4.4 Capa de análisis y visualización de resultados 89
3.5 Desarrollo de la Interfaz 89
3.6 Arquitectura del LD 90
3.6.1. Integración con el Laboratorio Tradicional *93*
3.6.2 Componentes fundamentales de la arquitectura del Laboratorio Diferido de Radiactividad *93*
3.7 Validación y Optimización 96
3.8 Conclusión 98
CAPITULO 4 IMPLEMENTACION DEL LABORATORIO DIFERIDO DE RADIACTIVIDAD 101
4.1 Contexto Experimental 101
4.2 Procedimiento de Adquisición de Datos en el Laboratorio Diferido 102
4.3 Diseño Experimental 103
4.3.1 Montaje del sistema experimental 105
4.3.2 Registro de datos 105
4.3.3 Interfaz de usuario 109
4.3.4 Acceso e interacción con el LD 110

4.4 Guía Práctica del LD 116
4.5 Encuestas Realizadas a los Usuarios 117
4.6 Indicadores Técnicos de Rendimiento de la Interfaz Web 118
4.7 Conclusiones 119
CAPITULO 5. VALIDACION DEL LABORATORIO DIFERIDO 121
5.1 Introducción 121
5.2 Validación Técnica 122
5.3 Validación Pedagógica y de Experiencia 123
5.4 Discusión 127
5.5 Conclusión 128
CAPITULO 6. CONCLUSIONES 131
6.1 Validación de los Objetivos 131
6.1.1 Identificación de variables experimentales críticas 131
6.1.2 Estandarización de protocolos de registro y trazabilidad 131
6.1.3 Diseño de una arquitectura tecnológica modular 131
6.1.4 Implementación de una interfaz web accesible 132
6.1.5 Validación comparativa de datos diferidos y mediciones directas 132
6.1.6 Propuesta de modelo replicable y escalable 132
6.2 Conclusiones y Futuras Líneas 133
6.3 Publicaciones realizadas durante el trabajo de investigación 134
BIBLIOGRAFIA 137
ANEXO A: GUIA PRACTICA QUE ACOMPAÑA AL LD 145
ANEXO B: VIDEO DE INICIO EN LA PANTALLA PRINCIPAL DEL LD 161
ANEXO C: ENCUESTA UXQ4RL VERSIÓN 1.0 162
ANEXO D: ENCUESTA A DOCENTES 163

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología aplicada. Fuente: elaboración propia. 17
Figura 2. Representación de la generación de energía a partir de una reacción de fusión nuclear. (Colwell et al., 2002)..... 26
Figura 3. Esquema simplificado del proceso de fisión. (Scanlon et al., 2004)..... 27
Figura 4. Esquema conceptual de un reactor nuclear. Fuente: elaboración propia. 29
Figura 5. Corte transversal del Reactor RA-4. Fuente: informes internos 31
Figura 6. Corte a 90° del Reactor RA-4. Fuente: informes internos 31
Figura 7. Espectro de altura de pulsos del ^{137}Cs tomado con un detector centellador (Errico et al., 2023). 33
Figura 8. Diagrama esquemático de un sistema detector de radiación en base a un material centellador (Errico et al., 2023)..... 35
Figura 9. Cristal centellador acoplado al tubo fotomultiplicador en una unidad detectora típica (Errico et al., 2023). 39
Figura 10. Laboratorio Tradicional. Fuente: elaboración propia. 43
Figura 11. Fuente Radiactiva de ^{137}Cs. Fuente: elaboración propia..... 44
Figura 12. Dispositivo Experimental. Fuente: elaboración propia. 44
Figura 13. Placas de Pb con espesores variables. Fuente: elaboración propia. 45
Figura 14. Placas de Fe con espesores variables. Fuente: elaboración propia..... 45
Figura 15. Placas de Al con espesores variables. Fuente: elaboración propia. 45
Figura 16. Esquema de la disposición experimental. Fuente: elaboración propia. 46
Figura 17. Arquitectura general de un LR (Arguedas Matarrita & Concari, 2018) 57
Figura 18. Experimentos con circuitos RC, RL y RLC en estado transitorio (García Zubía & Alves, 2011) 66
Figura 19. Experiencias de cinemática y dinámicas de rotación y traslación de un volante a lo largo de un carril inclinado (García Zubía & Alves, 2011). 67
Figura 20. Mediciones del campo magnético generado por un solenoide (García Zubía & Alves, 2011). 67
Figura 21. Arquitectura del Laboratorio Remoto (García Zubía & Alves, 2011)..... 68
Figura 22. Página de Go-Lab (thttps://www.golabz.eu/) 69
Figura 23. Página del e-Laboratory Project (http://www.ises.info/index.php/en). 70
Figura 24. Arquitectura cliente–servidor del laboratorio remoto basado en ISES (Schauer et al., 2008). 70
Figura 25. Página de RemLabNet; Physics experiments (Spilakova & Schauer, 2015). 71
Figura 26. Arquitectura REMLABNET (Schauer et al., 2016). 72
Figura 27. Página Web de LabsLand. https://labsland.com/es. 73
Figura 28. Laboratorio Diferido de Queensland. https://labsland.com/es. 74
Figura 29. Página Web de LabRem-FCEIA. https://labremf4a.fceia.unr.edu.ar/labrem/. 75
Figura 30. Página de mediciones nucleares de la Universidad de Tucumán. https://labremf4a.fceia.unr.edu.ar/labrem/. 76
Figura 31. Proceso metodológico. Fuente: elaboración propia. 86
Figura 32. Arquitectura Modular de un LD. Fuente: elaboración propia. 92
Figura 33. Arquitectura del laboratorio diferido. Fuente: elaboración propia. 95
Figura 34. Procedimiento del uso del LD. Fuente: elaboración propia. 102
Figura 35. Procedimiento del diseño experimental. Fuente: elaboración propia. 103
Figura 36. Esquema conceptual del diseño experimental. Fuente: elaboración propia. 106
Figura 37. Fotograma del video Asociado a cada medición. Fuente: elaboración propia..... 107

Figura 38. Relación entre HTML5, CSS3 y JavaScript. Fuente: elaboración propia. 110
Figura 39. Pantalla Principal del LD. https://labsland.com/es..... 111
Figura 40. Configuración. Selección de Fuente. https://labsland.com/es..... 112
Figura 41. Configuración. Selección de Blindaje. https://labsland.com/es..... 113
Figura 42. Configuración. Selección de espesor del blindaje y tiempo. https://labsland.com/es. 113
Figura 43. Observación de las variables seleccionadas. https://labsland.com/es. 114
Figura 44. Fotograma del video con las variables seleccionadas. https://labsland.com/es. 115
Figura 45.Espectro correspondiente a las variables seleccionadas. https://labsland.com/es. 115
Figura 46. Procedimiento de Validación. Fuente: elaboración propia. 123
Figura 47. Valoraciones de las encuestas. Fuente: elaboración propia. 126

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas de los LR. Fuente: elaboración propia. 52
Tabla 2. Limitaciones de los LR. Fuente: elaboración propia. 52
Tabla 3. Clasificación de los laboratorios remotos. Adaptado de (Bencomo, 2002) 53
Tabla 4. Extensión de la clasificación de los laboratorios remotos. Adaptado (Gomes & Bogosyan, 2009) 54
Tabla 5. Ventajas de un LD. Fuente: elaboración propia. 59
Tabla 6. Limitaciones de los LD. Fuente: elaboración propia. 60
Tabla 7. Ventajas de los LV. Fuente: elaboración propia. 62
Tabla 8. Limitaciones de los LV. Fuente: elaboración propia. 62
Tabla 9. Comparación entre los distintos Laboratorios. Fuente: elaboración propia. 63
Tabla 10. Cuadro comparativo de las distintas plataformas. Fuente: elaboración propia. 78
Tabla 11. Excel de seguimiento de Resultados. Fuente: elaboración propia. 88
Tabla 12. Análisis comparativo de arquitecturas en laboratorios en línea. Fuente: elaboración propia. 90
Tabla 13. Herramientas para obtener indicadores. Fuente: elaboración propia. 97
Tabla 14. Clasificación de VI y VD. Fuente: elaboración propia. 104
Tabla 15. Archivo de seguimiento de los resultados obtenidos. Fuente: elaboración propia. 107
Tabla 16. Estructura del cuestionario. Fuente: elaboración propia. 117
Tabla 17. Dimensiones evaluadas mediante UXQ4RL. Fuente: elaboración propia 124

GLOSARIO

LR: Laboratorio Remoto

LD: Laboratorio Diferido

LV: Laboratorio Virtual

IENRI: Instituto de Estudios Nucleares y Radiaciones Ionizantes

A: Actividad radiactiva

λ: Constante de decaimiento

N: Cantidad de núcleos radiactivos

α: Partículas alfa

β: partículas beta

γ: radiación gamma

PMT: Tubo Fotomultiplicador

μ: coeficiente de atenuación lineal

^{137}Cs: Cesio 137

^{133}Ba: Bario 133

NaI(Tl): Yoduro de sodio activado con talio.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCION

El estudio de los fenómenos nucleares exige infraestructura experimental de alta complejidad, cuyo acceso está condicionado por protocolos de seguridad radiológica, elevados costos operativos y disponibilidad limitada de instalaciones críticas. En particular, el reactor nuclear de investigación RA-4 del Instituto de Estudios Nucleares y Radiaciones Ionizantes (IENRI), constituye un recurso de gran valor para la docencia y la investigación, pero su uso se ve restringido por factores regulatorios, de mantenimiento y de coordinación operativa. Estas limitaciones afectan la continuidad de las actividades experimentales, especialmente en espectrometría gamma. En este contexto, resulta necesario desarrollar soluciones tecnológicas que permitan ampliar el acceso a resultados experimentales confiables sin comprometer la seguridad operacional y trazabilidad de los datos. Los laboratorios remotos (LR) han representado un primer avance, al posibilitar el control a distancia del equipamiento en tiempo real. Sin embargo, la disponibilidad sincrónica de recursos, la saturación de concurrencias y la dependencia de la conectividad limitan su escalabilidad (Inoñan Moran et al., 2023). El Laboratorio Diferido (LD) surge entonces como una propuesta complementaria, orientada a la reutilización sistemática de datos experimentales adquiridos bajo condiciones controladas y estandarizadas. Este enfoque no sustituye la experimentación presencial ni el LR, sino que introduce un modelo complementario que permite: garantizar la trazabilidad y reproducibilidad de las mediciones, optimizar el uso de equipamiento costoso y sensible mediante adquisiciones planificadas, permitir la integración modular con plataformas digitales de acceso remoto, y minimizar riesgos asociados a la manipulación directa de material radiactivo. La pertinencia de este tipo de desarrollos se comprende mejor al situarlos en el marco de la Industria 4.0. A nivel internacional, la adopción de competencias digitales ha demostrado mejorar la productividad, la innovación y la sostenibilidad económica, aunque enfrenta barreras ligadas a brechas educativas y resistencia cultural (Hoyos et al., 2024). En el caso de Argentina, la investigación sobre pymes industriales evidencia que la mayoría se encuentra en etapas iniciales de madurez digital, condicionadas por altos costos de inversión, limitaciones de financiamiento y dependencia de proveedores especializados, lo que obstaculiza la competitividad y la incorporación sostenida de tecnologías avanzadas (Blanc et al., 2024). Finalmente, resalta que la Industria 4.0 debe entenderse como un sistema tecnológico en el que interactúan proveedores locales, usuarios, instituciones y políticas públicas, y donde la escalabilidad de soluciones, la construcción de capacidades adaptativas y el fomento a la oferta nacional resultan centrales para cerrar brechas de productividad

(Franco et al., 2024). En esta línea, el LD propuesto no solo optimiza el uso del reactor RA-4 y democratiza el acceso a datos experimentales sino que también puede interpretarse como una contribución al incremento de la madurez digital en el ámbito nuclear. Al articular infraestructura crítica con herramientas de gestión tecnológica y provisión asincrónica de datos, el LD se alinea con los principios de la Industria 4.0 potenciando la formación de competencias digitales y fortaleciendo las capacidades locales para la innovación tecnológica. Por lo que se propone el desarrollo de una metodología, diseño e implementación de un Laboratorio Diferido de Radiactividad basado en el reactor RA-4. La solución incluye la definición de un modelo de arquitectura tecnológica que contempla sistemas de adquisición y digitalización de espectros, protocolos de almacenamiento en bases de datos estructuradas, interfaz de usuario web para selección de variables experimentales y descarga de resultados, así como estrategias de validación que aseguren la fidelidad de los datos frente a modelos teóricos y mediciones presenciales. Este enfoque posiciona al LD no solo como una herramienta educativa, sino como un instrumento estratégico replicable en otros contextos donde se requiera compatibilizar acceso abierto, seguridad radiológica y optimización de recursos experimentales.

1.1 Antecedentes y Motivación

El uso de reactores de investigación como el RA-4 del IENRI está condicionado por múltiples factores técnicos y regulatorios. Entre ellos se destacan la seguridad radiológica, la necesidad de personal especializado para la operación, la disponibilidad restringida de las fuentes radiactivas y disponibilidad de detectores. Estas condiciones generan cuellos de botella que limitan la realización de experiencias. En paralelo, las soluciones tecnológicas existentes, como los laboratorios tradicionales (LT), laboratorios virtuales simulados (LV) y laboratorios remotos (LR), presentan ciertas limitaciones.

Los LT implican costos elevados de operación, mantenimiento y seguridad. Los LV, basados en simulaciones, carecen del rigor de los datos reales. Los LR en tiempo real, requieren conectividad continua y disponibilidad sincrónica del equipamiento, lo que reduce su escalabilidad. En este contexto, el LD se orienta a la captura, registro y sistematización de datos experimentales bajo protocolos de adquisición bien definidos, para su posterior reutilización en entornos asincrónicos. De esta manera se optimizan los recursos experimentales, se asegura la reproducibilidad y trazabilidad de los ensayos, bajo condiciones estandarizadas, se extiende la vida útil de los datos experimentales, favoreciendo su análisis

en escenarios múltiples (formación, validación de modelos, transferencia tecnológica), se garantiza la seguridad operativa, reduciendo la manipulación innecesaria de material radiactivo. Por lo que la motivación central de este trabajo es, entonces, desarrollar e implementar una metodología tecnológica robusta y escalable que permita ampliar la accesibilidad al estudio de la radiación gamma en el RA-4, con criterios de eficiencia, seguridad y sostenibilidad.

1.2 El Problema de la Investigación

Uno de los principales retos radica en maximizar el uso de instalaciones críticas, como el reactor de investigación RA-4, sin comprometer la seguridad radiológica ni la disponibilidad operativa del sistema. En este sentido, las modalidades experimentales convencionales presentan limitaciones importantes: los laboratorios presenciales requieren personal capacitado, instrumentación especializada y estrictos procedimientos de seguridad, lo que restringe su accesibilidad y continuidad. A su vez, los LR en tiempo real dependen de una operación síncrona y de la administración de accesos concurrentes, generando restricciones de disponibilidad y potenciales cuellos de botella para los usuarios. Las simulaciones virtuales, aunque económicas, carecen del rigor y de la variabilidad inherentes a los datos experimentales reales, limitando su valor en la validación de modelos físicos o en aplicaciones de transferencia tecnológica. Frente a este escenario, el problema central que aborda esta tesis es: ¿Cómo desarrollar e implementar un sistema ingenieril capaz de garantizar la adquisición, gestión y provisión asincrónica de datos experimentales de espectrometría gamma, de manera segura, reproducible y escalable, optimizando el uso del reactor RA-4?
En respuesta a esta problemática, la tesis propone el diseño de una arquitectura tecnológica modular que integre hardware y software; el desarrollo de mecanismos de registro, almacenamiento y trazabilidad de datos experimentales con estándares de interoperabilidad; y la implementación de una interfaz de usuario web funcional y segura que replique la lógica de un laboratorio real. Finalmente, se plantea la validación de un modelo replicable y escalable a otras instalaciones nucleares o laboratorios de alta complejidad, orientado a la optimización de recursos críticos. En este sentido, el aporte central de la investigación es ofrecer una solución innovadora para la gestión digital de prácticas experimentales en física nuclear, contribuyendo al diseño de sistemas distribuidos, seguros y sostenibles en el tiempo.

1.3 Objetivos

Se propone como objetivo general de esta tesis, desarrollar una metodología de diseño e implementación de un Laboratorio Diferido de espectrometría gamma en el reactor nuclear RA-4, que garantice seguridad radiológica, trazabilidad de datos, reproducibilidad experimental y accesibilidad asíncrona mediante una arquitectura tecnológica modular, escalable y replicable en otros entornos de alta complejidad.

Para el logro de este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Identificar variables experimentales críticas: fuentes radiactivas, blindajes, espesores y tiempos de adquisición.
- Estandarizar protocolos de registro y trazabilidad de datos experimentales para garantizar validez y reproducibilidad.
- Diseñar una arquitectura tecnológica modular que integre adquisición, bases de datos, interfaz y comunicación segura.
- Implementar una interfaz web accesible.
- Validar el sistema mediante pruebas comparativas entre datos diferidos y mediciones directas.
- Proponer un modelo replicable y escalable aplicable a otras instituciones y/o laboratorios de alta complejidad.

1.4 Metodología

El logro de los objetivos específicos mencionados requiere el diseño y seguimiento de una metodología firme en su enfoque y versátil en su aplicación. Las principales fases se describen a continuación y se muestran en la Figura 1.

- Fase de Exploración: Esta fase inicial implica la formulación de la hipótesis y el desarrollo de los objetivos específicos.
- Estado del Arte: Esta fase sitúa la hipótesis y los objetivos específicos dentro del contexto de la investigación existente. Se realiza una revisión exhaustiva de la literatura centrada en los laboratorios remotos.
- Diseño e Implementación: Durante esta fase se diseña e implementa la arquitectura propuesta. El desarrollo de un prototipo es fundamental, ya que sirve como base para las validaciones posteriores y constituye, en sí mismo, una forma de validación.

- Validación: El proceso de validación abarca validaciones técnicas, pedagógicas y de experiencia de usuario. La validación técnica implica la creación del prototipo, mientras que las validaciones pedagógicas y de experiencia de usuario se llevan a cabo mediante encuestas administradas a los estudiantes que interactúan con el prototipo.
- Análisis y Resultados: Esta fase consiste en analizar los datos y comentarios obtenidos durante la fase de validación. Los resultados se utilizan para evaluar la eficacia de la arquitectura y su alineación con los objetivos específicos.
- Reflexión: Esta fase implica reflexionar sobre el conocimiento adquirido a lo largo del proceso de investigación, considerando las implicancias de los resultados y los hallazgos generales del estudio.
- Conclusiones: La fase final consiste en extraer conclusiones basadas en todo el proceso de investigación, validando la hipótesis original y resumiendo los principales hallazgos y contribuciones de la tesis.



Figura 1. Metodología aplicada. Fuente: elaboración propia.

1.5 Organización y Estructura de la Tesis

Este trabajo se organiza en seis capítulos:

- **Capítulo 1. Introducción:** se presentan el contexto general, los antecedentes del problema, la motivación del estudio, los objetivos, la hipótesis de trabajo y la estructura del documento.
- **Capítulo 2. Fundamentos teóricos de la Radiactividad y laboratorios:** se describen los principios básicos de la física nuclear y la espectrometría gamma, así como los fundamentos de la educación experimental y las tecnologías asociadas a los entornos virtuales y remotos. A su vez se describe la evolución de los laboratorios educativos, incluyendo experiencias internacionales en laboratorios remotos y simulados y se presentan las principales plataformas y repositorios existentes.
- **Capítulo 3. Propuesta metodológica de Laboratorio Diferido:** se desarrolla el modelo conceptual y técnico del Laboratorio Diferido.
- **Capítulo 4. Resultados Experimentales**: se presentan los resultados obtenidos del desarrollo, la implementación y validación del Laboratorio Diferido de Radiactividad.
- **Capítulo 5. Validación del Laboratorio Diferido:** se resumen los hallazgos principales, se discuten los beneficios y limitaciones de la propuesta y se sugieren líneas futuras de trabajo e implementación.
- **Capítulo 6: Conclusiones:** reúne las conclusiones generales del trabajo y las perspectivas de continuidad del desarrollo.

1.6 Síntesis

El presente capítulo expuso el contexto general y las motivaciones que fundamentan esta investigación. Se identificó como problema central la dificultad de maximizar el aprovechamiento del reactor nuclear RA-4 debido a restricciones operativas, de seguridad radiológica y de escalabilidad en el acceso a datos experimentales. Las alternativas existentes como el laboratorio presencial, el laboratorio remoto en tiempo real o los laboratorios simulados, resultan insuficientes para resolver estas limitaciones en su conjunto. Ante este escenario, se planteó como solución el diseño, desarrollo e implementación de un LD de espectrometría gamma, basado en la adquisición estandarizada de datos experimentales, su gestión digital y la provisión asincrónica mediante una interfaz tecnológica. Por lo que el aporte de la tesis radica en el desarrollo de una metodología integral y una arquitectura modular que

garantizan seguridad, trazabilidad y reproducibilidad de los resultados, y que además es escalable y replicable en otras instalaciones críticas. De este modo, el capítulo sienta las bases conceptuales y técnicas que guiarán el desarrollo y validación del LD en los capítulos siguientes, posicionándolo como una propuesta innovadora en la gestión digital de laboratorios nucleares.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se abordan los conceptos fundamentales que sustentan la experimentación académica, en investigación y docencia de la espectrometría gamma.
Se describen los principios básicos de la radiactividad, los distintos tipos de decaimientos nucleares, las reacciones nucleares y el funcionamiento del reactor RA-4, así como las mediciones nucleares que pueden llevarse a cabo en dicho contexto. Asimismo, se describen los tipos de laboratorio que son alternativas del laboratorio experimental tradicional. Estos contenidos tienen como objetivo proporcionar el marco teórico necesario para contextualizar el trabajo de investigación desarrollado en esta tesis, sirviendo además como base conceptual para las actividades experimentales realizadas en las sesiones prácticas de laboratorio.

2.1 Procesos Radiactivos

El descubrimiento de la radiactividad se remonta a 1896, cuando Henri Becquerel observó que ciertas sales de uranio emitían radiaciones espontáneas capaces de impresionar placas fotográficas, ionizar gases y penetrar materiales opacos, incluso en ausencia de estímulos externos. Este fenómeno, inicialmente denominado "radiaciones uránicas", sentó las bases para investigaciones posteriores. Marie y Pierre Curie profundizaron en estos hallazgos y, mediante técnicas de separación química, identificaron dos elementos con mayor actividad intrínseca: el polonio (Po) y el radio (Ra), cuyas propiedades radiactivas superaban en órdenes de magnitud a las del uranio (Poenaru et al., 2022). Con el tiempo, se estableció que las emisiones radiactivas se clasifican en tres tipos fundamentales: partículas alfa (α), partículas beta (β) y radiación gamma (γ), las cuales se diferencian principalmente por su poder de penetración y su carga eléctrica. Estas formas de radiación presentan una capacidad ionizante al interactuar con la materia, fenómeno que puede ser cuantificado mediante dispositivos como el electroscopio y diversos tipos de detectores. La mayoría de estos detectores son de naturaleza eléctrica, lo que implica que en alguna etapa del proceso, la información correspondiente a la radiación incidente es convertida en un pulso eléctrico. Dicho pulso es posteriormente conformado y analizado a través de sistemas electrónicos, lo que permite un procesamiento de la información que se caracteriza por su rapidez, seguridad, precisión y eficiencia económica. Estudios experimentales demostraron que la actividad radiactiva (A), definida como el número de desintegraciones por unidad de tiempo, es proporcional a la masa del material (m), relación expresada matemáticamente como $A = \lambda N$ donde, N representa el

número de átomos radiactivos y λ la constante de desintegración. Esta relación describe el proceso de decaimiento radiactivo, según el cual la probabilidad de que un núcleo inestable se desintegre por unidad de tiempo es constante, dando origen a una ley exponencial de decaimiento que caracteriza la evolución temporal de la radiactividad. Dicha dependencia confirmó que la radiactividad es un fenómeno de naturaleza atómica, vinculado a la inestabilidad nuclear. La emisión de partículas α y β induce modificaciones en la estructura del núcleo atómico, alterando su número atómico y másico, lo que conduce a la formación de nucleidos hijos distintos del original. Estas transformaciones, catalogadas como procesos nucleares, explican la generación de isótopos no presentes en la naturaleza y justifican cambios en las propiedades fisicoquímicas de los materiales sometidos a irradiación. Así, la radiactividad se consolida como un mecanismo de transmutación elemental, sustentado en el principio del decaimiento radiactivo, con implicaciones en campos como la geocronología, la medicina nuclear y la energía atómica.

2.1.1 Decaimiento alfa

El decaimiento alfa es un proceso radiactivo mediante el cual un núcleo padre inestable experimenta una transformación nuclear, emitiendo una partícula alfa y generando como producto un núcleo hijo con número atómico reducido en dos unidades y número másico disminuido en cuatro. Una partícula alfa es un núcleo de helio-4 (^4He), compuesto por dos protones y dos neutrones fuertemente unidos. Debido a su masa relativamente elevada, las partículas alfa presentan una baja capacidad de penetración, lo que resulta en una rápida pérdida de energía al interactuar con la materia.

2.1.2 Decaimiento beta

El decaimiento beta es un proceso de desintegración radiactiva mediante el cual un núcleo atómico inestable transforma un nucleón (protón o neutrón) para alcanzar una configuración más estable, emitiendo en el proceso una partícula beta (β) y un antineutrino o neutrino. Este fenómeno se manifiesta en dos variantes principales: el proceso mediante el cual un neutrón se convierte en un protón, acompañado por la emisión de un par electrón-antineutrino (decaimiento β^-), o en el cual un protón se transforma en un neutrón, acompañado por la emisión de un par positrón-neutrino (decaimiento β^+). A diferencia del decaimiento alfa

(gobernado por la interacción fuerte), la beta es mediado por la fuerza nuclear débil.(Sears & Zemansky, 2019).

2.1.3 Decaimiento gamma

El decaimiento gamma es un proceso de desintegración radiactiva en el que un núcleo atómico en un estado excitado libera energía en forma de radiación electromagnética de alta frecuencia, denominada fotón gamma (γ). Permite al núcleo alcanzar un estado energético más estable al transitar de un nivel de energía elevado a uno inferior. Es decir, la energía interna de un núcleo atómico se encuentra cuantificada, manifestándose a través de un conjunto discreto de niveles energéticos permitidos. Estos incluyen un estado fundamental y múltiples estados excitados, caracterizados por una mayor energía interna. Como consecuencia de la intensidad de las interacciones nucleares, las energías de excitación en núcleos típicamente alcanzan magnitudes del orden de 1 MeV (mega-electrónvoltios).

En procesos físicos y químicos convencionales, el núcleo permanece invariablemente en su estado fundamental, dado que las energías involucradas en dichas transformaciones son insuficientes para inducir transiciones a niveles excitados. Sin embargo, cuando un núcleo es sometido a condiciones de alta energía, ya sea mediante el bombardeo con partículas aceleradas o como resultado de una transformación radiactiva previa (como desintegraciones alfa o beta), puede acceder a un estado excitado. Posteriormente, este núcleo inestable tiende a relajarse hacia su estado fundamental mediante la emisión de radiación electromagnética de alta frecuencia, conocida como fotones gamma (γ). La energía de estos fotones se encuentra típicamente en el rango de 10 keV a 5 MeV, correspondiendo a la diferencia energética entre los estados nucleares involucrados en la transición (Sears & Zemansky, 2019).

2.1.4 Ley de desintegración radiactiva

La ley de desintegración radiactiva se utiliza para predecir cómo cambia la cantidad de material radiactivo con el tiempo. La tasa de decaimiento de un núcleo en un intervalo de tiempo dado se caracteriza por una constante, representada por λ, medida en segundos. Esta constante indica que el número de desintegraciones es directamente proporcional a la cantidad de núcleos radiactivos, N. La actividad radiactiva A se expresa en unidades del Sistema Internacional como becquerel (Bq), equivalente a una desintegración por segundo (s^{-1}) y se expresa mediante la ecuación (1).

$$A = \lambda N \qquad (1)$$

La constante de decaimiento (λ) posee unidades de s^{-1}, mientras que N representa el número de núcleos radiactivos presentes en la muestra y constituye una magnitud adimensional. Considerando que N disminuye en función del tiempo debido a la desintegración, se establece la siguiente igualdad:

$$A = \lambda N(t) = -\frac{dN}{dt}(t) \qquad (2)$$

Trabajando algebraicamente e integrando se obtiene:

$$\frac{dN(t)}{N} = -\lambda\, dt \qquad (3)$$

Esta expresión constituye la forma diferencial de la ley fundamental del decaimiento radiactivo e indica que la fracción de núcleos que desaparecen por decaimiento en el intervalo dt, es proporcional al tiempo transcurrido. Desde el punto de vista dimensional, el número de núcleos radiactivos N constituye una magnitud adimensional. En consecuencia, el término diferencial dN también resulta adimensional. La constante de decaimiento λ posee unidades de s^{-1}, mientras que el diferencial de tiempo dt se expresa en segundos. Por lo tanto, el producto es adimensional, garantizando la consistencia dimensional de la ecuación (3).
En la solución integrada de la ley de decaimiento, representada por la ecuación (4):

$$N(t) = N_o\, e^{-\lambda t} \qquad (4)$$

De manera análoga, al multiplicar la ecuación por la constante de decaimiento se obtiene la expresión de la actividad radiactiva en función del tiempo, representada en la ecuación (5). En este caso, tanto A(t) como A_0 se expresan en becquerel (Bq)**,** unidad del Sistema Internacional equivalente a una desintegración por segundo s^{-1}:

$$A(t) = A_O\, e^{-\lambda t} \qquad (5)$$

Donde A(t) la actividad de la muestra al cabo de un tiempo t y A_0 la actividad inicial de la muestra.

Para caracterizar la velocidad de desintegración de un radionucleido se introduce el semiperíodo de desintegración o vida media, definido como el tiempo necesario para que la actividad de una muestra radiactiva disminuya a la mitad de su valor inicial. Esta magnitud se relaciona con la constante de decaimiento mediante la ecuación (6). Dado que λ posee unidades de s^{-1} y ln(2) es una constante adimensional, el semiperíodo $T_{1/2}$ se expresa en unidades de tiempo, generalmente segundos:

$$T_{1/2} = \frac{ln(2)}{\lambda} \qquad (6)$$

Las unidades comúnmente utilizadas para medir la actividad radiactiva son: Desintegraciones por segundo (dps), Desintegraciones por minuto (dpm) y Curie (Ci). El Curie se define como la actividad que presenta una masa de 1 gramo del radioelemento Ra226, lo que implica el número de núcleos presentes. Las equivalencias son: 1 Ci = 3.7×10^{10} dps = 2.22×10^{12} dpm.

2.2 Reacciones Nucleares

La energía nuclear se define como la energía asociada a las interacciones nucleares entre protones y neutrones, conocida como energía de enlace nuclear, estructura central de los átomos que constituye la unidad básica de la materia. Este núcleo, conformado por protones (partículas de carga positiva) y neutrones (partículas neutras), se mantiene cohesionado por la fuerza nuclear fuerte, la cual genera una energía de enlace que estabiliza su estructura (Krane, 1988). La liberación de esta energía puede ocurrir mediante dos procesos principales: la fusión y la fisión nucleares. En ambos procesos, se produce una pérdida de masa de los átomos involucrados, que se transforma en energía cinética de los fragmentos o productos de reacción, radiación electromagnética y otras formas de energía, que en contextos prácticos (como los procesos que ocurren en reactores nucleares) se manifiestan como calor, que se conoce como energía nuclear. A continuación, se describen ambos mecanismos de liberación de energía.

2.2.1 Fusión Nuclear

La fusión nuclear es el proceso mediante el cual múltiples núcleos atómicos se combinan para formar un nucleido con un número másico superior al de los nucleidos iniciales. La fusión nuclear requiere una alta energía de activación debido a las fuerzas de repulsión coulombiana entre los núcleos cargados positivamente al acercarse, lo que complica su inicio y control, como se representa en la Figura 2.

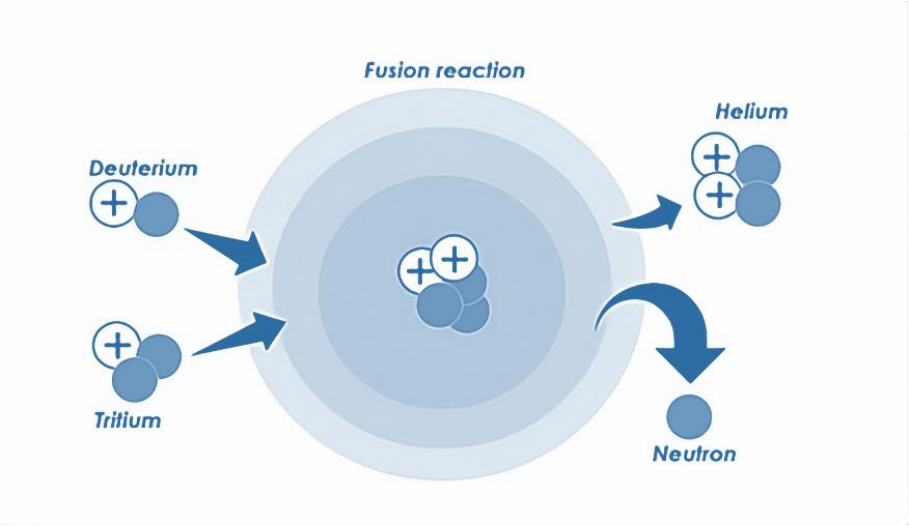


Figura 2. Representación de la generación de energía a partir de una reacción de fusión nuclear. (Colwell et al., 2002)

2.2.2 Fisión Nuclear

La fisión nuclear es un proceso en el cual un núcleo atómico pesado, al ser bombardeado por neutrones, se vuelve inestable y se fragmenta en dos núcleos de tamaños comparables. Esta reacción va acompañada de una liberación significativa de energía y la emisión de dos o tres neutrones adicionales. Dichos neutrones pueden inducir nuevas fisiones al interactuar con otros núcleos fisionables, generando así una sucesión de eventos que conforman una reacción en cadena. En un intervalo de tiempo del orden de fracciones de segundo, la cantidad de núcleos fisionados puede liberar una energía que supera en varios órdenes de magnitud a la obtenida mediante la combustión de un bloque de carbón o la detonación de una cantidad equivalente de dinamita. Dado que la fisión nuclear ocurre a una velocidad considerablemente superior a la de una reacción química, la energía resultante se libera de manera mucho más rápida y eficiente. Si se logra que únicamente uno de los neutrones emitidos en cada fisión induzca una nueva reacción, el número de fisiones por unidad de tiempo se mantiene constante, permitiendo así el control del proceso. Este principio es la base del funcionamiento

de los reactores nucleares, los cuales constituyen fuentes reguladas de energía derivada de la fisión nuclear. En la Figura 3 se representa un neutrón que impacta el núcleo de un átomo de uranio-235 (^{235}U), este se divide en dos núcleos más pequeños, como por ejemplo un núcleo de Bario (Ba) y un núcleo de criptón (Kr), y libera dos o tres neutrones. Estos neutrones adicionales pueden impactar otros átomos de uranio-235 (^{235}U) adyacentes, los cuales también se dividirán y generarán más neutrones, provocando así un efecto multiplicador. Este proceso de reacción en cadena ocurre en una fracción de segundo. Un núcleo de uranio-235 (^{235}U) puede fisionarse de 40 formas distintas teniendo cada una de ellas una probabilidad de ocurrencia. Cada vez que se produce esta reacción, se libera energía en forma de calor y radiación. El calor generado puede transformarse en electricidad en una central nuclear, mediante un proceso similar al utilizado para generar electricidad a partir del calor de combustibles fósiles como el carbón, el gas y el petróleo.

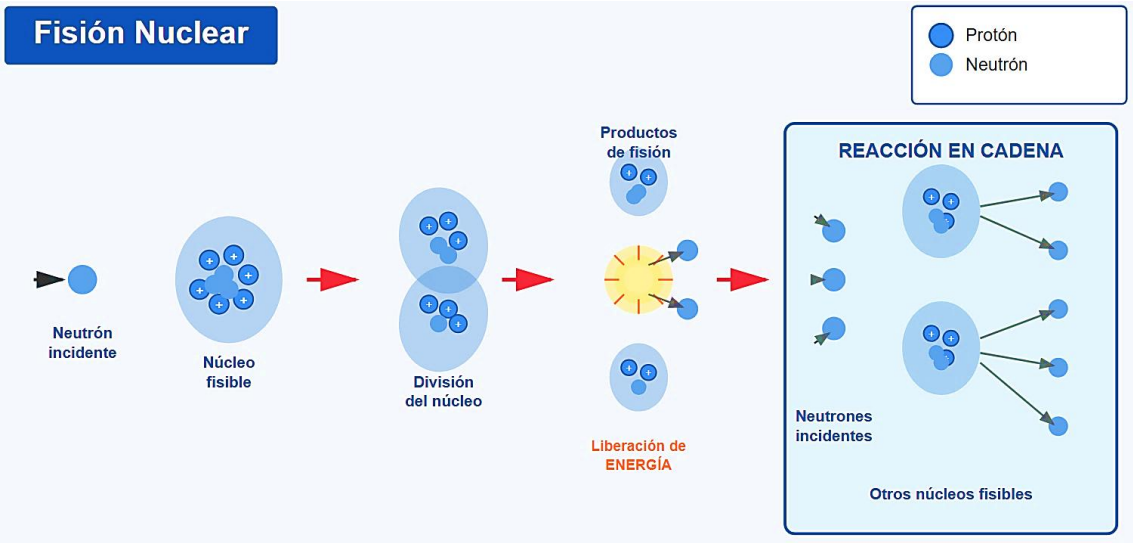


Figura 3. Esquema simplificado del proceso de fisión. (Scanlon et al., 2004)

2.3 Reactores Nucleares

Un reactor nuclear constituye un sistema diseñado para iniciar, sostener y modular reacciones de fisión en cadena dentro de su núcleo. Su clasificación se fundamenta en criterios operativos y aplicativos, destacándose tres categorías principales: reactores de investigación, productores de radioisótopos y reactores de potencia para generación eléctrica (denominados centrales nucleares). En los reactores térmicos, la fisión del ^{235}U se induce mediante neutrones térmicos ($E \approx 0.025$ eV). Los neutrones emitidos durante la fisión poseen energías iniciales del

orden de 1 MeV. El proceso de moderación, mediante el cual los neutrones rápidos pierden energía al interactuar con materiales moderadores, incrementa la probabilidad de fisión en núcleos como el ^{235}U, facilitando el mantenimiento de una reacción en cadena autosostenida, siempre que exista un equilibrio entre la producción y las pérdidas neutrónicas.
Los componentes esenciales de un reactor nuclear, tal como se puede ver en la Figura 4, son:

- **Núcleo**: Zona donde se confina y controla la reacción en cadena. Su diseño prioriza la transferencia térmica eficiente al circuito primario, maximizando la extracción energética del combustible nuclear mientras se aseguran parámetros de seguridad críticos.
- **Moderador**: Material encargado de reducir la energía cinética de los neutrones rápidos mediante dispersiones elásticas con núcleos ligeros, por ejemplo, hidrógeno en agua ligera, deuterio en agua pesada o carbono en grafito. Este proceso incrementa la sección eficaz de fisión del ^{235}U, facilitando la sostenibilidad de la reacción.
- **Barras de Control:** Elementos de regulación reactiva compuestos por materiales absorbentes de neutrones (carburo de boro, aleaciones Ag-In-Cd). Su desplazamiento axial permite ajustar la reactividad del núcleo mediante la modulación del flujo neutrónico, asegurando estabilidad operativa en condiciones estáticas o transitorias.
- **Refrigerante**: Medio termofluido responsable de extraer el calor generado por fisión (≈200 MeV por evento). Debe exhibir baja captura neutrónica, alta capacidad calorífica y estabilidad química. Opciones incluyen: gases (CO_2, He), líquidos (H_2O, D_2O, sodio líquido) y compuestos orgánicos.
- **Reflector:** Capa periférica de material de bajo coeficiente de absorción (grafito, berilio) que reduce la fuga neutrónica al redirigir los neutrones hacia el núcleo, incrementando así la eficiencia del reactor.
- **Blindaje Radiológico**: Barrera multicapa (hormigón, Plomo, agua borada) que atenúa la radiación ionizante (neutrones térmicos, fotones gamma) para garantizar la protección biológica y cumplir con límites de dosis reglamentarios.
- **Combustible Nuclear**: Matriz fisionable dispuesta geométricamente para alcanzar criticidad. Configuraciones comunes incluyen: pastillas de UO_2 enriquecido en zircaloy.

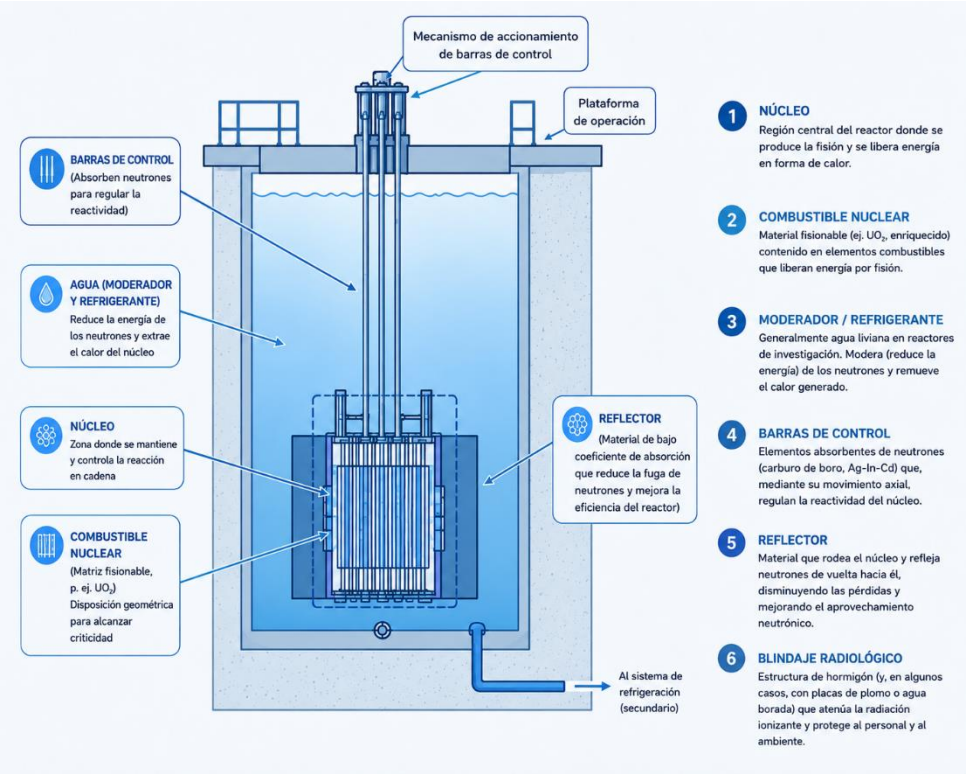


Figura 4. Esquema conceptual de un reactor nuclear. Fuente: elaboración propia.

Las centrales nucleares transforman energía térmica de fisión en electricidad mediante ciclos termodinámicos. El calor generado en el núcleo se transfiere al refrigerante, el cual alimenta turbinas de vapor acopladas a generadores eléctricos. Para mantener un estado crítico estable, el reactor requiere un exceso de reactividad positivo que compense las pérdidas neutrónicas por fugas, absorción parásita y envenenamiento por productos de fisión. Este equilibrio se logra mediante el control dinámico de las barras de control y el ajuste de la concentración de boro disuelto en el refrigerante, material con alta sección eficaz de captura de neutrones térmicos, permitiendo regular la reactividad del sistema y asegurar que esta permanezca próxima a cero en régimen estacionario. En síntesis, la ingeniería de reactores nucleares integra principios físicos, termo hidráulicos y materiales para lograr sistemas autorregulados, donde la sinergia entre componentes garantiza operación segura, eficiencia energética y cumplimiento de protocolos de seguridad internacionales.

Si bien los reactores de potencia constituyen el ejemplo más difundido de aplicación de la fisión nuclear, existen también reactores de investigación destinados a fines científicos, académicos y tecnológicos, cuya concepción y régimen de operación difieren sustancialmente de los primeros, en este contexto se enmarca el Reactor RA-4, reactor nuclear de investigación de

núcleo homogéneo, con una potencia máxima de 1 Watt. Su núcleo posee una geometría cilíndrica, con un diámetro de 24 cm y una altura de 26 cm, dividido estructuralmente en dos secciones: una parte superior fija y una parte inferior móvil. La condición de máxima separación entre ambas partes (posición de núcleo = 0 cm) corresponde al estado de apagado del reactor, mientras que su posición operativa se alcanza al unir el núcleo, configurándose a una separación de 4,7 cm.

El núcleo está constituido por discos apilados de distinta altura, fabricados a partir de una mezcla homogénea de U_3O_8 enriquecido al 20 % en peso y polietileno, el cual cumple una doble función: actuar como soporte mecánico del material fisionable y desempeñarse como moderador de neutrones térmicos. El sistema de control de reactividad se implementa mediante dos placas planas de cadmio, de dimensiones 25 × 24 cm, dispuestas lateralmente al núcleo, con un recorrido axial de 25 cm. El cadmio, debido a su elevada sección eficaz de captura para neutrones térmicos, permite regular la criticidad del sistema de forma precisa.

Todo el conjunto del núcleo se encuentra rodeado por un reflector de grafito, cuyo propósito es reducir la fuga neutrónica mediante el redireccionamiento de neutrones hacia el núcleo. Este está seguido por una capa de Plomo, como se observa en las Figuras 5 y 6, cuya función es atenuar la radiación gamma y finalmente, por un tanque de agua con ácido bórico en solución saturada, que actúa como blindaje biológico debido a su alta capacidad de absorción neutrónica. Para garantizar las condiciones iniciales necesarias para el arranque, el reactor dispone de una fuente de neutrones Radio (Ra)-Berilio (Be) con una actividad de 10 mCi, ubicada bajo el núcleo y acoplada al desplazamiento de la sección inferior móvil.

En cuanto al sistema de monitoreo de potencia, el RA-4 está equipado con tres canales de detección:

- Un tubo de trifluoruro de boro (BF_3) operando en la región de contador proporcional, destinado al canal de arranque.
- Una cámara de ionización utilizada en el canal logarítmico, para seguimiento de la marcha en régimen subcrítico.
- Una segunda cámara de ionización asociada al canal lineal, para el monitoreo de la operación en régimen crítico o de potencia constante.

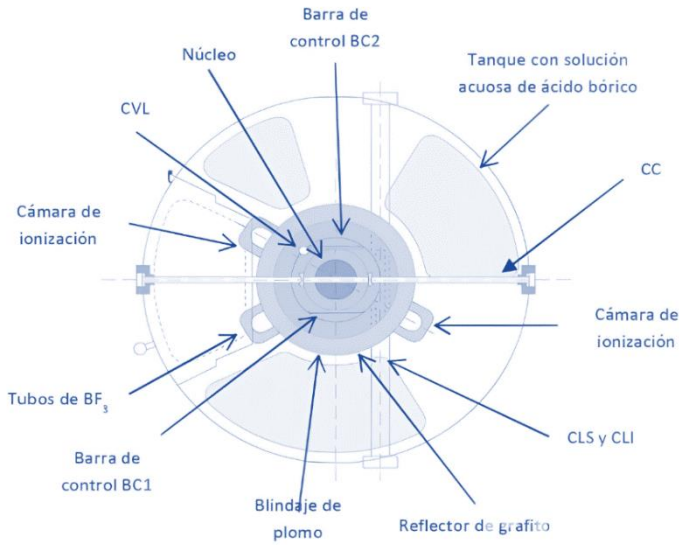


Figura 5. Corte transversal del Reactor RA-4. Fuente: informes internos

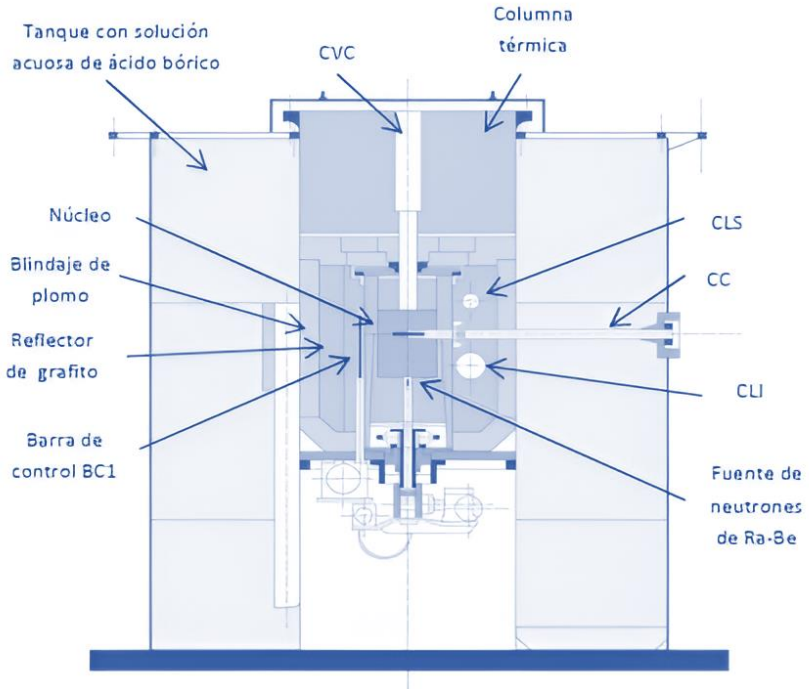


Figura 6. Corte a 90° del Reactor RA-4. Fuente: informes internos

2.4 Espectrometría

Las mediciones nucleares constituyen un conjunto de técnicas y procedimientos orientados a detectar, cuantificar y caracterizar la radiación ionizante emitida por materiales radiactivos. Estas mediciones son fundamentales tanto para la seguridad operacional de los reactores, como para el control de procesos, la investigación básica y la dosimetría radiológica. Involucran la utilización de detectores específicos, circuitos electrónicos de adquisición y análisis de señales. En esta sección se describe el sistema de monitoreo, así como los componentes que intervienen en la detección de la radiación.

Los sistemas de medición de radiación ionizante se sustentan en la espectrometría de altura de pulsos, técnica que analiza la amplitud de las señales eléctricas generadas por el detector para determinar la energía de las radiaciones incidentes y su actividad asociada, Figura 7. Este método permite: identificar radionúclidos y cuantificar la actividad, mediante la caracterización de sus espectros energéticos, en muestras médicas, ambientales o industriales y evaluar del fondo radiológico en entornos controlados. La relación lineal entre la amplitud del pulso de salida y la energía depositada en el medio detector es el fundamento de esta técnica. La energía se transfiere mediante interacciones con electrones atómicos, produciendo ionizaciones y excitaciones cuya densidad determina la magnitud de la señal. Dicho método analítico es confiable para la identificación y cuantificación de radionucleidos en muestras. Su fundamento reside en la adquisición de la distribución energética de los fotones gamma (γ) emitidos durante procesos de desintegración radiactiva. En todos los casos, la energía del núcleo hijo es menor que la del núcleo padre, cumpliendo con el principio de conservación de la energía. La espectrometría gamma (γ) aprovecha estas transiciones para mapear las energías características de cada radionucleido, permitiendo su identificación unívoca y cuantificación mediante análisis de fotopicos.

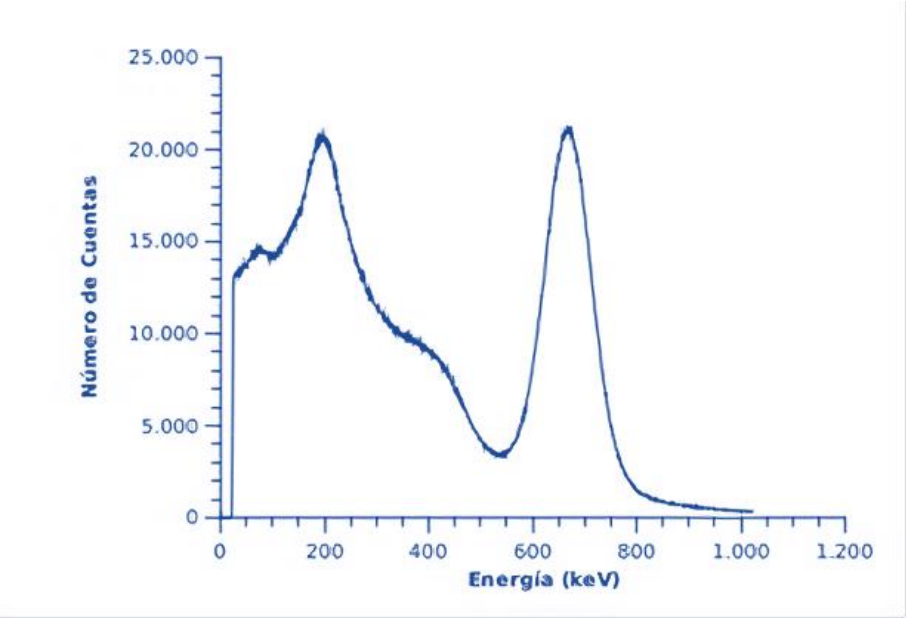


Figura 7. Espectro de altura de pulsos del ^{137}Cs tomado con un detector centellador (Errico et al., 2023).

La calibración energética del sistema detector se realiza mediante la adquisición de espectros de altura de pulsos generados por fuentes patrón de energía conocida. Este proceso consiste en correlacionar la posición en canales de los fotopicos detectados con las energías características de cada fuente, obteniéndose una curva de calibración espectral que, bajo condiciones experimentales óptimas, presenta una relación lineal entre ambas variables. La linealidad de esta correlación valida la correcta operación del sistema y permite asignar energías a los canales espectrales de muestras desconocidas. No obstante, a fin de garantizar la fidelidad de este procedimiento y la calidad de los datos obtenidos, resulta imprescindible analizar en profundidad los elementos que conforman el sistema de detección. En este contexto, los siguientes apartados abordan de manera sistemática los principios físicos y operativos de los detectores de centelleo, el funcionamiento del tubo fotomultiplicador como elemento de amplificación electrónica, y el diseño de blindajes destinados a minimizar la influencia de la radiación de fondo. El estudio de estos componentes permite comprender las limitaciones, alcances y condiciones necesarias para una correcta implementación del sistema espectrométrico.

2.4.1 Detectores de centelleo

Los materiales centelladores se caracterizan por exhibir luminiscencia, fenómeno mediante el cual absorben energía proveniente de fuentes externas, como radiación ionizante, fotones luminosos o energía térmica, y la reemiten en forma de radiación electromagnética dentro del rango UV-visible. Este proceso se clasifica en dos modalidades según su cinética de desexcitación: la fluorescencia, donde la reemisión ocurre de manera casi instantánea, con tiempos de decaimiento inferiores a 10^{-8} segundos, y la fosforescencia, caracterizada por una desexcitación retardada con duraciones que abarcan desde microsegundos hasta horas, dependiendo de las propiedades del material y de los estados metaestables involucrados.

Aunque numerosos materiales presentan propiedades centelladoras intrínsecas su utilidad práctica como detectores de radiación está condicionada por la eficiencia en la conversión de energía de excitación a fotones visibles. Solo un subconjunto de estos materiales, aquellos con alta eficiencia cuántica y transparencia óptica, resultan aptos para su implementación en sistemas de detección. En tales casos, la interacción de fotones gamma (γ) con el centellador genera fotones de desexcitación en el espectro UV-visible, proceso fundamental para la posterior conversión en señales eléctricas medibles.

El núcleo operativo de un detector centellador reside en la sinergia entre tres componentes críticos:

- Material centellador: Transforma la energía de la radiación ionizante en fotones UV-visibles mediante transiciones electrónicas inducidas.
- Fotomultiplicador (PMT): Dispositivo optoelectrónico compuesto por un fotocátodo, donde los fotones incidentes generan fotoelectrones mediante efecto fotoeléctrico, y una cadena de dynodos bajo alto voltaje (10^3 – 10^6 V) que amplifican exponencialmente la señal mediante emisión secundaria de electrones.
- Electrónica de procesamiento: Circuitos dedicados a la adquisición, amplificación y análisis de los pulsos eléctricos generados, permitiendo la cuantificación de parámetros como energía depositada y tasa de conteo (Errico et al., 2023).

La Figura 8 ilustra esquemáticamente esta arquitectura, destacando el flujo de señal desde la interacción inicial de la radiación con el centellador hasta la obtención de datos procesables.

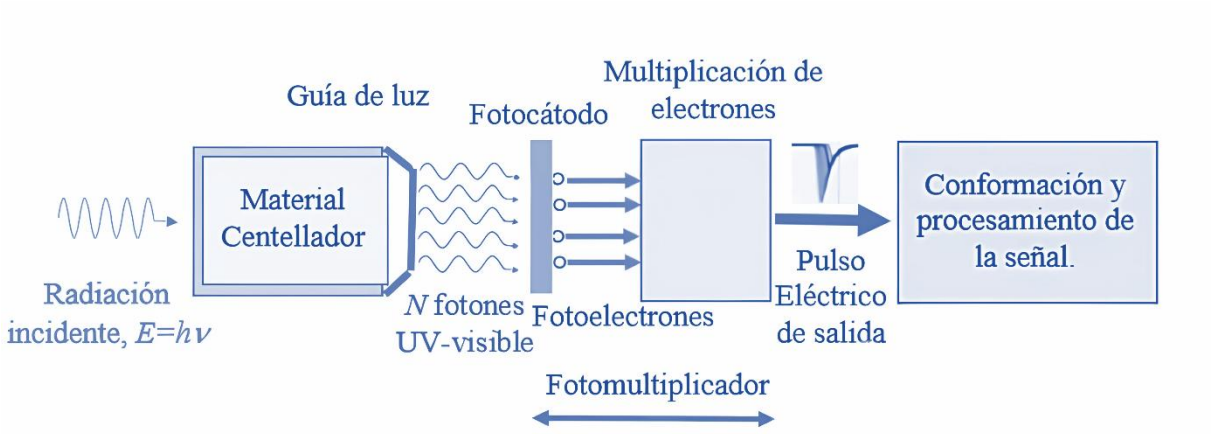


Figura 8. Diagrama esquemático de un sistema detector de radiación en base a un material centellador (Errico et al., 2023)

La implementación de detectores centelladores es pivotal en aplicaciones que van desde la espectrometría gamma en investigación nuclear hasta diagnósticos médicos. Su versatilidad se sustenta en la capacidad de modular ciertas propiedades como la densidad, el tiempo de decaimiento y la eficiencia de conversión, adaptándose a requerimientos específicos de resolución energética y temporal. La interacción de la radiación ionizante con un material centellador da lugar a procesos de transferencia de energía, tales como el efecto fotoeléctrico, la dispersión Compton o la formación de pares (en el caso de fotones de alta energía), los cuales generan partículas cargadas secundarias, principalmente electrones. Estos electrones excitan e ionizan átomos o moléculas del medio, cuyas desexcitaciones posteriores emiten fotones en el rango UV-visible. La intensidad luminosa resultante (L) es proporcional a la energía depositada (E) por la radiación incidente, siguiendo la relación $L=F \times E$, donde F es el factor de conversión específico del material. Esta señal óptica, se transmite al fotomultiplicador (PMT), donde el fotocátodo convierte los fotones en fotoelectrones. Mediante una cascada de dynodos bajo alto voltaje, el fotomultiplicador (PMT) amplifica la señal, generando un pulso eléctrico cuya amplitud o carga correlaciona linealmente con la energía incidente, permitiendo su cuantificación mediante electrónica asociada. Los detectores centelladores destacan por su sensibilidad energética, respuesta temporal rápida y capacidad para operar a altas tasas de eventos. Estas propiedades los hacen idóneos para:

- Espectrometría gamma (γ): Identificación de radionucleidos mediante análisis de amplitud de pulso.
- Coincidencia temporal: Determinación de correlaciones temporales en experimentos de física de partículas.

- Discriminación de partículas: Técnicas de "pulse shape discrimination" (PSD) para distinguir entre radiación alfa (α), beta (β^+ y β^-), o neutrones, basadas en diferencias en la forma del pulso. Por otra parte, el fenómeno de atenuación adquiere relevancia cuando las dimensiones del centellador son comparables con su longitud de atenuación (L_a), definida como la distancia a la cual la intensidad luminosa disminuye hasta $1/e$ de su valor inicial, siendo e el número de Euler. La relación entre la intensidad luminosa y la distancia, ecuación (7), recorrida en el medio se expresa mediante la ley de atenuación exponencial, mientras que la longitud de atenuación se relaciona inversamente con el coeficiente de atenuación lineal parámetro dependiente de las propiedades ópticas del material.

$$L_a = \frac{1}{\mu} \qquad (7)$$

El coeficiente de atenuación lineal (μ) es una magnitud fundamental que caracteriza la capacidad de un material para absorber o dispersar radiación. A medida que aumenta la longitud de atenuación, los fotones ópticos pueden propagarse mayores distancias, incrementando la probabilidad de que alcancen el detector y, por ende, aumentando la tasa de detección. En este contexto, la Ley de Beer-Lambert cobra especial relevancia, ya que describe matemáticamente el fenómeno de atenuación de la radiación cuando atraviesa un medio absorbente. Esta ley establece que la intensidad de un haz de radiación decrece exponencialmente en función del espesor del material, según la siguiente expresión:

$$I(x) = I_o\, e^{-\mu x} \qquad (8)$$

Donde $I(x)$ es la intensidad de radiación después de atravesar un material de blindaje de espesor x, I_o intensidad inicial, μ el coeficiente de atenuación lineal (en cm^{-1}). La ecuación (8) será utiliza en el LD propuesto. La ley de desintegración radiactiva, desarrollada en la Sección 2.1.4, permite modelar la evolución temporal de una fuente emisora y constituye una base fundamental para la interpretación cuantitativa de la actividad registrada en los espectros gamma. No obstante, en contextos experimentales donde se interpone un material entre la fuente y el detector, la disminución de la intensidad observada no depende únicamente del tiempo, sino también de la interacción de los fotones gamma con la materia, fenómeno descrito

mediante la ley de Beer–Lambert. Esta ley explica cómo la radiación gamma se atenúa al atravesar materiales con diferentes espesores y coeficientes de atenuación, afectando directamente la intensidad detectada. En consecuencia, la integración de ambas leyes permite una comprensión más completa de los fenómenos físicos involucrados en la espectrometría gamma. Sin embargo, la correcta reconstrucción espectral no depende exclusivamente de los procesos de desintegración y atenuación, sino también de las propiedades ópticas, estadísticas y electrónicas del sistema detector empleado, particularmente del material centellador y de la eficiencia de conversión y detección del sistema asociado.

El sistema implementado en el RA-4 emplea un detector de centelleo basado en yoduro de sodio activado con talio (NaI(Tl)), material ampliamente utilizado en espectrometría gamma debido a su adecuada eficiencia de detección y estabilidad operativa. El NaI(Tl) presenta un elevado número atómico efectivo y una densidad aproximada de 3,67 g/cm³, lo que favorece la interacción fotoeléctrica y la dispersión Compton en el rango energético típico de radionucleidos utilizados en prácticas académicas (≈100 keV – 2 MeV). Si bien su resolución energética (del orden del 6–8 % a 662 keV) es inferior a la alcanzada por detectores semiconductores como los de germanio hiperpuro (HPGe), el NaI(Tl) ofrece ventajas significativas en términos de robustez mecánica, operación a temperatura ambiente y menor complejidad instrumental, características particularmente relevantes en entornos docentes y en instalaciones con protocolos regulatorios estrictos (Gilmore, 2008). En comparación con centelladores más recientes, como el de bromuro de lantano dopado con cerio, $LaBr_3$(Ce), que pueden alcanzar resoluciones cercanas al 3 % a 662 keV, el NaI(Tl) mantiene ventajas en costo, disponibilidad y simplicidad electrónica (Gierlik et al., 2012). En consecuencia, la selección del NaI(Tl) en el entorno del RA-4 responde a un equilibrio entre desempeño espectral, robustez operativa y adecuación pedagógica, permitiendo obtener espectros representativos sin requerir infraestructura criogénica ni complejidad electrónica adicional.

2.4.2 Fotomultiplicador

El tubo fotomultiplicador es un dispositivo crítico en la cadena de detección, encargado de transformar la radiación luminosa emitida por el material centellador en una señal eléctrica cuantificable. Su diseño, encapsulado en un cilindro de vidrio sellado al alto vacío, garantiza la ausencia de interferencias gaseosas durante la operación, tal y como se observa en la Figura 9. Estructuralmente, el fotomultiplicador integra tres componentes fundamentales:

- *Fotocátodo*: ubicado en la superficie frontal, este electrodo está recubierto por una capa fotoemisora cuya función es generar fotoelectrones mediante efecto fotoeléctrico al ser irradiado por los fotones UV-visibles provenientes del centellador. La eficiencia cuántica del fotocátodo (η), definida como la relación entre fotoelectrones emitidos y fotones incidentes, es un parámetro clave que determina la sensibilidad global del sistema.
- *Sección de Colección y Enfoque*: un conjunto de electrodos de enfoque dirige los fotoelectrones hacia la región de multiplicación. Esta etapa minimiza la dispersión espacial de los electrones, optimizando la transferencia de carga hacia el primer dinodo.
- *Cadena de Dinodos (Multiplicación de Electrones):* una serie de dinodos polarizados con un gradiente de voltaje creciente amplifican exponencialmente la corriente mediante emisión secundaria de electrones. Cada dinodo fabricado en materiales con alto coeficiente de emisión secundaria multiplica el número de electrones por un factor de 3–6 por etapa. La señal resultante, un pulso de corriente proporcional a la energía depositada por la radiación ionizante en el centellador, es registrada por un ánodo colector y procesada por electrónica externa para su análisis espectral o temporal.

La amplitud del pulso de salida guarda una relación lineal con la energía de la radiación incidente, siempre que el material centellador y el fotomultiplicador operen en su régimen de no saturación. Esta linealidad, esencial para aplicaciones de espectrometría gamma, se ve comprometida por fenómenos como la fatiga del fotocátodo, variaciones térmicas o desalineaciones ópticas entre el centellador y el fotomultiplicador. En conclusión, la señal de salida del tubo fotomultiplicador, y por ende de la unidad detectora, se manifiesta como un pulso de corriente cuya amplitud es directamente proporcional a la intensidad luminosa incidente sobre el fotocátodo. Esta intensidad, a su vez, está determinada por la energía depositada por la radiación ionizante incidente.

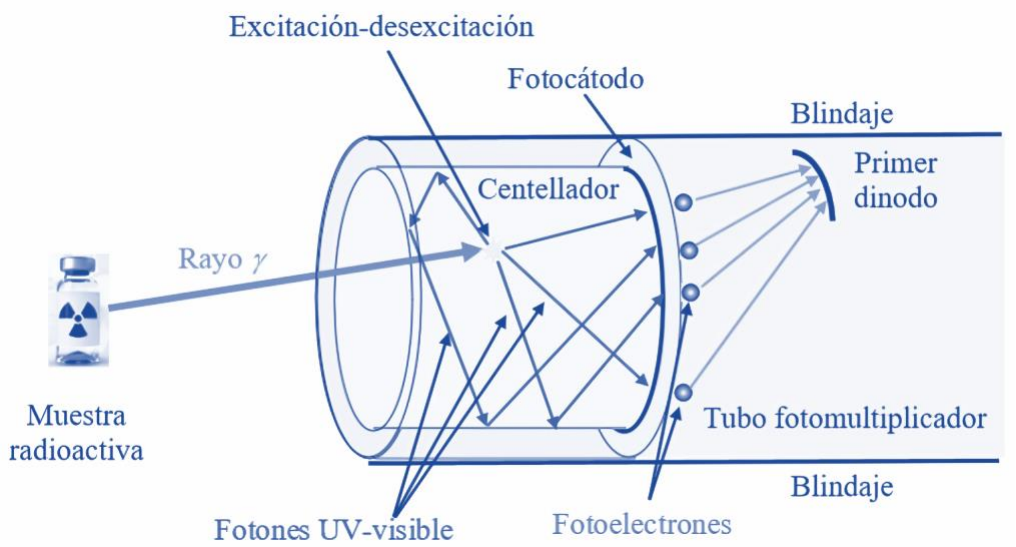


Figura 9. Cristal centellador acoplado al tubo fotomultiplicador en una unidad detectora típica (Errico et al., 2023).

2.4.3 Blindajes

En la espectrometría gamma, la calidad de la medición está condicionada por dos factores críticos: el tiempo de adquisición y el sistema de blindaje. La interacción entre ambos determina la sensibilidad del sistema, la resolución espectral efectiva y el nivel de minimización del fondo radiactivo. En relación con el tiempo de adquisición, se distinguen dos magnitudes fundamentales, el Live Time que es el tiempo efectivo durante el cual el detector está activo y registrando eventos y el Real Time que es el tiempo cronológico total de la medición, incluyendo periodos "muertos" del detector. La diferencia entre ambos parámetros permite estimar el comportamiento del sistema ante altas tasas de conteo y evaluar posibles pérdidas estadísticas. Por su parte, el blindaje cumple una función esencial en la reducción del fondo radiactivo, contribuyendo a mejorar la relación señal-ruido del espectro. Entre sus principales funciones se destacan: reducción del fondo, mitiga radiación ambiental (rayos cósmicos, radón, materiales cercanos) y radiación dispersa de la propia muestra. Y como blindajes más utilizados está el Plomo (Pb), Hierro (Fe), Aluminio (Al), y el Hormigón, seleccionados en función de su número atómico, densidad y capacidad de atenuación para el rango energético de interés.

2.5 Estudio Experimental de Espectrometría Gamma

Comprender fenómenos como el decaimiento radiactivo exige no solo la asimilación teórica de sus principios sino también la observación experimental de los procesos nucleares y de las leyes relacionadas. No obstante, la complejidad de los procedimientos, los riesgos asociados a la manipulación de materiales radiactivos y las restricciones en el acceso a equipamiento especializado en física nuclear plantean la necesidad de diseñar estrategias didácticas y tecnológicas innovadoras que posibiliten la experimentación y el aprendizaje en entornos seguros, accesibles y reproducibles. Una vez introducidos los conceptos fundamentales de la física nuclear, resulta pertinente analizar cómo los estudiantes comprenden, interpretan y aplican estos procesos en contextos experimentales y formativos. La física como disciplina central en la formación de profesionales de las ciencias y la ingeniería desempeña un papel esencial en el desarrollo del pensamiento lógico, el razonamiento cuantitativo y las capacidades cognitivas. Por lo tanto, su aprendizaje debe orientarse hacia el desarrollo de competencias en los estudiantes, entre ellas la capacidad de realizar mediciones, controlar variables, construir modelos, comprender conceptos e interpretar múltiples formas de representación (Orduña et al., 2016), (J. Brinson, 2015). La enseñanza universitaria en estas disciplinas enfrenta desafíos crecientes en sus componentes teóricos y, especialmente, en el acceso efectivo a experiencias experimentales. En este contexto, el desarrollo tecnológico se posiciona como un elemento clave no solo para apoyar la enseñanza, sino para transformar las condiciones materiales en las que se llevan a cabo las actividades científicas. Avances en automatización, instrumentación digital, telecomunicaciones y virtualización de entornos experimentales han permitido superar restricciones que durante décadas limitaron el alcance de la práctica científica formativa y aplicada. La incorporación de tecnologías orientadas a la interacción remota con dispositivos físicos reales ha generado nuevas configuraciones experimentales más flexibles, accesibles y escalables, que trascienden los marcos espacio-temporales tradicionales del laboratorio (Heradio et al., 2016). Sin embargo, la infraestructura convencional aún presenta limitaciones significativas, como la escasa disponibilidad horaria (Lowe, 2013), las restricciones de espacio y seguridad (Henke et al., 2015), la dificultad para integrar sistemas de seguimiento autónomo del aprendizaje (Nickerson et al., 2007), el uso compartido del laboratorio con proyectos de investigación (Grove & Overton, 2013) y los obstáculos logísticos asociados al desplazamiento y horarios del estudiantado (Bochicchio & Longo, 2009). Otro aspecto relevante que limita el potencial de estas experiencias es la falta de modelos pedagógicos que integren de manera eficaz componentes de apoyo técnico como

videos, software y equipos modulares, aprovechando las ventajas que cada modalidad de laboratorio ofrece (Saliah-Hassane et al., 2013), (López et al., 2014), (De Jong et al., 2013). Considerando que las carreras científico tecnológicas se caracterizan por una marcada orientación experimental y promueven el desarrollo de competencias investigativas, resulta fundamental que dichas prácticas se articulen con las tendencias globales emergentes. Entre ellas se destacan el teletrabajo, la educación virtual, la Industria 4.0, la manufactura digital, así como el uso de tecnologías inmersivas como la realidad aumentada (RA) y extendida (RE), junto con la creciente incorporación de la inteligencia artificial (IA) en entornos educativos y productivos(Banitaan et al., 2023), (García Peñalvo, 2024). Por ello, es esencial crear sistemas y plataformas tecnológicas que integren de manera eficiente equipos, entornos y modalidades educativas, adaptándose a estas nuevas demandas y necesidades.

En los últimos años, los LR han emergido como una alternativa innovadora frente a las limitaciones de los LT, al permitir el acceso a equipamiento real a través de Internet. Estos entornos posibilitan la realización de prácticas experimentales auténticas de manera síncrona, eliminando barreras espaciales y temporales, y favoreciendo la continuidad de la formación científica incluso en contextos de restricción presencial (Orduña et al., 2018). Sin embargo, su dependencia de la conectividad en tiempo real y la disponibilidad del equipamiento limita su escalabilidad y el acceso simultáneo de múltiples usuarios. Como evolución de esta modalidad, surgen los LD, que incorporan datos experimentales reales previamente registrados bajo condiciones controladas, permitiendo su reutilización en entornos asincrónicos. Este enfoque amplía significativamente el alcance educativo y operativo de los LR, ya que combina la autenticidad de la experiencia experimental con la flexibilidad de la virtualización y la posibilidad de aprendizaje autónomo. En este contexto, la implementación de una metodología para el desarrollo de un laboratorio remoto diferido orientado al estudio de la radiactividad, como la que se propone en esta tesis, no solo permite diseñar experiencias experimentales significativas y adaptadas a las características y necesidades específicas de los estudiantes, sino también incrementar su nivel de satisfacción con las prácticas de laboratorio y optimizar los resultados académicos (Idoyaga et al., 2020), (Orduña et al., 2018). Además, se orienta al desarrollo de competencias transversales tales como el trabajo colaborativo, la integración crítica de tecnologías digitales y el aprendizaje autónomo (Almenara et al., 2023).

Más allá del ámbito académico, la participación en este tipo de entornos experimentales contribuye a una formación más integral del futuro profesional, preparándolo para enfrentar los desafíos propios de contextos laborales e investigativos que requieren autonomía, capacidad

de adaptación tecnológica y habilidades para operar en equipos interdisciplinarios y distribuidos geográficamente. Asimismo, esta propuesta promueve la investigación y la experimentación en física nuclear, favorece la cooperación interinstitucional y permite una mayor eficiencia en el uso de los recursos físicos disponibles, al involucrar a múltiples actores en actividades de formación técnica y científica (Gamage et al., 2020).

La experimentación tiene un rol fundamental en las ciencias físicas, tradicionalmente sustentada en el uso de LT. No obstante, las limitaciones asociadas a estos espacios han motivado la evolución hacia LR, los cuales, aunque amplían el acceso y la flexibilidad, también presentan desafíos en la física nuclear. Como respuesta a estas restricciones, han surgido los LD, los cuales serán introducidos a lo largo de este capítulo, ofreciendo nuevas posibilidades para la práctica experimental.

2.6 Laboratorio Tradicional

El Laboratorio Tradicional (LT) de espectrometría gamma del Instituto de Estudios Nucleares y Radiaciones Ionizantes (IENRI), cuenta con una fuente de alta tensión debajo del monitor, el detector dentro del receptáculo de madera y el espectrómetro, tal y como se puede observar en la Figura 10. El objetivo de las actividades de experimentación práctica que se llevan a cabo en el laboratorio es determinar el coeficiente de atenuación lineal de la radiación, el cual sirve para expresar el efecto atenuador de un blindaje, utilizando la ecuación (8), Ley de Beer-Lambert introducida previamente. Con dicha experimentación se fortalece la capacidad de aplicar conceptos fundamentales tales como la actividad o velocidad de desintegración, la ley de decaimiento radiactivo y el semiperíodo de desintegración, entendido como el tiempo requerido para que la actividad de una muestra radiactiva se reduzca a la mitad, desarrollados en la sección 2.4. Asimismo, se desarrollan habilidades esenciales como la ejecución y rediseño de experimentos, la interpretación y análisis de datos, así como la identificación, formulación y resolución de problemas.

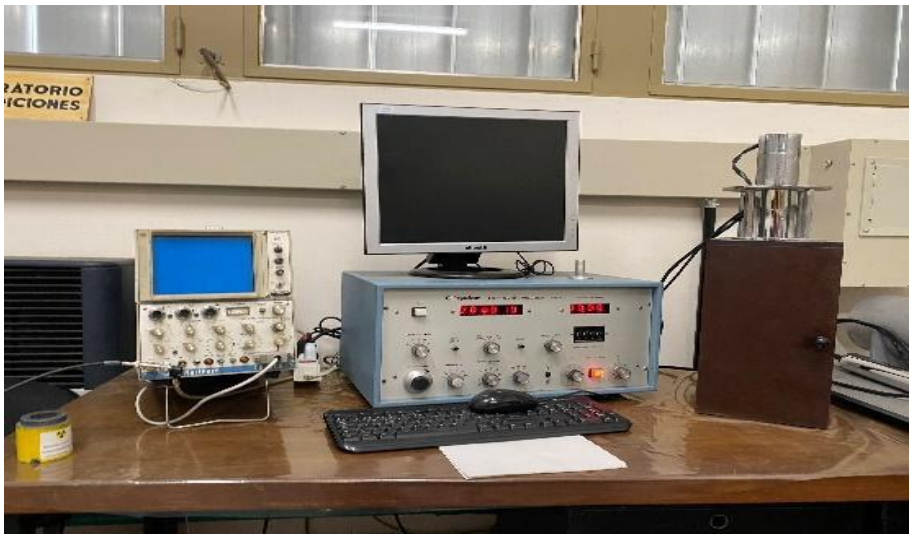


Figura 10. Laboratorio Tradicional. Fuente: elaboración propia.

La experiencia real de espectrometría gamma con un detector de centelleo se realiza con la presencia de tres personas esenciales para la manipulación de las muestras: el Jefe de Reactor, un Operador y un Oficial de Radioprotección. Como responsabilidades del Jefe Reactor se pueden mencionar: la supervisión del cumplimiento de normas de radioprotección, seguridad nuclear, seguridad física y salvaguardia, supervisar las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo, entre otras. Así mismo el Operador de reactor se encarga de realizar todas las maniobras preoperacionales y operacionales que se le sean encomendadas por el jefe de reactor. Finalmente, el Oficial de Radioprotección realiza el control radiodosimétrico del personal del reactor y del personal ajeno al mismo que ingrese a la zona supervisada mediante la correspondiente autorización. Las fuentes utilizadas durante los procesos de experimentación son guardadas, bajo protocolo, en una caja de seguridad donde el técnico debe medir la tasa de dosis y el operador manipular la fuente. El IENRI cuenta con diferentes fuentes que se guardan dentro de una cápsula de Plomo como se muestra en Figura 11. Una vez retirada la fuente de la caja fuerte, es trasladada al Laboratorio de Espectrometría.



Figura 11. Fuente Radiactiva de ^{137}Cs. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 12 se observa el receptáculo de madera con el detector de centelleo para ser medida la actividad de las fuentes radiactivas. Estos detectores se fundamentan en el fenómeno por el cual ciertos materiales, al interactuar con una partícula emitida durante un decaimiento nuclear o con radiación electromagnética, generan un destello luminoso. Al acoplar estos materiales a un dispositivo capaz de convertir los fotones emitidos en pulsos eléctricos, se configura un sistema detector eficiente.

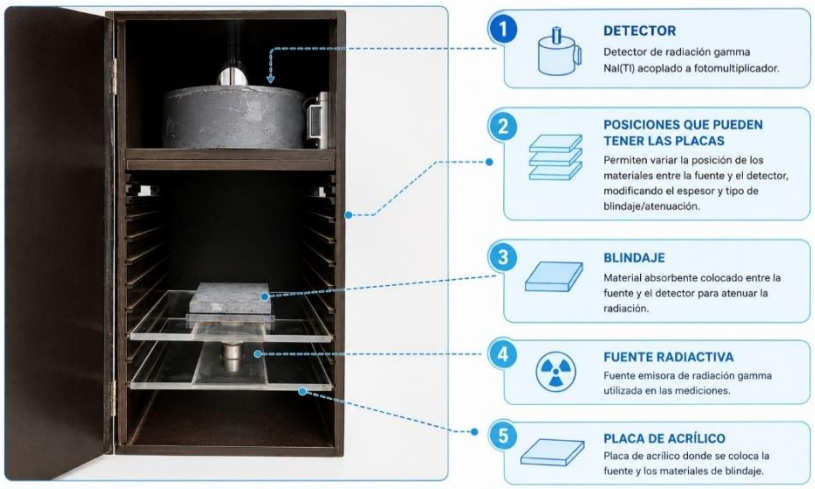


Figura 12. Dispositivo Experimental. Fuente: elaboración propia.

El receptáculo permite variar, empleando una placa de acrílico, la distancia de la fuente con respecto al detector, en diez posiciones diferentes, como se observa en la Figura 12. A su vez, esta movilidad en las placas permite la incorporación de distintos blindajes. En el laboratorio

se utilizan blindajes de Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Aluminio (Al), observadas en las Figuras 13, 14 y 15 respectivamente. El Plomo se manipula bajo protocolo de seguridad. Para cada uno de estos materiales, se cuenta con diez placas con espesores variables que pueden apilarse para aumentar es espesor del blindaje. Las placas de Al tienen espesores de aproximadamente 0,20 cm, las de Fe de entre 0,10 y 0,20 cm y las de Pb de entre 0,3 y 0,5 cm.

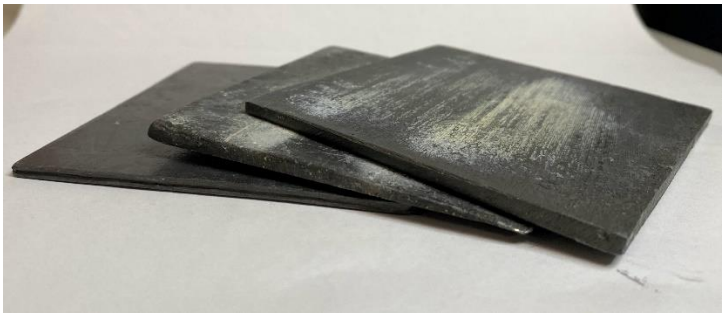


Figura 13. Placas de Pb con espesores variables. Fuente: elaboración propia.



Figura 14. Placas de Fe con espesores variables. Fuente: elaboración propia.

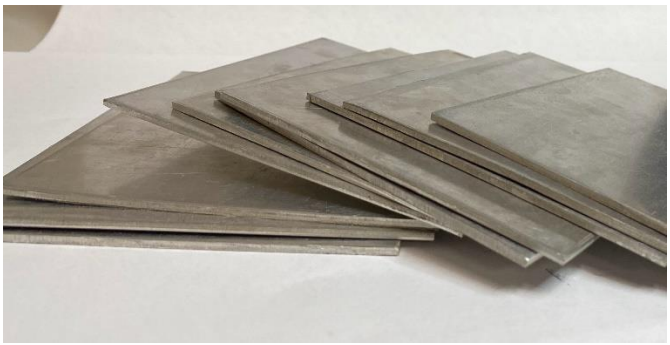


Figura 15. Placas de Al con espesores variables. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 16 se presenta un esquema de la disposición experimental. En primer lugar, se coloca la fuente en un soporte debajo de las placas de material que actúan como blindaje. En la parte superior del soporte se coloca el detector. El detector está compuesto de un cristal de centelleo, cuyo funcionamiento se basa en la luminiscencia causada por radiación ionizante. Esto es: absorbe el fotón incidente y luego reemite la energía en forma de luz, como fotones menos energéticos. La longitud de onda de los fotones emitidos es característica del material. Los fotones previamente generados interactúan con el fotocátodo, liberando así electrones por efecto fotoeléctrico. Los electrones incidentes se multiplican por efecto de un fotomultiplicador electrónico, consistente en una serie de dinodos, hasta llegar al analizador de pulsos. La cantidad de electrones al final del proceso de fotomultiplicación es del orden de 2^n, siendo n el número de dinodos que componen el fotomultiplicador. Esa cantidad de electrones genera un pulso de tensión, como se observa en la Figura 7 del capítulo 2, que en esta etapa es amplificado y analizado para filtrar pulsos no deseados, mediante un analizador de pulsos. A la salida del analizador de pulsos se dispone el espectrómetro el cual cumple la función de sistema de registro y almacenamiento de los datos adquiridos. En este dispositivo se conservan los resultados procesados en forma digital, organizados según la altura de cada pulso y el número de cuentas registradas por el tubo fotomultiplicador. Para cada fotón gamma incidente sobre el detector se genera un pulso electrónico cuya amplitud es proporcional a la energía depositada, y por lo tanto, a la energía del fotón incidente. El espectro gamma se construye a partir del conteo de la cantidad de pulsos correspondientes a cada intervalo de amplitud, permitiendo así representar la distribución energética de la radiación detectada.



Figura 16. Esquema de la disposición experimental. Fuente: elaboración propia.

En base a esta configuración del laboratorio, a la hora de la experiencia el usuario que experimenta debe:

1. Primeramente, colocar la fuente (^{137}Cs o ^{133}Ba) en el receptáculo donde se encuentra el detector y realizar una medición sin blindaje, en diferentes tiempos. Obteniendo así los espectros correspondientes.
2. Posteriormente con la fuente en el receptáculo donde se encuentra el detector se coloca el blindaje de Al, se realizan sucesivas mediciones variando la cantidad de láminas de Al, de menor a mayor espesor y, a su vez, variando los tiempos. Obteniendo así los espectros correspondientes.
3. Posteriormente con la fuente en el receptáculo donde se encuentra el detector se coloca el blindaje de Fe, se realizan sucesivas mediciones variando la cantidad de láminas de Fe, de menor a mayor espesor y, a su vez, variando los tiempos. Obteniendo así los espectros correspondientes.
4. Una vez obtenidos los espectros, se comienza a analizar los mismos. Posteriormente se grafica el logaritmo neperiano de la cantidad de fotones (conteos) registrados versus el espesor de material de blindaje. Finalmente, mediante la ecuación (8) de Ley de Beer-Lambert, se calcula el coeficiente de atenuación μ con una regresión lineal de la gráfica obtenida.

Dicho LT enfrenta diversas limitaciones, como las relacionadas con las instalaciones físicas, los horarios, el instrumental disponible, las fuentes irradiadas y la coordinación de las tres personas introducidas previamente y que son necesarias para la manipulación de los elementos del laboratorio. Asimismo, existen restricciones que dificultan la participación de los estudiantes en actividades prácticas; por ejemplo, aquellos con discapacidades pueden tener menos oportunidades de interactuar en entornos de laboratorio en comparación con sus compañeros. Podemos mencionar también los altos costos asociados con los equipos de laboratorio que suelen obligar en la práctica a compartirlos entre estudiantes, lo cual no solo limita el acceso individual, sino que también complica la planificación y programación eficiente de las actividades del laboratorio, trabajando en grupo, donde los estudiantes con mayor asertividad o compromiso tienden a interactuar más con el equipo e incluso a llevar a cabo la totalidad del experimento, mientras que otros miembros del grupo adoptan un rol más pasivo como observadores. Esta dinámica puede generar desigualdades en el aprendizaje, ya que

aquellos estudiantes que no participan activamente en la realización del experimento podrían no comprender completamente los principios y procedimientos de la experimentación (Pokoo-Aikins et al., 2019). En este contexto, los LR contribuyen a garantizar la continuidad de las actividades prácticas, permitiendo la ejecución de los experimentos planificados conforme al cronograma establecido. Esta modalidad asegura que se alcancen los objetivos de aprendizaje previamente definidos, optimizando el acceso a los recursos experimentales y minimizando las interrupciones que podrían afectar la experiencia formativa de los estudiantes. Así mismo, no solo representan una solución económica para las instituciones educativas, sino que también ofrecen conveniencia para los estudiantes y constituyen un recurso fundamental para aquellos con discapacidades o que, por diversas razones, deben cursar estudios a distancia (Colwell et al., 2002) (Scanlon et al., 2004). Además, existen investigaciones (Lustigova & Novotna, 2012), (Corter et al., 2007), (J. Brinson, 2015) que analizan qué tipos de laboratorios resultan más efectivos para fomentar la comprensión conceptual de los temas abordados en actividades de laboratorio. Estas investigaciones han demostrado que tanto las simulaciones como los LR son igual de efectivos que los LT para promover la comprensión de los conceptos del curso específicamente relacionados con los temas tratados en el laboratorio. Esto sugiere que, en aquellos cursos donde el objetivo principal del laboratorio es apoyar la comprensión conceptual del contenido académico, los LR y las simulaciones pueden ser herramientas valiosas.

En los LT, gran parte del tiempo se destina a comprender los procedimientos, así como al montaje y desmontaje de equipos, lo que reduce el enfoque en el desarrollo de una comprensión conceptual sobre la relación entre los datos obtenidos y las teorías o conceptos relevantes . Por otro lado, se ha observado que los estudiantes que participan en LR o basados en simulaciones tienden a recopilar datos de manera individual con mayor frecuencia. Bajo estas condiciones, los estudiantes tienen más oportunidades para repetir experimentos, variar parámetros, observar los efectos de estos cambios y, en general, estructurar su propio aprendizaje (García-Zubía & Gomes, 2007) (Nickerson et al., 2007).

Desde la perspectiva del aprendizaje basado en la indagación, estas oportunidades son particularmente valiosas para el desarrollo y asimilación de conocimientos. En términos más tradicionales, las ventajas observadas en los LR y simulados podrían atribuirse simplemente a un mayor "tiempo dedicado a la tarea" durante la fase de adquisición de datos (Corter et al., 2007), (Nickerson et al., 2007). Por lo mencionado anteriormente se propone diseñar y desarrollar una metodología para la implementación de un LR que permita a los alumnos llevar

a cabo prácticas y experimentos sobre el Reactor Nuclear de investigación RA-4, ya que los mismos facilitan a cada estudiante la realización del experimento de acuerdo con su propio ritmo de aprendizaje y disponibilidad, promoviendo así una mayor autonomía y flexibilidad en el proceso educativo (Corter et al., 2007). Al utilizar instrumentos conectados a computadoras, es posible almacenar datos experimentales con alta precisión, facilitando su posterior análisis e interpretación. Este enfoque de experimentación integrada por computadora resulta especialmente eficaz para la observación de fenómenos complejos y para mejorar la comprensión de conceptos físicos (Soysal, 2000). No obstante, es fundamental destacar que el LR no está concebido como un sustituto del LT, sino como un recurso complementario que amplía y enriquece la experiencia formativa de los estudiantes. Mientras el LT proporciona el contacto directo con los equipos y el entorno físico del reactor, el LR permite extender el tiempo de práctica, repetir experimentos, y reflexionar sobre los datos obtenidos de manera autónoma. En este sentido, ambas modalidades se articulan de manera sinérgica donde los estudiantes continuarán asistiendo al LT para el desarrollo de competencias prácticas esenciales, al tiempo que fortalecerán y consolidarán sus aprendizajes mediante las actividades propuestas en el LR, conformando así un entorno de enseñanza y aprendizaje integral, flexible y robusto. Partiendo de la descripción general de esta experiencia esta tesis avanza en el diseño, desarrollo e implementación técnica de un Laboratorio Diferido (LD) enfocado en el estudio de la radiactividad. El proyecto se orienta a la construcción de una metodología integral que aborde aspectos de ingeniería, control instrumental y gestión digital de datos, con el propósito de replicar de manera remota y asincrónica las condiciones experimentales propias de un LT. Para ello, se propone una arquitectura tecnológica que incorpora sistemas de adquisición de datos, control remoto de equipamiento, almacenamiento estructurado de resultados experimentales y una interfaz web para el acceso diferido a las prácticas. El desarrollo contempla la configuración técnica de los dispositivos, la automatización de procedimientos experimentales, el diseño de entornos interactivos para el usuario, así como la implementación de protocolos seguros de acceso remoto. Esta infraestructura tiene como finalidad permitir que los estudiantes realicen experiencias reales sobre equipamiento físico, bajo condiciones equivalentes a las del laboratorio presencial, asegurando la validez de los resultados obtenidos y el cumplimiento de los objetivos formativos establecidos.

2.7 Sistemas de Gestión de Laboratorios Remotos (RLMS)

Los laboratorios en línea pueden analizarse desde el nivel de modalidad experimental (LR en tiempo real, LD y LV) y desde el nivel de gestión e integración que permite desplegar, operar y escalar dichas modalidades en entornos educativos reales. En este segundo nivel se ubican los Remote Laboratory Management Systems (RLMS), definidos como plataformas de software orientadas a administrar el ciclo de vida de uno o múltiples laboratorios, proporcionando funcionalidades transversales como autenticación/autorización, reserva o gestión de turnos, integración y compartición de recursos experimentales entre distintas plataformas o instituciones, monitoreo de disponibilidad, registro de actividad, y mecanismos de interoperabilidad con entornos institucionales (Orduña et al., 2011), (Tawfik et al., 2012), (Spilakova & Schauer, 2015). Bajo esta perspectiva, un RLMS constituye una capa arquitectónica superior que habilita la operación escalable y el uso curricular de laboratorios distribuidos. Es decir, un mismo laboratorio remoto o diferido puede funcionar como experiencia aislada a nivel técnico, pero adquiere condiciones de sostenibilidad, trazabilidad, integración didáctica y administración institucional cuando se inserta dentro de un RLMS. Esto resulta particularmente relevante en escenarios con alta demanda de usuarios, necesidad de control de acceso y requisitos de disponibilidad y monitoreo, donde la plataforma de gestión pasa a ser un componente central de la arquitectura global (Orduña et al., 2018) . En consecuencia, en esta tesis se adopta el RLMS como marco organizador del estado del arte, diferenciando: (a) modalidades experimentales: LR (sincrónico), LD (asincrónico) y LV (simulado); y (b) capas de gestión e integración: RLMS (autenticación, reservas, monitoreo e interoperabilidad con LMS). Esta distinción permite justificar con mayor precisión las decisiones arquitectónicas del LD propuesto y clarificar qué aspectos del sistema se corresponden con la modalidad diferida y cuáles responden a requisitos de gestión, integración y escalabilidad propios de un entorno institucional.

2.8 Laboratorio Remoto

Los laboratorios remotos (LR) constituyen sistemas tecnológicos que integran hardware e infraestructura experimental real con plataformas de software que permiten su acceso y control a través de Internet (Gomes & Bogosyan, 2009). Mediante esta modalidad, estudiantes, investigadores o profesionales pueden operar instrumentación física ubicada en una instalación distante, ejecutando experimentos en tiempo real a través de una interfaz web o

aplicación específica. A diferencia de los LT, los LR posibilitan la realización de actividades experimentales equivalentes en términos de autenticidad y uso de equipamiento real, pero eliminan las restricciones espaciales y temporales propias del laboratorio presencial (Musa,2012). En este entorno, el usuario puede visualizar el proceso experimental mediante sistemas de videostreaming, recibir datos directamente desde los instrumentos y modificar parámetros de operación de manera interactiva, sin necesidad de presencia física en la instalación (Rodriguez-Gil et al., 2018). El origen de los laboratorios remotos se remonta a principios de la década de 1990 en los Estados Unidos, con iniciativas como el proyecto Collaboratories, cuyo objetivo fue facilitar el acceso remoto a equipamiento científico de alto costo, como telescopios astronómicos, aceleradores de partículas y microscopios de efecto túnel, ampliando así las posibilidades de uso compartido de infraestructura compleja (Arguedas Matarrita & Concari, 2015). A partir de estas primeras experiencias orientadas al ámbito científico, el concepto de acceso remoto comenzó a trasladarse progresivamente al contexto educativo. En 1996, la Universidad de Oregon desarrolló un LR de robótica enfocado en la enseñanza de la ingeniería (Aktan, 1996). Posteriormente, en 1998, la Universidad de Stanford introdujo un laboratorio remoto en el área de óptica (Hesselink et al., 2000). A estas iniciativas se sumaron otros desarrollos relevantes, como el de la Universidad de Brooklyn en el año 2000, donde se implementó una plataforma de acceso remoto para un laboratorio de mecatrónica (Tzes et al., 2001), y el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), que en 2002 desarrolló un LR para microelectrónica (Del Alamo , 2002). En el contexto europeo, diversas universidades incorporaron progresivamente esta modalidad en el marco de la educación a distancia y el e-learning en ingeniería. Entre ellas, la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) desarrolló experiencias de laboratorios remotos en áreas como automática, control y electrónica, alineadas con su modelo institucional de enseñanza no presencial. Estas iniciativas contribuyeron a consolidar el uso de laboratorios remotos como herramienta estratégica para ampliar el acceso a la experimentación real en entornos educativos distribuidos. Entre 2004 y 2006, un grupo de investigadores alemanes realizó un estudio global sobre los LR, identificando que, en 2004, existían 70 laboratorios remotos, cifra que aumentó a 120 experimentos de acceso remoto en 2006 (Gröber et al., 2007). Desde aquel entonces y hasta hoy en día el número de LR accesibles a través de internet ha ido en aumento. Dichos LR pueden aportar muchas ventajas como permitir un mayor acceso a equipos, mayor flexibilidad en la programación del laboratorio, una gama más amplia de posibles tareas o actividades, y mayores oportunidades de colaboración entre los estudiantes.

Así mismo un LR permite a los estudiantes participar en actividades educativas en cualquier momento y desde cualquier lugar con conexión a Internet, lo que contrasta con las actividades presenciales que dependen de los horarios del instituto y la disponibilidad del personal. Una de las limitaciones de los LR es la falta de interacción directa entre estudiantes, dado que estos suelen trabajar de manera individual desde sus hogares frente a una computadora. Sin embargo, el acceso remoto también presenta la ventaja de fomentar la colaboración, al permitir que los estudiantes trabajen juntos de forma asincrónica o sin restricciones de tiempo y espacio, superando así las barreras asociadas al trabajo en equipo tradicional.

	Aspecto	Descripción	Referencia
Ventajas	Flexibilidad temporal y espacial	Permiten acceso desde cualquier ubicación y en horarios extendidos, favoreciendo la repetición experimental.	Potkonjak et al. (2016)
	Optimización de recursos costosos	Facilitan el uso compartido de equipamiento de alto costo entre múltiples instituciones.	Saliah-Hassane et al. (2020)
	Autenticidad experimental	Generan datos con ruido, variabilidad y comportamiento no ideal propios de sistemas reales.	Nickerson et al. (2007)
	Acceso a equipamiento único	Posibilitan el uso remoto de instrumentos inaccesibles por costo o ubicación.	Feisel & Rosa (2005)
	Continuidad en emergencias	Permiten sostener actividades experimentales ante restricciones de acceso físico (ej. pandemia COVID-19).	Grodotzki et al. (2020)

Tabla 1. Ventajas de los LR. Fuente: elaboración propia.

	Aspecto	Descripción	Referencia
Limitaciones	Concurrencia limitada	El acceso simultáneo depende de la cantidad de equipos disponibles.	Zutin et al. (2010)
	Ausencia de manipulación directa	No desarrollan habilidades psicomotrices asociadas al montaje físico del experimento.	Lindsay & Good (2005)
	Riesgo de fallos técnicos	Problemas de hardware, software o red pueden interrumpir la experiencia.	Restivo & Cardoso (2012)
	Complejidad de implementación	Requieren inversión significativa en automatización, seguridad y soporte técnico.	Nickerson et al. (2007)

Tabla 2. Limitaciones de los LR. Fuente: elaboración propia.

Del análisis comparativo presentado en las Tablas 1 y 2 se desprende que los LR constituyen una solución eficaz cuando: (a) la interactividad en tiempo real es pedagógicamente

indispensable, (b) la demanda de usuarios simultáneos es reducida y predecible, y (c) la infraestructura de red es estable y el equipamiento físico está permanentemente disponible (Heradio et al., 2016) (Gomes & Bogosyan, 2009). Sin embargo, en contextos donde la concurrencia es alta, el equipamiento es crítico y su disponibilidad es regulada, como el reactor RA-4, estas condiciones no se verifican de manera sostenida. En tales escenarios, las limitaciones estructurales de sincronía, escalabilidad y dependencia operativa del LR hacen necesario explorar arquitecturas alternativas. El LD surge como respuesta directa a estas restricciones: al desacoplar la adquisición de datos de su acceso pedagógico, elimina la dependencia de la conectividad en tiempo real y permite el acceso simultáneo de un número ilimitado de usuarios sin degradar la calidad ni la autenticidad de la experiencia experimental (Orduña et al., 2016), (Idoyaga et al., 2020). En consecuencia, el LD resulta la alternativa óptima en entornos experimentales de alta complejidad regulatoria, donde la seguridad, la trazabilidad y la escalabilidad son condicionantes primarios, no secundarios.

En la Tabla 3 se sitúa al LR entre los diferentes tipos de entornos de experimentación. Arriba a la izquierda se encuentra el LT donde el recurso es real y permite al alumno estar físicamente frente a él. Debajo, el LR, se distingue del anterior solo en que el alumno no está sentado frente al recurso, sino Internet mediante, permitiendo a los usuarios tener interacciones reales y obtener resultados reales. Un simulador hace una representación de la realidad utilizando para ello un modelo lógico-matemático programado en una computadora, en el mismo es relevante la interfaz que use, ya que se desea que el usuario que experimenta tenga la sensación de estar inmerso en la realidad, aunque ningún dato sea real.

		Naturaleza del recurso	
		Real	**Simulado**
Acceso al recurso	**Local**	Laboratorio tradicional	Laboratorio virtual monousuario
	Remoto	Laboratorio remoto	Laboratorio virtual multiusuario

Tabla 3. Clasificación de los laboratorios remotos. Adaptado de (Bencomo, 2002)

Se presenta una nueva clasificación en la Tabla 4 donde se revisa y amplía la propuesta original de (Bencomo, 2002). En un experimento híbrido, una parte de los componentes es real

mientras que otra parte es simulada, lo que permite integrar tanto entornos físicos como virtuales en una experiencia de laboratorio más flexible y accesible.

		Naturaleza del recurso	
		Real	Simulado
Acceso al recurso	Local	Laboratorio tradicional	Laboratorio virtual monousuario
	Híbrido	Laboratorio híbrido	Laboratorio híbrido
	Remoto	Laboratorio remoto	Laboratorio virtual multiusuario

Tabla 4. Extensión de la clasificación de los laboratorios remotos. Adaptado (Gomes & Bogosyan, 2009)

Así mismo estos LR se pueden categorizar dependiendo de cómo los alumnos interactúan con los experimentos en tres tipos, siguiendo la clasificación realizada por (Harward et al., 2008)

- Batch: el alumno prepara el experimento en la interfaz y lo acciona. Pasado un tiempo, recibe los resultados
- Interactivo: el alumno interactúa continuamente con el experimento a través de la interfaz, cambia sus entradas y ve sus resultados en tiempo real.
- Sensorizado: el alumno simplemente monitoriza y analiza los datos que provienen de sensores, pero en ningún caso influye en la ejecución del experimento.

Y, según cómo se analizan los datos del experimento los laboratorios remotos también pueden ser clasificados como:

- Online o en tiempo real: el alumno analiza los datos en el mismo momento en que estos se generan.
- Offline o en tiempo diferido: los resultados del experimento son analizados en un instante distinto al de su generación, pueden ser horas, días u años.

De acuerdo con esta clasificación, los LR se dividen en dos categorías principales: Laboratorios en Tiempo Real (LTR), en los que la manipulación experimental se realiza de manera sincrónica, y Laboratorios Diferidos (LD), basados en un conjunto de experiencias reales previamente grabadas. En el ámbito de la experimentación con fuentes radiactivas, el uso de LD representa una oportunidad significativa, ya que permite replicar el proceso de manipulación y caracterización de muestras irradiadas con mayor frecuencia. Esto es posible gracias a la disponibilidad de un extenso conjunto de mediciones previamente realizadas.

Además, los LD ofrecen importantes ventajas, como la reducción de riesgos asociados a la manipulación directa de material radiactivo, la optimización del uso de materiales escasos, la mitigación de retrasos causados por fallas en los equipos, y la disminución de los tiempos de espera relacionados con la puesta en marcha del equipo. Al mismo tiempo, garantizan que la experiencia didáctica del estudiante sea equivalente a la obtenida en un laboratorio presencial y en tiempo real, manteniendo su valor educativo.
Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente en este trabajo se desarrolla un LD, basado en experimentos de tipo batch.

Arquitectura de los Laboratorios Remotos

Un LR permite la manipulación de equipamiento físico real a través de redes de comunicación, posibilitando la ejecución de experimentos auténticos sin la presencia física del usuario en el laboratorio. A diferencia de los LV, basados en modelos matemáticos y simulaciones computacionales, los LR operan sobre infraestructura experimental real accesible vía Internet, lo que exige una arquitectura tecnológica robusta y cuidadosamente diseñada (Alves et al., 2018) (Gustavsson, 2002). La arquitectura de un LR puede definirse como el conjunto estructurado de componentes tecnológicos, como el hardware experimental, servidores de control, middleware, sistemas de gestión y entornos de interfaz, que permiten a un usuario remoto interactuar con equipamiento físico real manteniendo integridad operativa, seguridad y trazabilidad de datos (Garcia-Loro et al., 2019) (Kalúz et al., 2013). La arquitectura no se limita a un canal de comunicación remoto, sino que constituye un sistema multicapa donde convergen instrumentación física, control digital, protocolos de red, gestión institucional y diseño pedagógico. Desde una perspectiva funcional, la arquitectura debe satisfacer simultáneamente tres condiciones críticas: accesibilidad universal mediante interfaz web; control seguro y confiable del equipamiento físico y transmisión íntegra y verificable de datos experimentales. En su dimensión física, el LR incorpora instrumentación real, sensores, actuadores, dispositivos de medición o sistemas bajo ensayo, cuya operación remota requiere sistemas de conmutación y control automatizado. El VISIR (Virtual Instruments Systems In Reality) replica una mesa experimental tradicional equipada con instrumentos reales interconectados mediante matrices de relés reconfigurables (Tawfik et al., 2013). Este componente físico introduce restricciones propias como la incertidumbre metrológica, ruido instrumental, tolerancias y límites de operación. Precisamente estas no idealidades constituyen el valor formativo del LR, al permitir que el estudiante experimente condiciones

auténticas imposibles de reproducir completamente en simulaciones (Feisel & Rosa, 2005). Sobre esta infraestructura se dispone una capa de control y middleware que actúa como intermediaria entre la interfaz del usuario y el equipamiento físico. Esta capa traduce las acciones del usuario en comandos ejecutables por el hardware, incorporando mecanismos de validación, seguridad y limitación de rangos operativos. El servidor web cumple aquí un rol central, gestionando autenticación, autorización, reserva de turnos y transmisión de resultados (Castro et al., 2012). Para abordar las limitaciones, se desarrollaron los Sistemas de Gestión de Laboratorios Remotos (RLMS), plataformas que integran múltiples laboratorios bajo un entorno federado de autenticación, reserva y control (Orduña et al., 2011). Los RLMS permiten interoperabilidad con sistemas de gestión del aprendizaje (LMS), facilitando la incorporación del laboratorio remoto dentro de cursos formales y procesos de evaluación (Tawfik et al., 2012). La federación de nodos, donde múltiples laboratorios comparten recursos y distribuyen carga, constituye una estrategia clave para mitigar restricciones de concurrencia y mejorar la disponibilidad del sistema (Orduña et al., 2015). Desde el punto de vista de la seguridad, la arquitectura de un LR debe contemplar tanto protección informática (cifrado, autenticación, control de acceso) como seguridad operacional (limitadores hardware, enclavamientos, parada de emergencia). En entornos de alta criticidad, como instalaciones nucleares, estas exigencias se ven reforzadas por normativas regulatorias estrictas que condicionan el diseño arquitectónico. En síntesis, la arquitectura de un LR integra infraestructura física real, control digital mediado por software, gestión institucional escalable y diseño pedagógico orientado a la autenticidad experimental. No obstante, su dependencia estructural de la sincronicidad y del uso directo del equipamiento físico introduce restricciones de concurrencia, disponibilidad y regulación que pueden limitar su aplicabilidad en ciertos entornos de alta seguridad.

A continuación, se presenta una descripción de la arquitectura de un LR, Figura 18:

- Estudiante o usuario: accede a través de una computadora o dispositivo móvil con conexión a Internet.
- Interfaz web: los estudiantes pueden acceder al laboratorio remoto diferido a través de dos vías, ya sea a través de la página web dicho Instituto responsable o a través de un sistema de gestión de aprendizaje (LMS).
- Servidor web: encargado de proporcionar la interfaz visual, incluyendo audio y video del laboratorio, las acciones disponibles para el usuario, y los resultados obtenidos de dichas acciones (Castro et al., 2012)
- Laboratorio: equipo físico que se controla o manipula de manera remota.

- Cámara web: permite observar en tiempo real las actividades y experimentos que se realizan en el laboratorio.

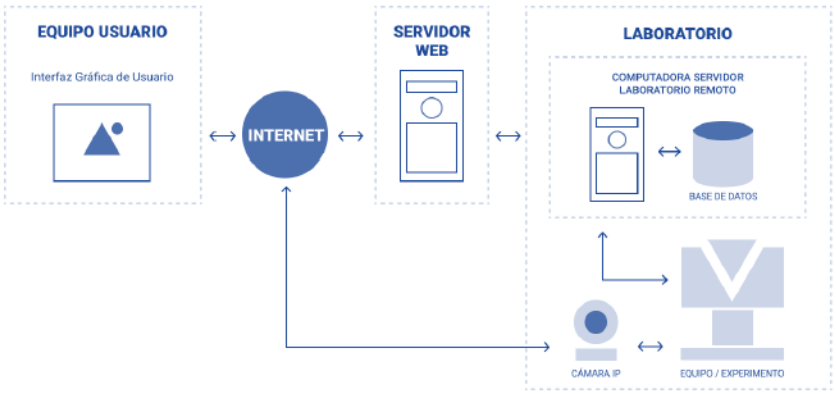


Figura 17. Arquitectura general de un LR (Arguedas Matarrita & Concari, 2018)

En conjunto, la arquitectura representada en la Figura 17 sintetiza el modelo clásico de LR, donde la interacción del usuario se canaliza a través de un servidor web que media el acceso a infraestructura experimental real, incorporando mecanismos de autenticación, control, monitoreo y transmisión de datos. Sin embargo, esta configuración arquitectónica se encuentra estructuralmente condicionada por la disponibilidad simultánea del equipamiento físico, la gestión de turnos y las restricciones operativas del entorno experimental. En contextos de alta criticidad regulatoria, como instalaciones nucleares o laboratorios con acceso restringido, estas limitaciones adquieren mayor relevancia, afectando la escalabilidad y sostenibilidad del modelo sincrónico. Estas consideraciones motivan la exploración de alternativas arquitectónicas que preserven la autenticidad de los datos experimentales reales, pero desacoplen la experiencia de usuario de la operación en tiempo real del equipamiento físico. En este marco, el modelo adoptado en el presente trabajo propone una arquitectura modular basada en la separación funcional entre la capa física de adquisición experimental y las capas de procesamiento, almacenamiento y visualización de datos. La arquitectura modular adoptada, compuesta por un módulo físico de adquisición espectrométrica, un módulo de procesamiento y almacenamiento de datos, y un módulo de interfaz de usuario, resulta consistente con la separación funcional propuesta en la literatura reciente para LR y LD, donde se distinguen claramente los componentes físicos del experimento, los sistemas de gestión y las interfaces de interacción (Fernandez et al., 2024). Esta organización permite desacoplar

temporalmente la ejecución del experimento del acceso del usuario, favoreciendo la escalabilidad, estabilidad operativa y trazabilidad de la información experimental.

2.9 Laboratorio Diferido

Los laboratorios diferidos (LD), constituyen una modalidad específica de experimentación remota en la que los usuarios interactúan con datos experimentales reales previamente adquiridos, en lugar de controlar el equipamiento físico en tiempo real (Harward et al., 2008). A diferencia de los simuladores, los LD trabajan exclusivamente con mediciones auténticas obtenidas mediante instrumentación física calibrada, conservando las características propias del fenómeno estudiado, tales como variabilidad experimental, ruido de medición, errores sistemáticos y aleatorios e incertidumbres asociadas. La diferencia central respecto de los laboratorios remotos convencionales radica en la desacoplación temporal entre la generación de los datos y su análisis: el experimento se ejecuta previamente y sus resultados quedan almacenados en bases de datos estructuradas para su posterior consulta (Orduña et al., 2016). Entre sus rasgos distintivos se encuentran el acceso asincrónico, que suprime las restricciones de concurrencia y posibilita la interacción con los datos en cualquier momento, la trazabilidad basada en metadatos, mediante la cual se registran de manera sistemática las condiciones experimentales, las calibraciones, las fechas de adquisición y los parámetros contextuales, la alta escalabilidad, al no depender del uso simultáneo del equipamiento físico, y su carácter de repositorio de experiencias, que permite almacenar y reutilizar conjuntos de datos reales para distintas cohortes y finalidades pedagógicas. Desde el punto de vista operativo y educativo, los LD ofrecen ventajas significativas, Permitiendo el acceso simultáneo ilimitado sin sistemas de reserva, reduciendo riesgos en entornos con materiales peligrosos (por ejemplo, radiactivos), optimizan el uso de recursos costosos y garantizan continuidad académica aun ante fallos técnicos del laboratorio físico. Además, fortalecen la reproducibilidad científica, ya que múltiples usuarios pueden analizar los mismos conjuntos de datos bajo condiciones controladas. No obstante, presentan ciertas limitaciones como la interactividad se restringe a los parámetros previamente definidos en el diseño experimental original, su efectividad depende de la calidad y cobertura del repositorio de datos, y pueden generar en algunos estudiantes la percepción de menor autenticidad al no manipular el equipo en tiempo real. Asimismo, requieren sistemas robustos de gestión de bases de datos, interfaces intuitivas y estrategias de actualización continua para mantener la vigencia y pertinencia del repositorio experimental.

Los primeros desarrollos formales de LD se registran en 2019 en la Universidad de Georgia, con la implementación de un Laboratorio de Difusión en Líquido. Posteriormente, la UNED presentó el Laboratorio Diferido de Valoración Ácido-Base (LD-VAB) en colaboración con LabsLand, especialmente en el contexto de la pandemia de COVID-19. En Argentina, la Universidad de Buenos Aires (UBA), a través del Ciclo Básico Común (CBC), implementó el LD-VAB en asignaturas de química en dos fases: una primera evaluación de la percepción de 1.400 estudiantes y una segunda centrada en 28 docentes. Los resultados evidenciaron que estos laboratorios son percibidos como herramientas eficaces para el desarrollo de competencias intelectuales, diseño experimental, análisis de datos empíricos e identificación de variables, y sensoriomotoras, en concordancia entre docentes y estudiantes (Idoyaga et al., 2020). En este sentido, los LD pueden entenderse como una evolución de los laboratorios remotos, al conservar la autenticidad de los datos experimentales reales y ofrecer una experiencia funcionalmente similar a la de un LR en tiempo real, pero con mayor escalabilidad y flexibilidad operativa. En esta línea, (Fernandez et al., 2024), a partir de un análisis bibliométrico de la producción científica entre 2000 y 2020, identifican los LD como un escenario específico de laboratorio no tradicional caracterizado por basarse en sistemas físicos reales cuyos resultados han sido previamente registrados y almacenados en bases de datos, siendo posteriormente servidos bajo demanda mediante interfaces remotas. Esta conceptualización permite diferenciar claramente a los LD tanto de los LV basados en simulación como de los LR sincrónicos, en los cuales la interacción ocurre en tiempo real.

	Aspecto	Descripción	Referencia
Ventajas	Eliminación de restricciones de concurrencia	Acceso simultáneo ilimitado sin reservas ni colas de espera, adecuado para cursos masivos.	Rojko et al., 2019
	Reducción de riesgos operativos	Minimiza exposición a entornos peligrosos manteniendo autenticidad de datos reales.	Radianti et al., 2020
	Optimización de recursos costosos	Reutilización pedagógica de datos obtenidos con materiales escasos o de alto costo.	Reidsema et al., 2017
	Resiliencia ante fallos técnicos	Continuidad formativa aun ante interrupciones del equipamiento físico.	Machotka et al., 2020
	Reproducibilidad y verificación	Comparación de resultados entre usuarios trabajando con los mismos conjuntos de datos.	Jara et al., 2008

Tabla 5. Ventajas de un LD. Fuente: elaboración propia.

	Aspecto	Descripción	Referencia
Limitaciones	Interactividad reducida	Restricción a parámetros previamente definidos en el diseño experimental original.	Triona & Klahr, 2003
	Dependencia de la calidad del repositorio	La efectividad depende de la cobertura y documentación de los datos disponibles.	Sauter et al., 2013
	Percepción de menor autenticidad	Algunos estudiantes pueden percibir menor realismo al no manipular equipamiento en tiempo real.	Post et al., 2018
	Actualización y mantenimiento	Necesidad de renovar y ampliar periódicamente el repositorio experimental.	Marques et al., 2014
	Sistemas robustos de gestión	Requiere bases de datos estructuradas, motores de búsqueda eficientes e interfaces intuitivas.	Zutin et al., 2010

Tabla 6. Limitaciones de los LD. Fuente: elaboración propia.

El conjunto de ventajas y limitaciones identificadas en las Tablas 5 y 6 permite definir con precisión las condiciones bajo las cuales el LD constituye la modalidad óptima de experimentación. De acuerdo con (Orduña et al., 2016), el LD es especialmente adecuado cuando: (i) la disponibilidad del equipamiento físico es intermitente o está sujeta a regulación estricta; (ii) el número de usuarios potenciales supera con creces la capacidad de atención sincrónica del sistema; (iii) los tiempos de adquisición son prolongados e incompatibles con sesiones remotas en tiempo real; y (iv) la seguridad operativa exige que las mediciones se realicen bajo supervisión especializada no escalable. En el contexto del RA-4, las cuatro condiciones se verifican simultáneamente, lo que hace del LD no una alternativa de compromiso, sino la arquitectura técnica y pedagógicamente más adecuada. Esta conclusión es consistente con los hallazgos de (Idoyaga et al., 2020) en el contexto del LD-VAB implementado en la Universidad de Buenos Aires. Asimismo, (Gamage et al., 2020) señalan que los LD optimizan el uso de recursos físicos al permitir que una única campaña experimental sirva a múltiples cohortes, lo cual resulta crítico cuando el recurso experimental es escaso, costoso o implica riesgos radiológicos. En este sentido, las limitaciones propias del LD como la interactividad acotada al diseño experimental original y dependencia de la calidad del repositorio, no constituyen obstáculos estructurales, sino condiciones de diseño que la metodología propuesta en esta tesis aborda mediante la estandarización de protocolos, la cobertura sistemática del espacio de variables y la implementación de metadatos de trazabilidad.

2.10 Laboratorios Virtuales

Los laboratorios virtuales (LV), también denominados simuladores o entornos de experimentación simulada, son sistemas computacionales que replican fenómenos físicos, químicos o biológicos mediante modelos matemáticos y algoritmos numéricos (Potkonjak et al., 2016). En el caso de las redes de sensores inalámbricas (WSN, Wireless Sensor Networks), estos entornos permiten ejecutar experimentos y validar algoritmos sin requerir infraestructura física, lo que los convierte en una alternativa eficiente para las fases iniciales de diseño, prueba y optimización. Su utilización constituye el método más difundido para la evaluación del desempeño de protocolos de comunicación, esquemas de enrutamiento, gestión energética y mecanismos de sincronización en WSN. A través de simulaciones reproducibles, los investigadores pueden analizar el impacto de distintos parámetros sin los costos y limitaciones logísticas asociados al despliegue físico (Almazaydeh et al., 2010) (Dave & Dalal, 2013). Entre sus principales ventajas se destacan el bajo costo operativo, la facilidad de uso, el ahorro de tiempo en la experimentación y la capacidad de escalar escenarios complejos. Sin embargo, su precisión depende de la calidad del modelo empleado, dado que toda simulación constituye una abstracción de la realidad. Ningún simulador puede representar en su totalidad las condiciones ambientales, las interferencias o las fallas aleatorias del hardware, por lo que los resultados deben interpretarse con criterios de validación y contraste experimental. En el ámbito educativo, una herramienta de amplia difusión es PhET Interactive Simulations (*PhET: Free online physics, chemistry, biology, earth science and math simulations*, 2024), desarrollada por la Universidad de Colorado Boulder. Esta plataforma ofrece un conjunto de simulaciones interactivas orientadas a la enseñanza de la física y otras ciencias experimentales, permitiendo al estudiante explorar fenómenos y relaciones entre variables de manera intuitiva y segura. Si bien su finalidad no es la validación técnica de algoritmos o redes, PhET constituye un referente pedagógico clave al facilitar la comprensión conceptual de los fenómenos físicos mediante la experimentación virtual. En este sentido, representa un antecedente relevante para el desarrollo de entornos más complejos, como los LR y LD, donde se combinan la interactividad educativa y el uso de datos experimentales reales. Cada herramienta de simulación ofrece fortalezas y limitaciones específicas. Algunos simuladores son más adecuados para pruebas de gran escala, mientras que otros priorizan la precisión temporal o la simulación de energía (Khan et al., 2011). Por ejemplo: NS-2 y NS-3, ampliamente utilizados en el ámbito académico, permiten evaluar protocolos de red, consumo de energía y desempeño en escenarios heterogéneos; Cooja (Contiki OS) posibilita simular

redes completas que combinan nodos físicos y virtuales, integrando modelos de energía, radio y pila de protocolos IP; J-Sim y QualNet ofrecen mayor precisión temporal y capacidad de simulación a gran escala, siendo adecuados para investigaciones de comportamiento dinámico y modelado energético. Por lo tanto, la selección del simulador adecuado depende de los objetivos y restricciones del experimento, del nivel de detalle requerido y del tipo de fenómeno que se desea estudiar.

	Aspecto	Descripción	Referencia
Ventajas	Costo mínimo de implementación	Una vez desarrollado el software, no requiere equipamiento físico ni consumibles.	Lalley et al., 2010
	Seguridad total	Permite explorar escenarios peligrosos sin riesgos reales para el usuario.	Chittaro & Buttussi, 2015
	Exploración ilimitada de parámetros	Posibilita modificar variables incluso en rangos extremos o irreales para análisis conceptual.	Wieman et al., 2008
	Retroalimentación instantánea	Genera resultados inmediatos, favoreciendo ciclos rápidos de prueba y error.	Mikropoulos & Natsis, 2011
	Comprensión conceptual	Facilita visualización de fenómenos abstractos o microscópicos, apoyando modelos mentales adecuados.	Pyatt & Sims, 2012

Tabla 7. Ventajas de los LV. Fuente: elaboración propia.

	Aspecto	Descripción	Referencia
Limitaciones	Ausencia de autenticidad experimental	No expone a incertidumbres, errores o variabilidad propias de sistemas reales.	Hofstein & Lunetta, 2004
	Dependencia del modelo matemático	La validez depende completamente de la exactitud y supuestos del modelo im	

Tabla 8. Limitaciones de los LV. Fuente: elaboración propia.

Considerando las ventajas y limitaciones, Tablas 7 y 8, los LV constituyen herramientas pedagógicas de alto valor para la comprensión conceptual, la exploración interactiva de variables y la experimentación segura en entornos donde el acceso físico resulta complejo o riesgoso. Su bajo costo operativo, escalabilidad y capacidad de visualización de fenómenos abstractos los convierten en recursos ampliamente adoptados en educación científica y tecnológica. No obstante, su dependencia de modelos matemáticos idealizados y la ausencia de variabilidad, incertidumbre y error experimental propios de sistemas reales limitan el

desarrollo de competencias experimentales auténticas. Asimismo, la imposibilidad de interactuar con instrumentación física restringe la adquisición de habilidades técnicas y metodológicas esenciales en disciplinas ingenieriles y científicas. En consecuencia, si bien los LV resultan adecuados para etapas iniciales de aprendizaje y análisis conceptual, presentan restricciones cuando el objetivo formativo requiere trabajar con datos experimentales reales, preservar la trazabilidad metrológica o desarrollar competencias vinculadas al análisis de resultados empíricos. Esta tensión entre accesibilidad, escalabilidad y autenticidad experimental pone en evidencia la necesidad de modalidades intermedias que permitan preservar la fidelidad metrológica de los datos reales sin comprometer la seguridad operativa ni la disponibilidad del equipamiento crítico. En este marco, el LD se configura como una alternativa tecnológica que desacopla temporalmente la adquisición experimental del acceso pedagógico a los datos, manteniendo su trazabilidad y origen físico. En la Tabla 9 se presenta una comparación sintética entre LR, LD y LV, considerando criterios técnicos, operativos y formativos relevantes.

CRITERIO	LR	LD	LV
Naturaleza de los datos	Datos reales de equipamiento físico en tiempo real	Datos reales previamente capturados, accedidos de forma asincrónica	Datos generados por simulación computacional (modelos matemáticos)
Modalidad temporal	Sincrónica (tiempo real)	Asincrónica (diferida)	Instantánea (sin esperas)
Escalabilidad (usuarios simultáneos)	Limitada (un usuario por equipo)	Muy alta (ilimitado)	Muy alta (ilimitado)
Autenticidad experimental	Alta (experimentos reales con variabilidad natural)	Alta (datos reales, aunque pre-registrados)	Baja (simulación idealizada)
Costo de implementación	Alto (equipamiento + automatización + mantenimiento)	Medio-Alto (equipamiento + sistema de gestión de datos)	Bajo (solo desarrollo de software)
Flexibilidad de exploración	Media (dentro de capacidades del equipo real)	Limitada (solo parámetros pre-registrados)	Muy alta (exploración libre dentro del modelo)
Seguridad para usuarios	Media-Alta (riesgo indirecto de daño a equipos)	Total (sin contacto con materiales peligrosos)	Total (entorno completamente virtual)
Desarrollo de habilidades manuales	Nulo (sin manipulación física)	Nulo (sin manipulación física)	Nulo (sin manipulación física)
Idoneidad pedagógica principal	Formación técnica universitaria en experimentación real	Contextos con limitaciones de acceso, seguridad o recursos	Educación básica/media, comprensión conceptual

Tabla 9. Comparación entre los distintos Laboratorios. Fuente: elaboración propia.

Del análisis comparativo presentado en la Tabla 9 se desprende que LD ocupa una posición intermedia estratégica entre el LR y el LV basado en simulación. Mientras que los LR garantizan máxima autenticidad experimental pero presentan limitaciones severas de escalabilidad y alta dependencia operativa del equipamiento físico, y los LV ofrecen accesibilidad y flexibilidad prácticamente ilimitadas a costa de la idealización del fenómeno físico, el LD logra conservar la fidelidad de datos experimentales reales desacoplando la instancia de adquisición de la instancia de acceso pedagógico. Esta arquitectura resulta particularmente pertinente cuando se analiza el contexto específico del Reactor RA-4, cuya naturaleza operativa impone restricciones técnicas, regulatorias y logísticas que condicionan fuertemente la viabilidad de otras modalidades.

El RA-4 constituye una infraestructura científica estratégica, sometida a estrictos protocolos de seguridad radiológica y regulaciones establecidas por la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN), que exigen autorizaciones específicas, monitoreo dosimétrico y cumplimiento de límites de exposición a radiaciones ionizantes. En un esquema de LR, cada sesión experimental requeriría la supervisión permanente de personal habilitado para garantizar el posicionamiento seguro de fuentes radiactivas y la respuesta ante eventuales contingencias, eliminando las ventajas de flexibilidad temporal que justifican la virtualización del acceso. En cambio, el enfoque diferido permite realizar campañas experimentales bajo condiciones estrictamente controladas y documentadas por personal especializado, capturando datos auténticos, calibrados y trazables, que luego pueden ser utilizados con fines formativos sin necesidad de supervisión radiológica continua. De esta manera, se optimiza el uso de recursos humanos altamente calificados y se garantiza seguridad absoluta para los usuarios finales. Asimismo, las muestras irradiadas en el RA-4 constituyen un recurso limitado cuyo aprovechamiento debe maximizarse. En un LR, el tiempo de uso del equipamiento se consume proporcionalmente al número de usuarios, reduciendo drásticamente la cantidad de estudiantes que pueden trabajar con una misma muestra. El LD, al basarse en mediciones previamente registradas con alta calidad estadística, permite que una única campaña experimental sirva a múltiples cohortes durante períodos prolongados, multiplicando el valor pedagógico de cada irradiación. Por otra parte, los experimentos de espectrometría gamma requieren tiempos de adquisición variables, que pueden extenderse desde decenas de minutos hasta varias horas dependiendo de la actividad de la muestra y la resolución estadística deseada. En un esquema remoto sincrónico, esta característica obligaría a los usuarios a permanecer conectados durante todo el proceso de conteo, generando ineficiencia, vulnerabilidad ante fallas de conectividad y reducción

significativa de la capacidad de atención simultánea. El enfoque diferido elimina esta restricción temporal: las mediciones se realizan con tiempos óptimos de adquisición y los estudiantes acceden de manera instantánea a espectros completos y de alta calidad, concentrando el proceso formativo en el análisis, la interpretación y la comprensión física del fenómeno. La escalabilidad constituye otro factor determinante, el IENRI atiende múltiples carreras de grado, posgrado y actividades de extensión profesional, superando ampliamente la capacidad que podría ofrecer un único sistema de espectrometría operando en modalidad remota sincrónica. El LD elimina esta restricción estructural, permitiendo acceso simultáneo a cientos o miles de usuarios sin degradación de la experiencia ni incremento proporcional de costos operativos. Finalmente, la continuidad operativa y la resiliencia del sistema representan ventajas sustanciales del enfoque diferido.

En consecuencia, el análisis técnico, operativo y pedagógico del contexto RA-4 conduce a una conclusión consistente: el LD no constituye una solución de compromiso, sino una arquitectura optimizada para entornos nucleares donde la seguridad, la trazabilidad metrológica, la escasez de recursos experimentales y la necesidad de escalabilidad convergen. Esta elección metodológica preserva la autenticidad de los datos reales, garantiza seguridad radiológica absoluta, maximiza el aprovechamiento de muestras irradiadas, asegura continuidad operativa y posibilita acceso masivo sin sacrificar calidad formativa, consolidándose como el núcleo innovador de la propuesta desarrollada en esta tesis.

2.11 Ejemplos de Laboratorios Remotos y Repositorios

Diversas iniciativas internacionales han desarrollado plataformas y/o repositorios de laboratorios remotos orientados a facilitar el acceso a la experimentación científica desde entornos virtuales. Se destacan algunos ejemplos como el Laboratorio Remoto del Grupo Galileo, centrado en la enseñanza de física; Go-Lab y e-Laboratory Project, que ofrecen entornos integrados para prácticas en ciencias y tecnología; así como redes como RemLabNet y LabsLand, que permiten el acceso a laboratorios distribuidos globalmente. También se encuentran propuestas específicas como el Laboratorio Remoto de Queensland, y el LabRem-FCEIA, todos ellos orientados a promover el aprendizaje experimental en disciplinas como física, ingeniería y tecnología.

2.11.1 Laboratorio Remoto del Grupo Galileo

Dicho Laboratorio se encuentra en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral (García Zubía & Alves, 2011)

El mismo dispone de equipos para la realización remota de tres conjuntos de experimentos:

1: Experimentos con circuitos RC, RL y RLC en estado transitorio, Figura 18.

2: Experiencias de cinemática y dinámicas de rotación y traslación de un volante a lo largo de un carril inclinado, Figura 19.

3: Mediciones del campo magnético generado por un solenoide, Figura 20.

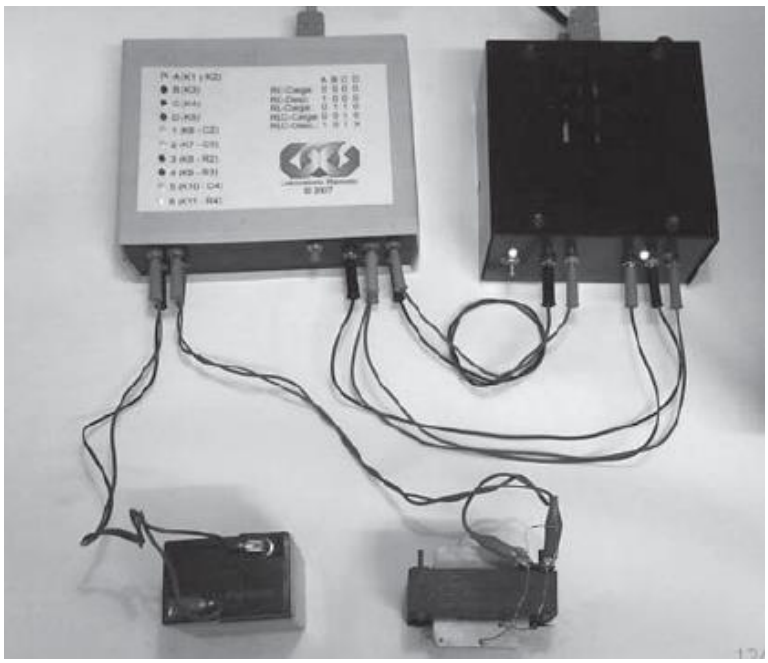


Figura 18. Experimentos con circuitos RC, RL y RLC en estado transitorio (García Zubía & Alves, 2011)

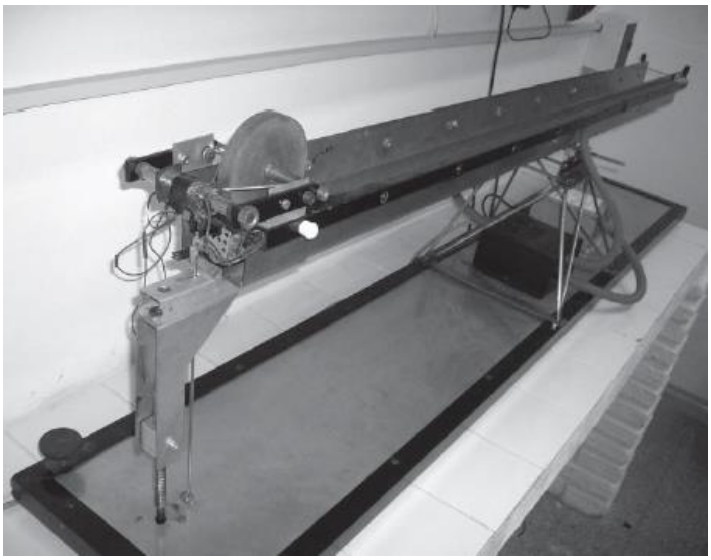


Figura 19. Experiencias de cinemática y dinámicas de rotación y traslación de un volante a lo largo de un carril inclinado (García Zubía & Alves, 2011).

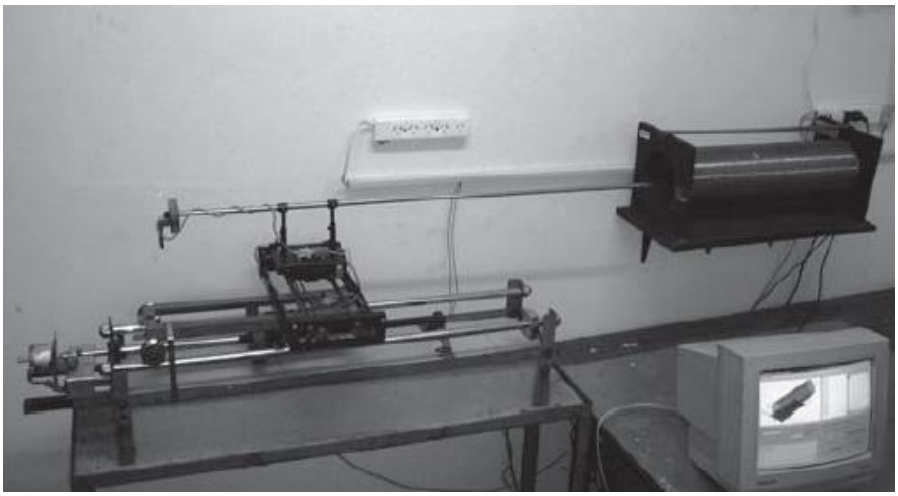


Figura 20. Mediciones del campo magnético generado por un solenoide (García Zubía & Alves, 2011).

Los tres experimentos han sido diseñados con una arquitectura similar, la cual se ilustra en la Figura 20. Se emplea un servidor en el laboratorio conectado a la red de la UNL, para gestionar el acceso a través de Internet. Las conexiones eléctricas se establecen entre los puertos serie y/o paralelo de la computadora y los experimentos mediante interfaces de conversión analógico-digital. A través de estas interfaces, el sistema permite el desplazamiento de componentes móviles, los cuales son controlados paso a paso mediante motores. Las órdenes

de desplazamiento que se envían conforman los circuitos eléctricos, y se realizan lecturas de datos horarios o de voltaje según sea necesario.

El control y la medición experimental se realizan mediante aplicaciones programadas en Delphi, las cuales están conectadas a subprogramas en Java ubicados en páginas web en el servidor central, permitiendo así el acceso remoto de los usuarios a través de Internet. Las interfaces de usuario utilizadas fueron desarrolladas en el mismo laboratorio donde se encuentran instalados los equipos remotos.

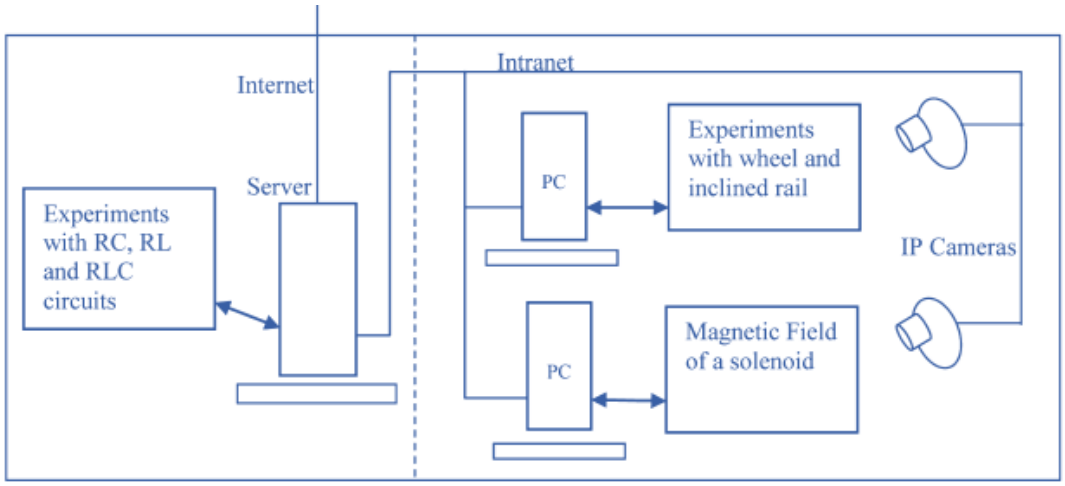


Figura 21. Arquitectura del Laboratorio Remoto (García Zubía & Alves, 2011)

La no actualización de los programas ha provocado que estos laboratorios se encuentran actualmente fuera de servicio.

2.11.2 Go – Lab

El proyecto Go-Lab, Figura 22, (Global Online Science Labs for Inquiry Learning in Schools), financiado por la Unión Europea desde 2012, tiene como objetivo incentivar el interés de los estudiantes entre 10 y 18 años en las disciplinas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM). Además, dicho proyecto ofrece un portal que cuenta con una extensa colección de más de 600 laboratorios remotos y virtuales, y registra la participación de alrededor de 30,000 docentes y 90,000 estudiantes de 157 países, quienes han utilizado estos recursos educativos en línea para complementar su formación en STEM. (Palau et al., 2020)

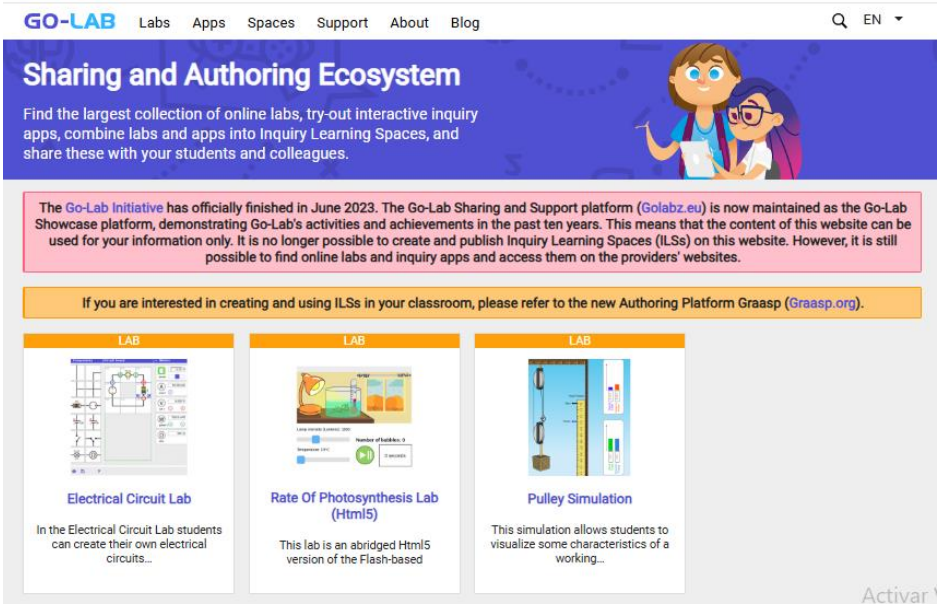


Figura 22. Página de Go-Lab (thttps://www.golabz.eu/)

2.11.3 e-Laboratory Project

Este proyecto, desarrollado por la Facultad de Matemáticas y Física de la Universidad Carolina de Praga en la República Checa, ha contado con laboratorios remotos (LR) desde 2002, Figura 23. Desde sus inicios, participaron la Universidad Carolina, responsable del hardware y software, la Universidad Tomas Bata en Zlín, que contribuyó con el diseño experimental, y la Universidad de Trnava, que proporcionó apoyo pedagógico para los experimentos (Ozvoldova et al., 2005). El proyecto ofrece una amplia gama de experimentos de física que incluyen, entre otros: difracción en microobjetos, inducción electromagnética, oscilaciones naturales y forzadas, estudios sobre el campo magnético, análisis del efecto fotoeléctrico, polarización de la luz, estudios de radiactividad, procesos de rectificación, circuitos RLC, la medición de la constante de Planck, etc. Donde cada práctica incluye la motivación inicial, la fundamentación teórica de los principios físicos, una ilustración detallada del experimento, las actividades específicas a realizar, materiales audiovisuales que muestran el diseño experimental y, finalmente, la ejecución del experimento



Figura 23. Página del e-Laboratory Project (http://www.ises.info/index.php/en).

Desde el punto de vista tecnológico, el e-Laboratory Project se sustenta en una arquitectura técnica explícita basada en el sistema ISES (Internet School Experimental System). Tal como describen (Schauer et al., 2008) la implementación adopta un modelo cliente–servidor donde el hardware experimental se conecta a una interfaz ISES que actúa como sistema de adquisición de datos, integrándose a un servidor local que gestiona la comunicación con el usuario remoto a través de servicios web. La arquitectura contempla la adquisición y procesamiento de señales en el servidor, la visualización del experimento mediante cámara web y la transferencia bidireccional de datos hacia el cliente remoto a través de una interfaz web basada en applets Java. En la Figura 24 se presenta el esquema arquitectónico publicado por (Schauer et al., 2008), donde se observa la integración entre sensores, interfaz ISES, servidor experimental y cliente web, constituyendo uno de los primeros modelos formalizados de arquitectura para laboratorios remotos en física.

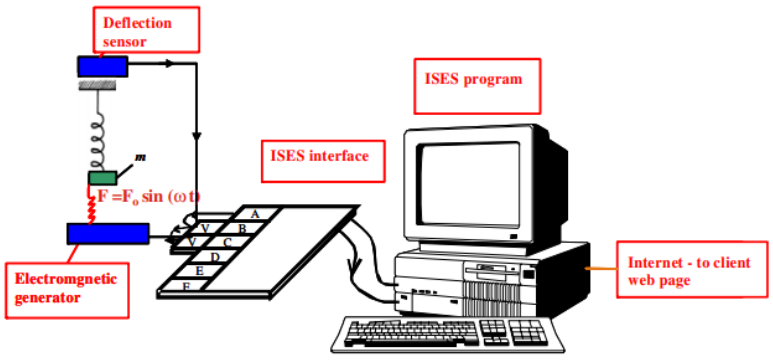


Figura 24. Arquitectura cliente–servidor del laboratorio remoto basado en ISES (Schauer et al., 2008).

2.11.4 RemLabNet

RemLabNet ha sido concebido como un Remote Laboratory Management System (RLMS) orientado a la gestión e integración de laboratorios remotos preexistentes en distintas instituciones europeas, Figura 25. Diseñado para su aplicación tanto en el nivel secundario como universitario, el sistema incorpora y amplía algunos experimentos del proyecto e-Laboratory, proporcionando una plataforma más estructurada, robusta y escalable (Spilakova & Schauer, 2015).

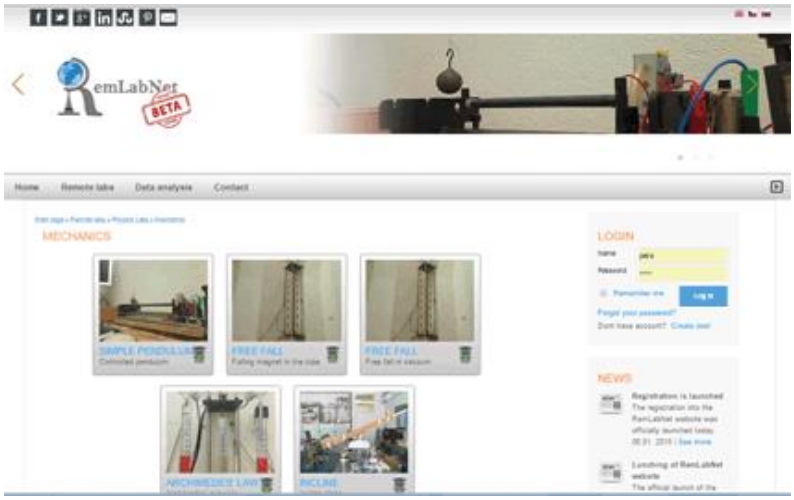


Figura 25. Página de RemLabNet; Physics experiments (Spilakova & Schauer, 2015).

Entre sus funcionalidades principales se destacan la administración centralizada de usuarios, la gestión de reservas y experimentos, el almacenamiento seguro de datos y el registro de uso, lo que fortalece la trazabilidad y continuidad operativa. Asimismo, incorpora herramientas visuales para indicar el estado del laboratorio remoto, por ejemplo, un sistema tipo “semáforo” que señala si el experimento se encuentra disponible, en uso o fuera de servicio, con el objetivo de optimizar la experiencia del usuario y evitar desmotivación durante los tiempos de espera (Schauer et al., 2017). En términos pedagógicos, RemLabNet integra apoyos didácticos tales como guías de uso, videos explicativos e instrucciones detalladas para la realización de cada experiencia. Además, su arquitectura como se muestra en la Figura 26, permite la interoperabilidad con el proyecto Go-Lab (Schauer et al., 2017) (De Jong et al., 2014), facilitando la incorporación de estos LR dentro de entornos educativos formales en Europa. Entre los experimentos gestionados por la plataforma se incluyen el péndulo simple, caída libre

I y II, principio de Arquímedes, plano inclinado, experimento de Joule, circuitos RLC (energía y fase), emisión de LEDs, sistemas fotovoltaicos y ley de Faraday.

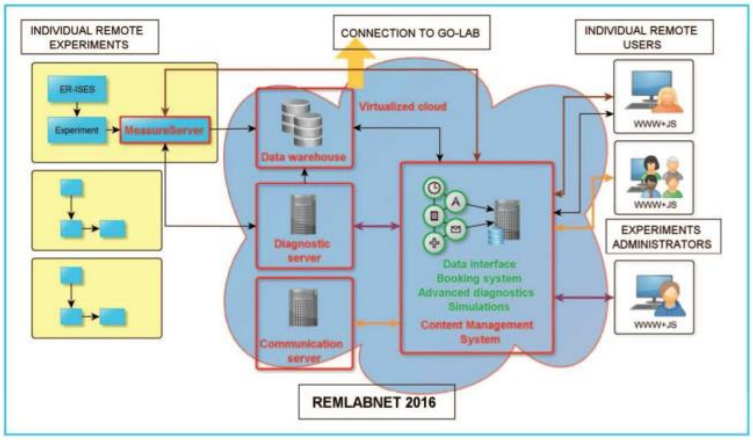


Figura 26. Arquitectura REMLABNET (Schauer et al., 2016).

2.11.5 LabsLand

LabsLand, Figura 27, es una empresa dedicada a la provisión de laboratorios remotos. Entre sus productos y servicios se incluyen:

- Suscripciones a una amplia red global de laboratorios remotos.
- Venta de equipos de laboratorio que las instituciones pueden implementar para integrarse en la plataforma.
- Desarrollo de nuevos laboratorios remotos, generalmente en colaboración con universidades, lo que garantiza su relevancia y calidad académica (Orduña et al., 2016)



Figura 27. Página Web de LabsLand. https://labsland.com/es.

Dentro de LabsLand podemos observar el Laboratorio Diferido de Radioactividad de Queensland, Figura 28. Dicho Laboratorio utiliza un contador Geiger-Muller, fuentes de Americio, Estroncio y Cobalto; y como absorbentes: papel, Aluminio y Plomo. Permite seleccionar la distancia dependiendo del absorbente seleccionado, el tiempo 2, 5 o 10 segundos y la repetición del experimento que también varía según el absorbente.

Dicho detector Gaseoso o de ionización funciona cuando la radiación emitida por una fuente radioactiva atraviesa la materia, interactúa con los átomos y moléculas (o, con mayor precisión, con los electrones y núcleos) que la constituyen, transfiriéndoles su energía y generando, principalmente, procesos de ionización y excitación. La ionización, como proceso predominante, da origen a la denominación de "radiación ionizante" para estas emisiones nucleares. Ambos procesos, ionización y excitación, desempeñan un papel fundamental en la detección de la radiación. Sin embargo, como mencionamos anteriormente, en dicho LD utilizamos un detector de centello, dicho detector ofrece ventajas significativas sobre el detector Geiger-Müller en la detección de radiación, particularmente en cuanto a sensibilidad y eficiencia. Los detectores de centelleo destacan por su mayor sensibilidad para la detección de niveles bajos de radiación, lo que permite registrar una amplia gama de energías. Esto es posible debido a su capacidad para convertir la energía de la radiación en pulsos de luz, los cuales son amplificados por un fotomultiplicador, generando así una señal precisa y detallada. En cuanto a la respuesta energética, a diferencia del contador Geiger-Müller, que produce pulsos de tamaño constante sin importar la energía de la radiación, el detector de centelleo permite la diferenciación entre energías, facilitando así la identificación de distintos tipos de

radiación. Además, estos detectores poseen capacidad para proveer información detallada sobre la energía de la radiación detectada, a diferencia del Geiger-Müller, que solo contabiliza partículas sin discriminar su energía.



Figura 28. Laboratorio Diferido de Queensland. https://labsland.com/es.

2.11.6 LabRem-FCEIA

El Laboratorio de Experimentación Remota, perteneciente al Departamento de Educación a Distancia de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario, Figura 29, tiene como objetivo principal apoyar el desarrollo e implementación de prácticas de laboratorio accesibles de manera remota. Este enfoque facilita la incorporación de innovaciones pedagógicas en el ámbito de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), integrando desarrollos tecnológicos con prácticas educativas. La plataforma LabRem-FCEIA reúne diversos recursos didácticos en un entorno unificado, incluyendo LR, simulaciones interactivas y LD, en áreas como Física, Electrónica, Matemática, entre otras disciplinas del ámbito científico y tecnológico.



Figura 29. Página Web de LabRem-FCEIA. https://labremf4a.fceia.unr.edu.ar/labrem/.

Dentro de LabRem se encuentra el Laboratorio de Transductores y Física nuclear, laboratorio docente perteneciente al Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán, Figura 30. Las prácticas de dicho laboratorio surgieron en pandemia donde los docentes simularon en geogebra. Las simulaciones representan mediciones reales obtenidas con los equipos del laboratorio. Para implementar este enfoque, es necesario construir una base de datos que registre dichas mediciones y utilizarlas para calcular nuevos valores en función de las condiciones específicas seleccionadas para un caso particular.



Figura 30. Página de mediciones nucleares de la Universidad de Tucumán. https://labremf4a.fceia.unr.edu.ar/labrem/.

Entre las desventajas identificadas de este tipo de laboratorio se encuentran las siguientes: no permite la interacción directa con equipos reales, ya que se basa exclusivamente en simulaciones; requiere de una guía detallada para evitar una comprensión insuficiente de los fenómenos estudiados; presenta problemas relacionados con la actualización de versiones, dado que algunos estudiantes pueden no contar con las versiones más recientes del software necesario. Asimismo, carece de herramientas colaborativas que faciliten el trabajo en equipo y no ofrece al tutor la posibilidad de realizar un seguimiento continuo y detallado del progreso de los estudiantes. Finalmente, este laboratorio no trabaja con instrumentos reales, lo que limita la experiencia práctica en contextos experimentales (Veloza García, 2020).

Aunque existen estos dos laboratorios virtuales de radioactividad destacados, como el desarrollado por la Universidad de Tucumán y el LR de Queensland, **el laboratorio propuesto en esta tesis presenta ventajas significativas en varios aspectos**. En comparación con la simulación de la Universidad de Tucumán, este laboratorio ofrece un entorno más cercano a la práctica real, evitando la excesiva simplificación de la realidad que caracteriza a dicha simulación. Esto incluye el uso de equipos virtuales que se asemejan a los utilizados en los laboratorios tradicionales, actualizados y con mayor precisión en su representación. Por otro lado, respecto al LR de Queensland, el sistema de detección implementado en este LD brinda información más detallada, lo que enriquece la experiencia del usuario y mejora la comprensión de los fenómenos estudiados.

2.12 Revisión Comparativa de Laboratorios Remotos

La expansión de los LR en el ámbito universitario ha dado lugar a una diversidad de plataformas tecnológicas que, si bien comparten el propósito de facilitar el acceso a prácticas experimentales a distancia, difieren sustancialmente en su arquitectura, modelo de gestión, grado de integración institucional y enfoque pedagógico. Estas iniciativas, en su mayoría desarrolladas en el marco de proyectos internacionales de cooperación académica, constituyen referentes consolidados para la implementación de experiencias locales y para el análisis comparativo de modelos tecnológicos aplicados a la enseñanza experimental mediada por Internet. Entre las plataformas más relevantes se encuentran Go-Lab, LabsLand, RemLabNet, WebLab-Deusto y MIT iLabs, las cuales han sido pioneras en la construcción de infraestructuras que permiten operar equipamiento real de manera remota o gestionar entornos experimentales distribuidos. No obstante, cada una de ellas presenta condicionamientos específicos en términos de escalabilidad, interoperabilidad, dependencia de conectividad sincrónica o adecuación a contextos institucionales con restricciones presupuestarias, regulatorias o de infraestructura. En este escenario, el Laboratorio Diferido de Radiactividad desarrollado en el marco de esta tesis se plantea como una evolución conceptual y arquitectónica respecto de los modelos tradicionales. La propuesta integra un enfoque asincrónico sustentado en datos experimentales reales de espectrometría gamma, incorporando un sistema estructurado de trazabilidad, metadatos experimentales y validación de experiencia de usuario (UX) adaptado al contexto universitario argentino. En la Tabla 10 se presenta una comparación crítica entre las principales plataformas evaluando sus características desde perspectivas tecnológicas, arquitectónicas y pedagógicas.

Plataforma	Institución / País	Tipo de laboratorio	Área de aplicación	Arquitectura tecnológica	Modalidad de acceso	Características pedagógicas	Ventajas principales	Limitaciones
Go-Lab	Universidad de Twente / Unión Europea	Remoto	Ciencias naturales, física, biología, matemáticas	Arquitectura federada basada en *Inquiry Learning Spaces (ILS)* y servicios web.	Síncrona y asincrónica	Basado en aprendizaje por indagación (*Inquiry-based learning*); interfaz intuitiva; recursos de guías docentes.	Amplia comunidad, soporte multilingüe, enfoque pedagógico sólido.	Requiere conectividad estable y registro institucional. Y no posee soporte
LabsLand	Universidad de Deusto / España	Remoto y diferido	Electrónica, física, ingeniería, robótica	Infraestructura federada sobre *WebLab-Deusto RLMS* , accesible vía navegador.	Síncrona y diferida	Orientado a educación STEM; promueve competencias prácticas y colaborativas.	Escalabilidad, fiabilidad, mantenimiento centralizado.	Requiere suscripción institucional para acceso extendido.
RemLabNet	Universidad de Zielona Góra / Polonia	Remoto	Física, electrónica, automatización	Arquitectura distribuida basada en servicios web SOAP y REST.	Síncrona	Enfoque en cooperación interuniversitaria; acceso libre a experimentos físicos reales.	Interoperabilidad y colaboración internacional.	Cobertura temática reducida.Interfaz no amigable
WebLab-Deusto	Universidad de Deusto / España	Remoto	Ingeniería eléctrica, robótica, control, electrónica	RLMS modular con *WebLab-Deusto Server* y *Federation APIs* .	Síncrona y Diferida	Centrado en el aprendizaje por experimentación; soporte para scripts y control remoto en tiempo real.	Software libre; reutilizable; ampliamente documentado.	Requiere soporte técnico institucional.
MIT iLabs	Massachusetts Institute of Technology / EE. UU.	Remoto y dataset	Ingeniería eléctrica, física, materiales	*iLab Shared Architecture (ISA)* ; servicios web y middleware SOAP.	Síncrona y diferida	Aprendizaje experimental autónomo; acceso a equipamiento real vía navegador.	Alta fiabilidad;	Limitado a red universitaria MIT y asociados.

Tabla 10. Cuadro comparativo de las distintas plataformas. Fuente: elaboración propia.

Las plataformas analizadas responden a modelos estructurales diferenciados. Go-Lab adopta un esquema federado de integración de laboratorios heterogéneos; LabsLand implementa un modelo distribuido del tipo “Remote Laboratories as a Service” sustentado en infraestructura centralizada en la nube; RemLabNet se configura como un Remote Laboratory Management System (RLMS) orientado a la gestión de usuarios, reservas y monitoreo de estado; WebLab-Deusto emplea una arquitectura cliente–servidor con separación entre motor experimental y capa de gestión; mientras que MIT iLabs propone un modelo basado en servicios web. En contraste, el LD de radiactividad introduce una arquitectura asincrónica multicapa basada en la separación explícita entre la fase de adquisición nuclear y la fase de explotación didáctica de datos. Este desacoplamiento funcional constituye una innovación estructural relevante, ya que transforma el laboratorio remoto tradicional, dependiente del control en tiempo real, en un sistema diferido reproducible, escalable y adaptable a contextos con restricciones operativas

y regulatorias propias del ámbito nuclear. De este modo, el LD de Radiactividad no solo amplía el horizonte hacia una modalidad diferida y científicamente robusta, sino que consolida un aporte original al desarrollo internacional de laboratorios experimentales mediados por tecnologías digitales.

2.13 Conclusión

En este capítulo se desarrollaron los fundamentos físicos, experimentales y tecnológicos que sustentan el diseño del LD de radiactividad. Se describieron los procesos de decaimiento nuclear, la estructura y funcionamiento del reactor de investigación RA-4, y los principios de la espectrometría gamma, que constituyen la base para comprender la dinámica de la radiación y su interacción con la materia. La ley de desintegración radiactiva y la ley de atenuación exponencial (Beer–Lambert) fueron presentadas como herramientas analíticas esenciales para modelar la evolución temporal de la actividad de una fuente y la pérdida de intensidad de los fotones gamma al atravesar distintos materiales. Estas relaciones físicas se tradujeron en parámetros de diseño y control que definen las configuraciones experimentales del LD. Las fuentes radiactivas seleccionadas (^{137}Cs, ^{133}Ba) presentan vida media prolongada, estabilidad de emisión y trazabilidad certificada, lo que garantiza mediciones reproducibles. Los materiales de blindaje elegidos (Pb, Fe y Al) ofrecen contrastes marcados en densidad y número atómico, permitiendo validar experimentalmente la variación del coeficiente de atenuación lineal (μ). La distancia fuente-detector se definió como variable operativa clave, ya que influye directamente en la tasa de conteo, la geometría de detección y la dispersión estadística. Estas variables conforman el núcleo experimental del LD y aseguran que cada espectro gamma almacenado en la base de datos sea trazable, comparable y reutilizable en sesiones asincrónicas. El instrumental utilizado, basado en detectores de centelleo NaI(Tl) acoplados a tubos fotomultiplicadores (PMT), introduce parámetros técnicos como resolución energética, eficiencia de detección y rango dinámico, que determinan la calidad del registro espectrométrico. Por ello, el diseño del LD incorpora mecanismos de calibración, linealización y digitalización para garantizar la fidelidad del registro frente a los modelos teóricos. En el plano informático, la gestión digital de los datos requiere protocolos de registro estructurado, control de metadatos y esquemas de almacenamiento que aseguren la integridad, autenticidad y trazabilidad de la información experimental. Paralelamente, se presentó un panorama detallado de los distintos entornos de experimentación en ciencias físicas, LT, LV, y LR junto con una revisión de plataformas internacionales como Go-Lab, LabsLand, VISIR y WebLab-

Deusto. El análisis comparativo evidenció que los LR constituyen una solución transformadora frente a las limitaciones espaciales, económicas y temporales de los LT, al permitir el acceso remoto a equipamiento real y garantizar experiencias experimentales equivalentes en diferentes contextos geográficos. No obstante, plataformas consolidadas como VISIR (orientada a electrónica analógica), LabsLand (modelo de federación y escalabilidad) o WebLab-Deusto (arquitecturas distribuidas y soporte RLMS) dependen en la mayoría de los laboratorios, de infraestructura de operación en tiempo real, lo que implica mayores costos de mantenimiento, coordinación logística y dependencia de servidores de alta disponibilidad. Estas implementaciones evidencian que la operación sincrónica, si bien poderosa, presenta desafíos de escalabilidad y requiere recursos institucionales significativos. Los laboratorios virtuales, por su parte, ofrecen flexibilidad, interacción y escalabilidad, pero carecen del rigor de los datos reales y no permiten vivenciar las incertidumbres propias de los experimentos físicos. En este marco, el LD emerge como una alternativa particularmente adecuada para contextos con restricciones de acceso, seguridad o disponibilidad: mantiene la autenticidad de las mediciones experimentales de un laboratorio tradicional y, simultáneamente, incorpora la accesibilidad, asincronía y optimización de recursos propias de los entornos virtuales. A diferencia de los LR en tiempo real, el LD desacopla la operación del equipamiento de la interacción del usuario, eliminando la necesidad de telecontrol continuo, reduciendo costos de infraestructura y ampliando la disponibilidad del recurso experimental. Desde una perspectiva estratégica, la implementación de un LD responde tanto a necesidades pedagógicas como tecnológicas: democratiza el acceso a prácticas especializadas, optimiza recursos críticos, reduce riesgos operativos y amplía la disponibilidad de laboratorios sensibles como los de espectrometría gamma. Su arquitectura modular integra bases de datos experimentales, entornos interactivos de análisis y herramientas de visualización avanzadas, sustentadas en tecnologías web multiplataforma y sistemas de gestión estandarizados que garantizan seguridad, escalabilidad y compatibilidad con software científico y académico. En síntesis, el análisis comparativo desarrollado en este capítulo permite evidenciar la progresiva digitalización de la práctica experimental. Mientras los LT aseguran el contacto directo con equipos y fenómenos físicos, y los LR amplían la accesibilidad mediante teleoperación en tiempo real, los LD ofrecen una alternativa innovadora basada en la sistematización y reutilización de datos experimentales reales, alineada con los principios de trazabilidad, reproducibilidad y eficiencia propios de la Industria 4.0. De este modo, el Capítulo 2 no solo provee el fundamento teórico de la radiactividad y la espectrometría gamma, sino que

establece el marco conceptual y tecnológico que orienta el desarrollo metodológico del LD presentado en el capítulo siguiente, donde se integran los requisitos pedagógicos, técnicos y de seguridad en una arquitectura escalable, interoperable y replicable en otros contextos de alta complejidad.

CAPITULO 3. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL LABORATORIO DIFERIDO

El desarrollo de un LD de radiactividad requiere la definición de una metodología sistemática que garantice la integración coherente de aspectos pedagógicos, técnicos y de seguridad. En este capítulo se presenta la propuesta metodológica diseñada para el Laboratorio Diferido del IENRI, que abarca desde el análisis de requisitos hasta la implementación del sistema y su posterior validación.

3.1 Introducción

El presente capítulo expone la metodología adoptada para el desarrollo del LD de Radiactividad, concebido como una herramienta innovadora para la enseñanza de la física nuclear mediante el acceso asincrónico a datos experimentales reales de espectrometría gamma. El propósito principal consiste en describir de manera detallada el proceso de diseño e implementación de un sistema capaz de adquirir, procesar, almacenar y visualizar de forma diferida información experimental, preservando la fidelidad de los resultados y cumpliendo con los requisitos pedagógicos, tecnológicos y de seguridad radiológica propios del entorno del Reactor de Investigación RA-4. En este sentido, el diseño metodológico se encuentra condicionado por el marco normativo vigente aplicable a instalaciones nucleares de investigación. En Argentina, la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) establece, a través de las Normas Básicas de Seguridad Radiológica (Ar 10.1.1) y la normativa específica para reactores de investigación (*Autoridad Regulatoria Nuclear*, 2001), requisitos relacionados con control de acceso, limitación de exposición ocupacional, trazabilidad de operaciones y registro de intervenciones sobre equipamiento radiológico. A nivel internacional, los estándares del Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) refuerzan los principios de protección radiológica, optimización y gestión documentada de la seguridad en reactores de investigación. Estas disposiciones regulatorias condicionan de manera directa las decisiones arquitectónicas adoptadas en el LD, favoreciendo un modelo asincrónico diferido que desacopla la ejecución experimental del acceso académico, minimiza la manipulación directa de fuentes radiactivas y garantiza la preservación de protocolos operativos aprobados. De este modo, la metodología no solo responde a criterios tecnológicos y pedagógicos, sino también a principios de seguridad y cumplimiento normativo propios de infraestructuras nucleares críticas.

El desarrollo metodológico se fundamenta considerando las arquitecturas de referencia para LR propuestas por (Orduña et al., 2018) y (Silva et al., 2023). Esto garantiza la trazabilidad entre las etapas de análisis, diseño, implementación y validación, asegurando que cada componente técnico responda a un propósito funcional claramente definido. El diseño del LD se desarrolló bajo un enfoque modular, escalable y replicable, estructurado en tres niveles complementarios: un módulo físico, correspondiente al sistema de medición y adquisición espectrométrica; un módulo de conversión y gestión de datos, destinado al registro, procesamiento y resguardo de la información experimental; y un módulo digital, orientado a la presentación, análisis y reutilización diferida de los resultados por parte de los usuarios. Esta estructura permite superar las limitaciones inherentes a los laboratorios presenciales o remotos en tiempo real, tales como la dependencia de la conectividad sincrónica, la disponibilidad de equipamiento o la asignación de concurrencia, favoreciendo una mayor accesibilidad, flexibilidad y continuidad pedagógica en la formación científica universitaria.

En conjunto, la metodología persigue un doble objetivo: asegurar la calidad técnica del sistema y su valor educativo como recurso formativo, promoviendo la democratización del acceso a la práctica experimental en radiactividad y contribuyendo a los lineamientos de la educación científica abierta y la transformación digital universitaria. Desde una perspectiva de ingeniería, el enfoque adoptado se alinea con los principios dentro del campo de los sistemas de información y del Diseño Científico-Tecnológico propuestos por (Peffers et al., 2007), según los cuales el conocimiento se genera a través del desarrollo y validación de artefactos tecnológicos con valor práctico y teórico. En este contexto, el LD se concibe como un artefacto tecno-educativo diseñado para resolver una problemática compleja: garantizar el acceso seguro y asincrónico a datos experimentales reales, integrando hardware, software, bases de datos y una interfaz web unificada bajo una arquitectura modular, interoperable y escalable.

3.2 Enfoque Metodológico

El desarrollo del LD se enmarca en el paradigma del Diseño Científico-Tecnológico como una metodología orientada a la creación y validación de artefactos tecnológicos capaces de resolver problemas reales mediante un enfoque sistemático y reproducible (Peffers et al., 2007) (Hevner et al., 2004). El objetivo principal del LD no es solo comprender un fenómeno, sino diseñar una solución funcional y evaluable que aporte tanto valor práctico como conocimiento científico. Bajo este enfoque, la metodología aplicada al desarrollo del LD integra principios de la ingeniería de sistemas y de la investigación basada en diseño, articulando aspectos

técnicos, pedagógicos y organizacionales en un mismo marco de trabajo. De este modo, el proceso metodológico se estructura en seis fases, tal como se sintetiza en la Figura 31:

- Identificación del problema y motivación. Se reconoció la dificultad de acceso sostenido a prácticas de espectrometría gamma en el IENRI debido a limitaciones de seguridad radiológica, disponibilidad de equipamiento y restricciones operativas. Esta fase permitió definir la problemática central y justificar la necesidad de un sistema diferido de experimentación, descripto en el Capítulo 1.
- Definición de los objetivos de la solución. A partir de lo anterior, se establecieron los objetivos técnicos y pedagógicos del LD, descriptos en el Capítulo 1: garantizar la trazabilidad y reproducibilidad de los datos experimentales, ofrecer acceso asincrónico y seguro, y fortalecer las competencias experimentales de los estudiantes mediante entornos digitales accesibles.
- Diseño y desarrollo del artefacto. Se diseñó una arquitectura tecnológica modular, conformada por capas de adquisición, gestión, interfaz y visualización de resultados. Cada componente fue modelado siguiendo criterios de interoperabilidad, escalabilidad y seguridad, garantizando su integración con el ecosistema de laboratorios remotos (LabsLand / LabRem-FCEIA).
- Demostración. Se implementó un prototipo operativo del LD en el entorno del RA-4, integrando hardware, software y bases de datos. La demostración permitió verificar la coherencia entre los requisitos definidos y la funcionalidad alcanzada, observando su capacidad para reproducir condiciones experimentales reales en modalidad asincrónica.
- Evaluación. Se aplicaron pruebas técnicas y pedagógicas mediante la encuesta UXQ4RL 1.0 (Cuadros et al., 2021).
- Comunicación y transferencia. Finalmente, se documentaron los resultados, se elaboraron materiales didácticos y se integró el LD dentro del repositorio institucional de laboratorios remotos de la FCEIA-UNR, asegurando su difusión, replicabilidad y sostenibilidad en el tiempo.

La secuencia de estas fases no se concibe de manera estrictamente lineal, sino iterativa y evolutiva, de modo que los resultados de cada etapa retroalimentan las decisiones de diseño

y validación. Este carácter cíclico permite ajustar el sistema en función de los hallazgos experimentales y de las necesidades emergentes de la comunidad educativa y científica.
En síntesis, el enfoque metodológico adoptado combina la rigurosidad del diseño con la flexibilidad de la ingeniería experimental, garantizando que el LD de Radiactividad no solo constituya un artefacto funcional, sino también un modelo replicable de innovación educativa basado en el uso de tecnologías digitales para la formación en ciencias nucleares.



Figura 31. Proceso metodológico. Fuente: elaboración propia.

3.3 Análisis de requisitos

El diseño de un LD supone identificar un conjunto de requisitos que incluyan la apropiación de conceptos teóricos básicos, el desarrollo de competencias experimentales en entornos virtuales (como la interpretación de espectros y el análisis de datos) y la promoción de la formación continua en ámbitos científicos y tecnológicos En primer lugar, se deben tener en cuenta los requisitos pedagógicos y formativos, es decir, la alineación del LD con los objetivos de aprendizaje de los estudiantes, así como con las necesidades de actualización de profesionales en el área. Estos requisitos apuntan a la apropiación de conceptos teóricos

básicos, el desarrollo de competencias experimentales en entornos virtuales y, simultáneamente, la formación permanente de actores vinculados a la práctica científica y tecnológica. De este modo, el LD no solo actúa como un recurso didáctico, sino también como una plataforma de aprendizaje activo que potencia la reflexión sobre la práctica experimental. En segundo término, los requisitos técnicos se refieren a la infraestructura, las herramientas y los procedimientos necesarios para la correcta adquisición, procesamiento, almacenamiento y visualización de los datos. Estos requisitos garantizan la trazabilidad y fidelidad de las mediciones, la confiabilidad del sistema y la compatibilidad entre los distintos módulos que conforman la arquitectura del LD. En este sentido, los requisitos de seguridad resultan fundamentales en proyectos que involucran prácticas de laboratorio, ya que deben cumplirse tanto las normativas institucionales del IENRI como los estándares nacionales e internacionales aplicables. Estos lineamientos tienen por objetivo resguardar la integridad de las experiencias, reducir los riesgos asociados y garantizar un acceso controlado a los recursos. Finalmente, los requisitos de accesibilidad se orientan a asegurar que el LD pueda ser utilizado por un amplio espectro de usuarios en diferentes contextos. Esto implica contemplar el acceso asincrónico, la disponibilidad multiplataforma y el diseño de una interfaz intuitiva que favorezcan la interacción sin barreras tecnológicas. En conjunto, este análisis de requisitos constituye la base metodológica sobre la cual se estructura el desarrollo del LD, proporcionando un marco integral que orienta las decisiones de diseño e implementación y que, posteriormente, servirá como referencia para la validación del sistema.

3.4 Diseño y Montaje

El diseño del LD se fundamenta en una arquitectura modular, escalable y replicable, orientada a garantizar la trazabilidad de los datos experimentales y la sostenibilidad tecnológica del sistema. La metodología de desarrollo adoptada permite integrar componentes de hardware, software y bases de datos dentro de un esquema unificado. En este sentido, el LD se concibe como un artefacto tecnoeducativo compuesto por módulos funcionales interdependientes que cumplen roles específicos dentro del flujo de adquisición, procesamiento y visualización de la información. La arquitectura general se estructura en cuatro capas complementarias: adquisición de datos, almacenamiento y gestión de la información, interfaz de usuario y acceso web, y análisis y visualización de resultados. Cada una de estas capas responde a un conjunto particular de requisitos, definidos en la sección anterior. Este enfoque modular asegura la

interoperabilidad entre las capas, la escalabilidad del sistema ante nuevas funcionalidades y la posibilidad de replicar el modelo en otros entornos experimentales o disciplinas afines.

3.4.1 Capa de adquisición de datos

Comprende los dispositivos físicos y electrónicos necesarios para la obtención de los datos experimentales. A su vez los datos son capturados en formato digital y posteriormente convertidos a archivos normalizados junto con sus metadatos asociados (fecha, operador, configuración experimental, actividad de la fuente) que están relacionados a un archivo Excel donde se menciona el número de iteración y las variables que van a ser seleccionadas, así como los videos y resultados asociados a esa iteración, Tabla 12. Esta estandarización es clave para asegurar la reproducibilidad de los experimentos y la trazabilidad de los resultados, permitiendo su reutilización en futuras sesiones o por otros usuarios.

Iteration variables							Stream 1: Principal ("front")			Results				
Iteration #	Fuente	Blindaje	Espesor	Tiempo	Distancia	ıtición (experime	Video file	ıtart time (hh:mm:ss	End time (s)	Excel	Excel A	Excel B	Excel C	

Tabla 11. Excel de seguimiento de Resultados. Fuente: elaboración propia.

3.4.2 Capa de gestión de datos

La capa de almacenamiento y gestión de datos se encarga de registrar, organizar y proteger la información experimental obtenida. Se implementa una base de datos relacional alojada en servidores de la unidad académica, con mecanismos de respaldo automático y control de versiones. Cada registro incluye identificadores únicos, etiquetas descriptivas y vínculos con los metadatos del experimento. Además, se desarrollaron funciones de carga y descarga de archivos a través de un servicio web, que permite la interoperabilidad con otros laboratorios remotos o plataformas de gestión académica (como LabRem y LabsLand). La base de datos está diseñada para garantizar la integridad, consistencia y autenticidad de los datos, incorporando medidas de protección contra accesos no autorizados.

3.4.3 Capa de interfaz de usuario

Esta capa constituye el punto de interacción entre el sistema y los usuarios finales (docentes, estudiantes e investigadores). Su diseño se orienta a ofrecer un entorno accesible, intuitivo y coherente con los principios de usabilidad y experiencia de usuario desarrollada con tecnologías abiertas (HTML5, CSS3, JavaScript), lo que permite el acceso desde cualquier navegador sin necesidad de instalación local. La interfaz organiza la experiencia en tres secciones principales: selección de práctica, exploración y análisis de resultados. A su vez se incorporan elementos de diseño garantizando una navegación intuitiva y sin barreras tecnológicas. Además, la interfaz permite el registro automático de la interacción, lo que posibilita el seguimiento pedagógico y la retroalimentación del proceso de aprendizaje.

3.4.4 Capa de análisis y visualización de resultados

Esta capa está destinada a facilitar la interpretación de los datos experimentales. Proporciona herramientas que permiten representar gráficamente, comparar resultados obtenidos bajo distintas condiciones y realizar cálculos básicos vinculados. Su propósito principal es ofrecer a los usuarios un entorno de exploración y reflexión sobre los resultados experimentales, apoyando la construcción de conocimiento a partir de la observación, el análisis y la contrastación de hipótesis.

3.5 Desarrollo de la Interfaz

El diseño de la interfaz de usuario en un LD constituye un componente esencial entre el usuario y el sistema tecnológico que sustenta la experimentación. Su objetivo principal es ofrecer una experiencia interactiva, intuitiva y accesible, que facilite la interacción remota con los datos experimentales y promueva un aprendizaje autónomo y significativo. El enfoque adoptado se centra en el usuario, priorizando la simplicidad y la claridad en la navegación, así como la coherencia en la organización de las funciones disponibles. Una arquitectura bien estructurada, con menús organizados y accesos directos, permite acceder de manera ágil a las operaciones fundamentales: configurar parámetros experimentales, visualizar resultados y gestionar la descarga de datos. La aplicación de principios de usabilidad, como la consistencia visual, la retroalimentación inmediata y la reducción de la carga cognitiva, busca garantizar una experiencia fluida para usuarios con diferentes niveles de formación técnica. Desde una

perspectiva inclusiva, la interfaz se concibe bajo un esquema de diseño adaptable (responsive design), lo que asegura su compatibilidad con diversos dispositivos y plataformas. El uso de estándares web actuales permite la adaptación dinámica del contenido y la funcionalidad, optimizando la accesibilidad desde computadoras de escritorio, notebooks, tablets o teléfonos móviles. Asimismo, se integran recursos multimedia e interactivos que contextualizan las prácticas experimentales y favorecen la comprensión de fenómenos complejos. Estos elementos potencian el aprendizaje activo mediante la combinación de recursos visuales, textuales y auditivos, que contribuyen a un enfoque multisensorial que mejora la retención del conocimiento. En conjunto, la interfaz de usuario se configura como un espacio de interacción moderno, atractivo y pedagógicamente efectivo, que acompaña la propuesta metodológica del LD. Su diseño no solo garantiza la accesibilidad y la facilidad de uso, sino que también constituye un factor clave en la construcción de experiencias de aprendizaje enriquecidas y sostenibles en entornos mediados por tecnología.

3.6 Arquitectura del LD

El diseño arquitectónico del LD no se plantea como una solución aislada, sino como una evolución conceptual respecto de arquitecturas previamente desarrolladas y analizadas en el Capítulo 2.

Arquitectura	Descripción técnica	Sincronía	Escalabilidad	Gestión (RLMS)	Ventajas	Limitaciones
Cliente-Servidor Síncrona Clásica	Usuario controla en tiempo real el equipo físico mediante un servidor central.	Tiempo real	Limitada por concurrencia	Opcional	Alta sensación de control; experiencia experimental directa	Requiere gestión de turnos; riesgo de alta demanda; dependencia de
Arquitectura Distribuida Modular	Separación en capas: adquisición, procesamiento, presentación, con	Variable	Alta	Integrable	Modularidad; mantenibilidad; trazabilidad	Requiere diseño estructurado
LD	Ejecución experimental desacoplada del acceso del usuario; los	Asíncrona	Muy alta	Integrable	Elimina dependencia temporal; reduce riesgo operativo; alta escalabilidad	Menor sensación de control inmediato
LV	Modelo matemático sin hardware real; procesamiento completamente	Inmediata	Ilimitada	Opcional	Sin riesgo físico; bajo costo	No refleja condiciones reales ni ruido experimental

Tabla 12. Análisis comparativo de arquitecturas en laboratorios en línea. Fuente: elaboración propia.

Del análisis comparativo en la Tabla 12 se desprende que las arquitecturas síncronas tradicionales presentan restricciones significativas en entornos regulados, donde la separación entre ejecución experimental y acceso académico constituye un requisito crítico. En particular,

la necesidad de garantizar trazabilidad, control de acceso y preservación de la integridad experimental en el contexto del reactor RA-4 condiciona el diseño arquitectónico hacia un modelo desacoplado y modular. El modelo desarrollado se organiza en tres capas principales: adquisición, gestión y almacenamiento e interfaz de usuario. Cada una cumple funciones específicas pero interrelacionadas, lo que asegura la trazabilidad, la integridad y la reproducibilidad de las experiencias experimentales.

- Capa de Adquisición: esta capa comprende todo el hardware y software del laboratorio tradicional, encargado de obtener datos experimentales mediante sensores, instrumentos o equipos específicos según la disciplina (mecánica, electrónica, materiales, energía, química, etc.). Incluye: dispositivos de medición o captación, electrónica asociada, sistemas de control local, software de adquisición propio de los equipos.

Su función principal es registrar los datos experimentales, junto con los metadatos necesarios para garantizar la fidelidad técnica, la identificación de las condiciones de ensayo y la trazabilidad de cada experiencia.

- Capa de Gestión y Almacenamiento: esta capa constituye el núcleo lógico del sistema y se implementa sobre una infraestructura digital que centraliza el tratamiento y resguardo de los datos. Integra: un servidor de aplicaciones (por ejemplo, desarrollado en Python u otro lenguaje web), una base de datos estructurada (MySQL, PostgreSQL u otra tecnología equivalente), módulos de procesamiento, indexación, validación automática y respaldo. Su propósito es organizar y almacenar los registros experimentales y los metadatos asociados, garantizando la integridad y consistencia de la información, la disponibilidad continua de los datos, la eficiencia de consulta y la trazabilidad técnica de cada experiencia.

Esta capa actúa como puente entre el laboratorio tradicional y los usuarios, exponiendo servicios y endpoints seguros mediante los cuales la interfaz accede a los resultados.

- Capa de Interfaz de Usuario: esta capa se implementa mediante tecnologías web estándar (HTML5, CSS3, JavaScript o frameworks equivalentes), y constituye el punto de acceso del usuario al LD. A través de esta plataforma, los usuarios pueden: explorar las experiencias disponibles, seleccionar variables o configuraciones experimentales predefinidas, visualizar datos procesados mediante gráficos interactivos u otros recursos, comparar resultados entre distintos ensayos, descargar información para su análisis externo.

La interfaz se diseña siguiendo criterios de usabilidad, accesibilidad e interoperabilidad, pudiendo integrarse con gestores de laboratorios remotos (RLMS) o plataformas educativas externas. En conjunto, estas tres capas articulan una arquitectura tecnológica capaz de transformar un laboratorio tradicional en un sistema accesible, escalable y compatible con dinámicas modernas de enseñanza y experimentación remota. La modularidad del modelo permite adaptarlo a distintas áreas de ingeniería sin alterar su estructura conceptual, manteniendo la trazabilidad, la integridad de los datos y una experiencia de usuario coherente y segura.

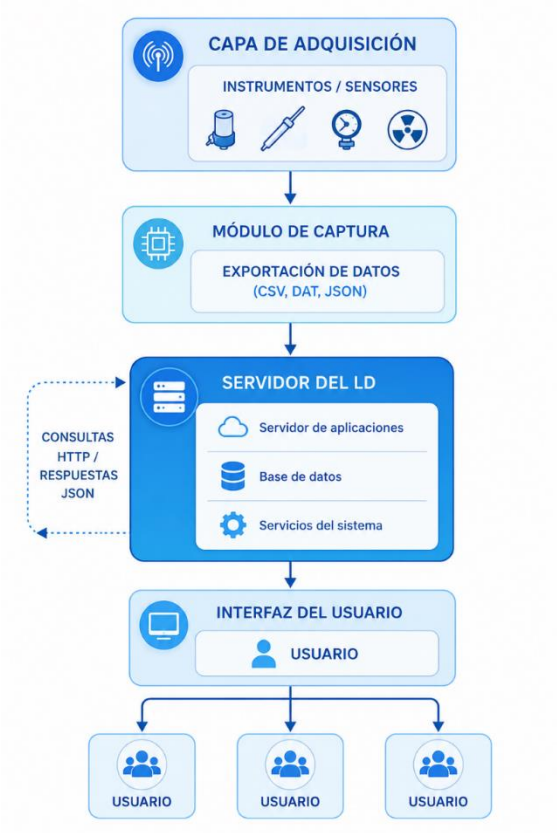


Figura 32. Arquitectura Modular de un LD. Fuente: elaboración propia.

La Figura 32 sintetiza la arquitectura tecnológica modular del LD, en la cual cada capa cumple una función específica dentro de un entorno digital distribuido. Esta organización modular favorece la escalabilidad del sistema, permitiendo incorporar nuevos experimentos, ampliar la capacidad de almacenamiento o integrar módulos de análisis automático de espectros sin modificar la estructura base. Asimismo, la interoperabilidad se garantiza mediante el uso de protocolos estándar (HTTP/REST, JSON, SQL) y tecnologías de desarrollo web abiertas (Python, MySQL, HTML5, JavaScript), lo que facilita la comunicación con plataformas externas

de gestión de laboratorios remotos (RLMS) como WebLab-Deusto o LabRem. El diseño orientado a capas promueve una arquitectura, donde la adquisición, el procesamiento y la presentación pueden evolucionar de manera independiente, manteniendo la coherencia del sistema global. Esto no solo optimiza la mantenibilidad y portabilidad del software, sino que también habilita la replicación del modelo en otras infraestructuras experimentales de física, electrónica o ingeniería, garantizando su adaptabilidad a distintos contextos educativos y de investigación. En síntesis, el LD se configura como un ecosistema tecnológico integral, basado en principios de modularidad, interoperabilidad y escalabilidad, que combina el rigor metrológico del entorno nuclear con la flexibilidad de las arquitecturas digitales contemporáneas.

3.6.1. Integración con el Laboratorio Tradicional

La base experimental del sistema se apoya en el entorno del Reactor RA-4, donde se desarrollan y registran las experiencias originales. La robustez y confiabilidad del laboratorio tradicional garantizan la calidad de los datos diferidos y la validez de los análisis posteriores.
El proceso de digitalización y almacenamiento de las mediciones se diseñó para mantener la trazabilidad, consistencia y repetibilidad de los resultados, consolidando un flujo continuo entre la experimentación física y su posterior consulta virtual

3.6.2 Componentes fundamentales de la arquitectura del Laboratorio Diferido de Radiactividad

La Figura 33 muestra el esquema realizado con sus componentes.

1. Usuario o Estudiante

El usuario del sistema es un estudiante, docente, investigador o profesional en formación continua que accede al LD con fines de análisis, estudio o validación de modelos teóricos. Su interacción se realiza de manera diferida, es decir, no accede al equipo en tiempo real, sino que consulta los resultados experimentales obtenidos previamente bajo diferentes configuraciones, mencionadas en el capítulo 2. Esta modalidad amplía significativamente el alcance del laboratorio, al no limitarse al ámbito estrictamente académico, sino también al de la capacitación profesional y la actualización permanente de competencias técnicas, extendiendo el acceso más allá de las restricciones físicas y temporales y optimizando el uso de recursos.

2. Interfaz Web de Acceso

La interacción entre el usuario y el sistema se lleva a cabo a través de una interfaz web diseñada para facilitar la consulta de datos, la visualización de espectros y la descarga de información asociada. Esta interfaz puede ser accedida de dos maneras principales: a través Labsland o del LabRem-FCEIA.

A través del sistema de gestión de laboratorios remotos RLMS (Remote Laboratory Management System), implementado mediante la plataforma WebLab-Deusto, que permite integrar el LD como una experiencia más dentro de un ecosistema más amplio de laboratorios remotos. La interfaz fue diseñada bajo principios de usabilidad, simplicidad visual e interoperabilidad con distintos dispositivos (computadoras, tabletas, teléfonos), sin requerimientos de instalación local.

3. Servidor Web y Base de Datos

El núcleo del sistema reside en un servidor web que aloja la base de datos con todos los registros experimentales del LD. Este servidor administra el almacenamiento, recuperación y visualización de los datos provenientes de las distintas combinaciones posibles del experimento de espectrometría gamma. Cada registro incluye el espectro de energía digitalizado, metadatos del experimento (fuente, blindaje, espesor, tiempo de medición), fecha de adquisición que permiten su análisis posterior.

En paralelo al desarrollo de la arquitectura, se llevó a cabo un proceso sistemático de grabación de las experiencias posibles, como se mencionó anteriormente.

4. Laboratorio Tradicional. Reactor RA-4

La fuente de los datos experimentales proviene del Laboratorio de Espectrometría Gamma instalado en el reactor RA-4. En este entorno controlado se encuentra el equipamiento necesario para la realización de los experimentos: fuentes (^{137}Cs, ^{133}Ba), sistema de detección, blindajes de distintos materiales y espesores, sistema de adquisición, y componentes de control y seguridad radiológica.

El entorno del reactor RA-4 proporciona condiciones adecuadas de estabilidad, trazabilidad de las mediciones, lo que garantiza la validez y repetibilidad de los datos que se incorporan al sistema diferido. La arquitectura del LD se apoya, por tanto, en la robustez y confiabilidad del laboratorio tradicional.

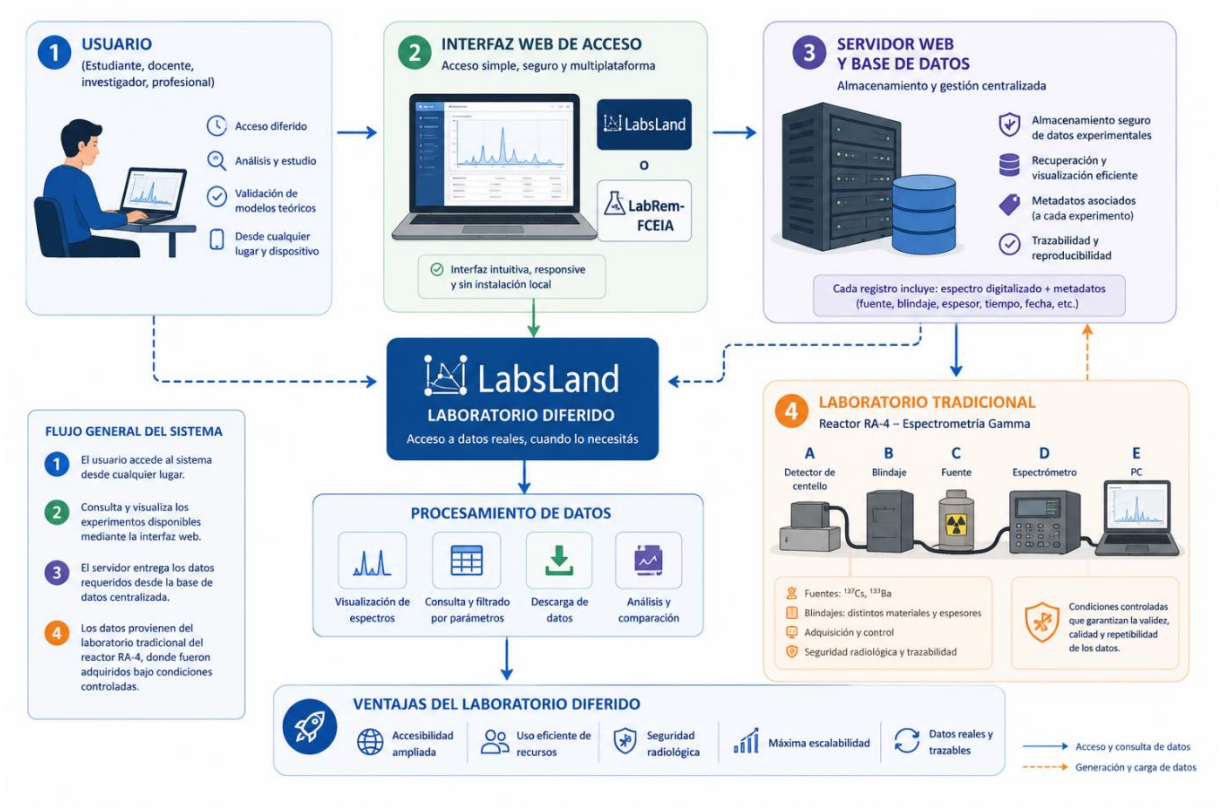


Figura 33. Arquitectura del laboratorio diferido. Fuente: elaboración propia.

La caracterización detallada de los componentes fundamentales del LD permite consolidar una visión integral de su funcionamiento y de la lógica tecnológica que lo sustenta. La articulación entre el usuario, la interfaz web, el servidor del sistema y el LT configura un flujo continuo y coherente entre la experimentación física y su posterior acceso asincrónico, garantizando que los datos almacenados conserven su trazabilidad, fidelidad metrológica y validez científica. El análisis de esta arquitectura evidencia que el LD no solo estructura un circuito digital de consulta, sino que establece una relación operativa entre espacios tradicionalmente desconectados: el entorno experimental del reactor RA-4 y la plataforma web desde la cual los usuarios acceden, analizan y comparan mediciones reales. Esta vinculación, basada en protocolos seguros y en un almacenamiento estructurado, habilita un uso más eficiente y sostenible del equipamiento físico, al tiempo que amplía la disponibilidad del recurso experimental para estudiantes, docentes e investigadores. Esta arquitectura, sustentada en tecnologías abiertas y escalables, no solo permite incorporar nuevos experimentos o fuentes

de datos, sino que también habilita su integración con plataformas externas de gestión de laboratorios remotos, potenciando la interoperabilidad institucional. Los componentes asociados demuestran que el LD constituye un ecosistema tecnológico robusto, flexible y replicable, capaz de extender la práctica experimental más allá de las limitaciones temporales, operativas y logísticas del laboratorio tradicional. Su diseño asegura una experiencia de análisis rigurosa, accesible y pedagógicamente significativa.

3.7 Validación y Optimización

Durante la fase de desarrollo del LD, la implementación se centró en la integración funcional de los módulos de adquisición, almacenamiento y visualización de datos, priorizando la estabilidad operativa y la coherencia del flujo de interacción. Si bien no se implementó un protocolo formal de pruebas de carga estructurado con herramientas específicas de benchmarking, el diseño se apoyó conceptualmente en metodologías consolidadas de validación de sistemas web distribuidos y LR. La literatura especializada en Remote Laboratory Management Systems (RLMS) destaca la importancia de indicadores como disponibilidad, latencia, estabilidad y capacidad de concurrencia(Garcia-Zubia et al., 2008). En plataformas como LabsLand el monitoreo continuo del rendimiento del sistema y el análisis de carga del servidor forman parte de los procedimientos habituales para garantizar escalabilidad y estabilidad en entornos con múltiples usuarios concurrentes (Jacob et al., 2025) (Villar-Martínez et al., 2024).

Tipo de herramienta	Herramienta / Servicio	Descripción	Parámetros medidos / Indicadores
Herramientas online	**Google PageSpeed Insights**	Analiza el rendimiento de la web en dispositivos móviles y de escritorio, ofreciendo métricas clave y recomendaciones.	LCP (Largest Contentful Paint), TTFB (Time To First Byte), CLS (Cumulative Layout Shift), velocidad global.
	GTmetrix	Proporciona un análisis detallado del proceso de carga y un gráfico *waterfall* de los recursos.	Tiempo total de carga, tamaño de página, número de solicitudes, puntuación de rendimiento.
	Pingdom Tools	Evalúa visualmente la velocidad de carga total del sitio y permite comparaciones entre regiones.	Tiempo total de carga, tamaño de recursos, disponibilidad global.
	WebPageTest	Permite mediciones avanzadas desde múltiples ubicaciones y navegadores, con informes comparativos.	TTFB, First Paint, Speed Index, tiempo total de carga.
	Lighthouse (Chrome DevTools)	Integrado en el navegador Chrome, evalúa rendimiento, accesibilidad, SEO y buenas prácticas de desarrollo web.	LCP, FID (First Input Delay), CLS, accesibilidad, usabilidad.
Herramientas del navegador	**Chrome / Edge / Firefox (F12 → Network)**	Diagnóstico local mediante las herramientas de desarrollador integradas en el navegador.	TTFB, DOMContentLoaded, Load Event, número de solicitudes HTTP.
Monitoreo continuo	**UptimeRobot**	Supervisa la disponibilidad del sistema y notifica caídas o interrupciones.	Porcentaje de disponibilidad (*uptime*), tiempos de respuesta del servidor.
	New Relic	Plataforma avanzada de observabilidad que registra el rendimiento de aplicaciones y servidores.	CPU, uso de memoria, tiempos de respuesta por endpoint, errores.
	Datadog	Sistema integral de monitoreo y análisis en tiempo real de infraestructura y servicios.	Latencia, disponibilidad, métricas de red, rendimiento en tiempo real.
Pruebas de carga y estrés	**Apache JMeter**	Herramienta open-source para pruebas de carga que simula múltiples usuarios concurrentes para evaluar el comportamiento del sistema.	Tiempo medio de respuesta, tasa de errores, número de peticiones por segundo, rendimiento bajo carga.

Tabla 13. Herramientas para obtener indicadores. Fuente: elaboración propia.

En este marco, la Tabla 13 presenta las herramientas seleccionadas para la obtención de indicadores técnicos. En este sentido, la tabla no debe interpretarse como un conjunto de herramientas exhaustivamente aplicadas durante el desarrollo, sino como un marco metodológico de referencia que orienta la evaluación técnica de plataformas de este tipo. Las herramientas mencionadas, como pruebas de rendimiento web, monitoreo del tráfico HTTP o simulaciones de carga con JMeter, constituyen prácticas habituales en la validación de sistemas distribuidos (Pressman, 2005). Su inclusión responde a la necesidad de explicitar los instrumentos técnicamente adecuados para evaluar estabilidad y escalabilidad en futuros escenarios de expansión del LD, particularmente ante incrementos de usuarios concurrentes. En el presente trabajo, la validación técnica se realizó principalmente mediante pruebas funcionales iterativas, verificación manual de tiempos de respuesta y control de integridad de datos en condiciones reales de uso. No obstante, se reconoce que la incorporación sistemática de pruebas de carga automatizadas y monitoreo continuo constituye una línea de mejora futura que permitiría caracterizar con mayor precisión el rendimiento del sistema frente a escenarios de mayor concurrencia. La aplicación de estas metodologías facilitaría además la evaluación de la escalabilidad del LD ante una eventual ampliación del número de usuarios o su integración en plataformas de acceso más amplio dentro del ecosistema de laboratorios remotos educativos.

3.8 Conclusión

El desarrollo metodológico presentado en este capítulo permitió establecer las bases conceptuales, técnicas y organizativas necesarias para la creación del LD. Se definió un proceso estructurado que integra las etapas de identificación del problema, definición de objetivos, diseño del artefacto, demostración y evaluación, asegurando la coherencia entre los propósitos educativos y las decisiones tecnológicas adoptadas. El análisis de requisitos, pedagógicos, técnicos, de seguridad y de accesibilidad, constituyó un punto de partida esencial para orientar el diseño del sistema, garantizando que cada componente del LD responda a necesidades reales del entorno académico y operativo. Dichos requisitos fueron la base para configurar una arquitectura modular y escalable, que permite la adquisición, almacenamiento, gestión y presentación de datos experimentales bajo condiciones controladas y reproducibles. La metodología adoptada demostró capacidad para vincular la ingeniería del software con la innovación educativa, promoviendo un modelo de desarrollo replicable y sostenible. La integración de las capas del sistema, adquisición, gestión, interfaz

y análisis posibilita no solo la trazabilidad técnica de la información experimental, sino también la generación de un entorno formativo accesible, flexible y alineado con los principios de la educación científica abierta. Asimismo, la definición de mecanismos de respaldo, autenticación, estandarización de datos y evaluación de la experiencia de usuario constituyen elementos clave para la confiabilidad del LD en contextos educativos universitarios.

En síntesis, el Capítulo 3 describe la construcción metodológica del Laboratorio Diferido, desde su fundamentación teórica hasta su diseño arquitectónico. Esta metodología, basada en el diseño científico-tecnológico, no solo orienta la implementación del sistema, sino que también proporciona un marco de referencia generalizable para el desarrollo de otros laboratorios digitales en áreas de la física aplicada y la ingeniería nuclear.

El siguiente capítulo aborda la fase de implementación y validación, en la cual se presentan los resultados derivados de la puesta en marcha del LD, la evaluación de su desempeño y la valoración de la experiencia de usuario en entornos reales de enseñanza.

CAPITULO 4 IMPLEMENTACION DEL LABORATORIO DIFERIDO DE RADIACTIVIDAD

La implementación del LD constituye la fase en la que el diseño metodológico se materializa en una aplicación web integrada, en la cual confluyen los componentes físicos del sistema experimental, la infraestructura tecnológica de comunicación y las herramientas digitales de gestión y visualización de datos. Esta etapa comprende la puesta en funcionamiento del montaje experimental, la configuración de los sistemas de adquisición y almacenamiento de datos, y la integración de la interfaz de usuario como elemento articulador entre el entorno físico y el digital. El propósito central es asegurar que el laboratorio opere de manera coherente, escalable y accesible, reproduciendo la lógica de un entorno presencial mediante prácticas asincrónicas de experimentación y análisis.

La validación del LD se concibe como una instancia fundamental para comprobar su efectividad. En este sentido, se evalúan tanto los aspectos técnicos (estabilidad del sistema, consistencia de los registros, trazabilidad de la información) como los pedagógicos y de usabilidad (claridad de la interfaz, facilidad de navegación, utilidad de los recursos interactivos). Este proceso se va a desarrollar mediante pruebas piloto experimentales y la aplicación de encuestas a docentes, estudiantes y profesionales en formación, que se desarrollarán en el capítulo siguiente. De esta manera, la implementación y validación no solo permiten verificar el cumplimiento de los requisitos iniciales, sino también identificar oportunidades de mejora y garantizar la confiabilidad del laboratorio como herramienta educativa y científica.

4.1 Contexto Experimental

La validación del LD, se ha llevado a cabo en el marco de las asignaturas Aplicación de Física Nuclear, Aplicaciones Radioquímicas y Nucleares, Centrales Nucleares I y II, y Electrónica aplicada a la Energía Nuclear correspondientes a los últimos años de las carreras de Ingeniería Eléctrica, Mecánica, Electrónica y Licenciatura en Física de la FCEIA de la Universidad Nacional de Rosario. En total, participaron 5 docentes responsables de las cátedras y 16 estudiantes. La práctica diseñada para este LD, mencionada en el capítulo anterior, permite al estudiante interpretar los espectros, graficar la atenuación y comparar la eficacia de distintos materiales de blindaje, consolidando su comprensión de los fenómenos nucleares desde una perspectiva experimental y aplicada. La evaluación del LD en cuanto a usabilidad, accesibilidad, claridad de la interfaz y percepción de utilidad del sistema, se efectuó mediante

cuestionarios después del uso del LD. Estas encuestas, completadas por docentes y estudiantes que interactuaron con el laboratorio en condiciones reales de cursado, permiten contrastar el potencial del LD con respecto a los LT y los LR en tiempo real, aportando evidencia empírica sobre su eficacia didáctica y funcional.

4.2 Procedimiento de Adquisición de Datos en el Laboratorio Diferido

La Figura 35 muestra el recorrido completo que realiza el usuario dentro del LD. En primer lugar, desde la interfaz se seleccionan las variables experimentales, fuente radiactiva, material y espesor del blindaje, y tiempo de conteo. Una vez definidas, el sistema despliega el espectro correspondiente, almacenado previamente en la base de datos. El usuario puede visualizar el video del montaje asociado a esa configuración y, posteriormente, descargar el archivo en formato .xlsx para su análisis cuantitativo. En esta etapa, se procesan los datos en Excel, calculando el área bajo el pico de interés, el coeficiente de atenuación y el error relativo.

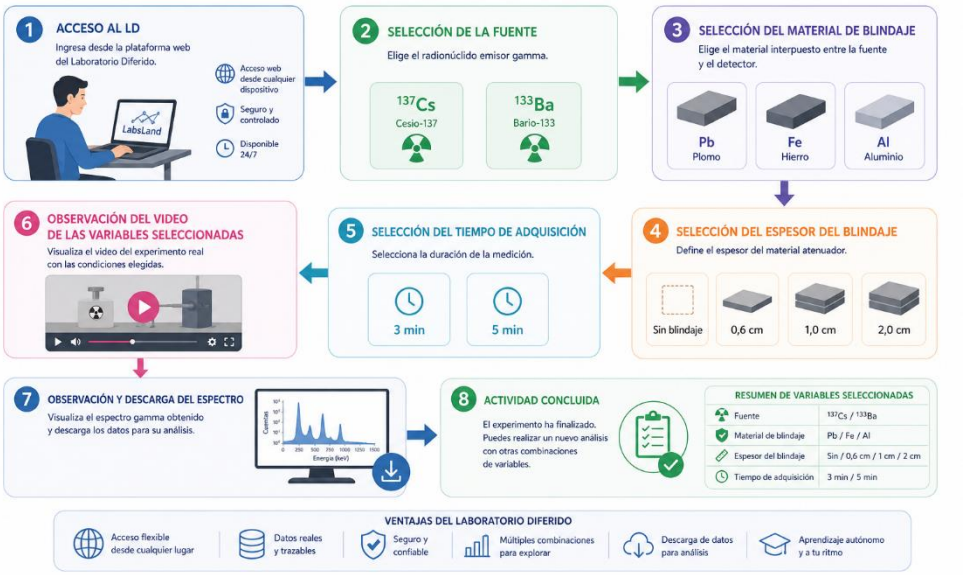


Figura 34. Procedimiento del uso del LD. Fuente: elaboración propia.

4.3 Diseño Experimental

El diseño de dicho LD se estructuró a partir de la identificación y selección de las variables fundamentales que intervienen en la caracterización y atenuación de la radiación gamma emitida por fuentes radiactivas, Figura 35.



Figura 35. Procedimiento del diseño experimental. Fuente: elaboración propia.

El objetivo principal fue establecer un conjunto de condiciones experimentales controladas que permitieran obtener registros fiables, reproducibles y útiles para el posterior análisis diferido de los datos. En este marco, las variables se clasificaron en independientes (aquellas que se manipulan deliberadamente) y dependientes (aquellas que se miden como resultado de dicha manipulación). En primer lugar, se seleccionaron dos radionúclidos emisores gamma de uso común en espectrometría nuclear: ^{137}Cs y ^{133}Ba, mencionadas en el capítulo 3. Ambos presentan características bien definidas, como se puede ver en la Figura 7, 662 KeV para el ^{137}Cs, lo cual los hace adecuados para estudiar procesos de atenuación y validación del modelo de absorción exponencial de la radiación.

En segundo lugar, se consideraron tres tipos de materiales como blindajes: Plomo (Pb), Hierro (Fe) y Aluminio (Al), como se mencionó en el capítulo 2. Estos materiales fueron seleccionados debido a sus distintas densidades y números atómicos, lo que permite observar diferencias significativas en la capacidad de atenuación gamma. La elección de estos materiales responde también a su disponibilidad, y facilidad de manejo en condiciones controladas. Respecto al espesor de los blindajes, se definieron tres valores: 0,6 cm, 1 cm y 2 cm, correspondientes a

secciones uniformes de cada material. Estos espesores fueron determinados con base en la posibilidad de observar, en cada caso, una disminución apreciable y medible de la intensidad radiactiva, permitiendo así validar experimentalmente la Ecuación 8. Ley de atenuación exponencial. Finalmente, se establecieron dos duraciones estándar de adquisición de datos: 3 minutos y 5 minutos, tiempos suficientes para acumular un número estadísticamente significativo de cuentas sin saturar el sistema de adquisición. Estos intervalos fueron seleccionados para permitir comparaciones directas entre distintos escenarios experimentales y para facilitar la planificación de sesiones de adquisición secuencial.

Tipo de variable	Variable	Descripción	Justificación / Rol en el LD
VI	**Tipo de fuente radiactiva**	Selección del radionúclido emisor gamma (Cs-137 o Ba-133).	Se manipula para comparar energías características y estudiar su influencia en la atenuación.
VI	**Material de blindaje**	Elección del material interpuesto entre la fuente y el detector (Pb, Fe o Al).	Se modifica para analizar el efecto del número atómico y la densidad sobre la absorción de radiación.
VI	**Espesor del blindaje**	Grosor del material atenuador (0,6 cm; 1 cm; 2 cm).	Se varía para observar cuantitativamente el fenómeno de atenuación exponencial.
VI	**Tiempo de adquisición**	Duración de la medición (3 min o 5 min).	Se ajusta para garantizar estadísticas suficientes.
VD	**Número de Cuentas**	Número de fotones detectados en el pico de energía característico.	Depende de las condiciones experimentales definidas por las VI; representa la magnitud que refleja el grado de atenuación.
VD	**Espectro de energía gamma digitalizado**	Distribución de cuentas en función de la energía.	Permite el análisis comparativo y la validación de la ley de atenuación exponencial.

Tabla 14. Clasificación de VI y VD. Fuente: elaboración propia.

La clasificación de las variables experimentales en independientes y dependientes, somo se observa en la Tabla 14, permitió estructurar de manera sistemática el diseño del LD asegurando un control riguroso de las condiciones de adquisición y un registro reproducible de los resultados. La combinación sistemática de las variables definidas permite generar un conjunto amplio y diverso de datos, aptos para análisis cuantitativos, ajustes experimentales y validación de modelos teóricos como la ley de atenuación exponencial de la radiación gamma.

De esta manera, el LD no solo reproduce de forma diferida la experiencia tradicional, sino que también proporciona un entorno tecnológico adaptable y escalable para la enseñanza, investigación y desarrollo de prácticas virtuales.

4.3.1 Montaje del sistema experimental

El montaje del sistema experimental constituye uno de los elementos fundamentales del LD, ya que de él depende la correcta disposición de las fuentes, los detectores y los blindajes, así como la estabilidad y repetitividad de las condiciones de medición. La configuración fue diseñada para garantizar alineación precisa, seguridad radiológica y compatibilidad con la automatización del registro de datos.

El sistema se compone de una estructura fabricada de madera, como se observa en la Figura 12, que permite el posicionamiento de la fuente y del detector. Entre ambos se ubican ranuras donde se insertan placas de acrílicos donde se apoyan los diferentes materiales de blindaje (Pb, Fe y Al), en los espesores seleccionados (0,6 cm, 1 cm y 2 cm), como se observa en la Figura 13. Esta disposición modular facilita el cambio rápido de condiciones experimentales sin necesidad de alterar la alineación del sistema.

El detector empleado es un cristal centellador de NaI (Tl) acoplado a un fotomultiplicador, cuya señal se conduce hacia un módulo multicanal que digitaliza la información y genera los espectros de energía. Todo el sistema de adquisición electrónica está protegido dentro de una caja metálica apantallada para reducir interferencias electromagnéticas y garantizar la integridad de la señal, puede visualizarse en la Figura 8. La fuente se encuentra contenida en una capsula de Plomo, como se observa en la Figura 10, minimizando la exposición innecesaria durante el montaje, para mejorar la reproducibilidad de las mediciones.

El conjunto, como se observa en la Figura 10, fue instalado en un entorno controlado, con condiciones de iluminación, y vibraciones adecuadas para evitar variaciones indeseadas durante las adquisiciones. Asimismo, se tomaron en cuenta las normas básicas de protección radiológica, incluyendo señalización del área, blindajes adicionales externos y dispositivos de monitoreo.

4.3.2 Registro de datos

En este contexto se definieron las variables anteriormente descriptas. A partir de dichas variables se estableció un esquema conceptual del diseño experimental del LD, que integra la fuente radiactiva, los sistemas de blindaje, el detector, la cadena de adquisición

espectrométrica y el almacenamiento de la información en una base de datos estructurada, tal como se muestra en la Figura 36. El objetivo principal fue establecer un conjunto de condiciones experimentales controladas que permitieran obtener registros fiables, reproducibles y útiles para el posterior análisis diferido de los datos. En este contexto, se definieron las variables anteriormente descriptas. Estas decisiones de diseño dieron lugar a una matriz experimental estructurada y robusta, que constituye la base operativa del LD, como se observa en la Tabla 15. Donde se realizaron 41 registros experimentales, acompañados de 21 videos demostrativos, como se observa en la Figura 37, que documentan el proceso de medición marcando el inicio y fin de cada uno. Cada ensayo incluye cuatro archivos de datos espectrométricos (.xlsx) y su correspondiente registro audiovisual (.mp4), los cuales se integran en la base de datos del LD para su acceso diferido mediante la interfaz web. De esta forma se garantiza la trazabilidad entre las condiciones de adquisición y los resultados obtenidos. Esta estructura de almacenamiento constituye un repositorio experimental coherente y validable, que permite la reproducción de los ensayos, la comparación de escenarios experimentales y la explotación didáctica de los resultados dentro del entorno del Laboratorio Diferido.

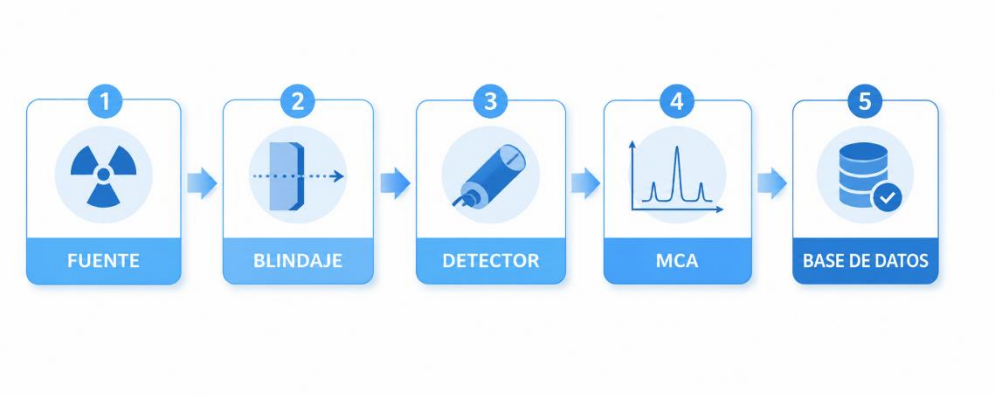


Figura 36. Esquema conceptual del diseño experimental. Fuente: elaboración propia.

Iteration variables							Stream 1: Principal ("front")						
Iteration #	Fuente	Blindaje	Espesor	Tiempo	Distancia	etición (experime	Video file	Start time (hh:mm:ss)	End time (s)	Excel	Excel A	Excel B	Excel C
1	Cesio			5 min	11cm		Cesio.mp4	0:00:00	0:00:08	CESIOSINBLINDAJE5MIN.xlsx	CESIOsinblindaje5MIN-A.xlt	CESIOsinblindaje5MIN-B.xlt	CESIOsinblindaje5
2	Cesio			3 min	11cm		Cesio.mp4	0:00:00	0:00:08	CESIOSINBLINDAJE3MIN.xlsx	CESIOsinblindaje3MIN-A.xlt	CESIOsinblindaje3MIN-B.xlt	CESIOsinblindaje3
3	Cesio	Al	2cm	5 min	11cm		Cesio2CMAL.mp4	0:00:00	0:00:09	CESIO2CMAL5MIN.xlsx	CESIO2CMAL5MIN-A.xlt	CESIO2CMAL5MIN-B.xlt	CESIO2CMAL5MI
4	Cesio	Al	2cm	3 min	11cm		Cesio2CMAL.mp4	0:00:00	0:00:09	CESIO2CMAL3MIN.xlsx	CESIO2CMAL3MIN-A.xlt	CESIO2CMAL3MIN-B.xlt	CESIO2CMAL3MI
5	Cesio	Al	1cm	5 min	11cm		Cesio1CMAL.mp4	0:00:00	0:00:08	CESIO1CMAL5MIN.xls	CESIO1CMAL5MIN-A.xlt	CESIO1CMAL5MIN-B.xlt	CESIO1CMAL5MI
6	Cesio	Al	1cm	3 min	11cm		Cesio1CMAL.mp4	0:00:00	0:00:08	CESIO1CMAL3MIN.xlsx	CESIO1CMAL3MIN-A.xlt	CESIO1CMAL3MIN-B.xlt	CESIO1CMAL3MI
7	Cesio	Al	0.6cm	5 min	11cm		Cesio0.6CMAL.mp4	0:00:00	0:00:10	CESIO0.6CMAL5MIN.xlsx	CESIO0.6CMAL5MIN-A.xlt	CESIO0.6CMAL5MIN-B.xlt	CESIO0.6CMAL5M
8	Cesio	Al	0.6cm	3 min	11cm		Cesio0.6CMAL.mp4	0:00:00	0:00:10	CESIO0.6CMAL3MIN.xlsx	CESIO0.6CMAL3MIN-A.xlt	CESIO0.6CMAL3MIN-B.xlt	CESIO0.6CMAL3M
9	Cesio	Fe	2cm	5 min	11cm		Cesio2CMFE.mp4	0:00:00	0:00:08	CESIO2CMFE5MIN.xlsx	CESIO2CMFE5MIN-A.xlt	CESIO2CMFE5MIN-B.xlt	CESIO2CMFE5MI
10	Cesio	Fe	2cm	3 min	11cm		Cesio2CMFE.mp4	0:00:00	0:00:08	CESIO2CMFE3MIN.xlsx	CESIO2CMFE3MIN-A.xlt	CESIO2CMFE3MIN-B.xlt	CESIO2CMFE3MI
11	Cesio	Fe	1cm	5 min	11cm		Cesio1CMFE.mp4	0:00:00	0:00:07	CESIO1CMFE5MIN.xlsx	CESIO1CMFE5MIN-A.xlt	CESIO1CMFE5MIN-B.xlt	CESIO1CMFE5MI
12	Cesio	Fe	1cm	3 min	11cm		Cesio1CMFE.mp4	0:00:00	0:00:07	CESIO1CMFE3MIN.xlsx	CESIO1CMFE3MIN-A.xlt	CESIO1CMFE3MIN-B.xlt	CESIO1CMFE3MI
13	Cesio	Fe	0.6cm	5 min	11cm		Cesio0.6CMFE.mp4	0:00:00	0:00:08	CESIO0.6CMFE5MIN.xlsx	CESIO0.6CMFE5MIN-A.xlt	CESIO0.6CMFE5MIN-B.xlt	CESIO0.6CMFE5M
14	Cesio	Fe	0.6cm	3 min	11cm		Cesio0.6CMFE.mp4	0:00:00	0:00:08	CESIO0.6CMFE3MIN.xlsx	CESIO0.6CMFE3MIN-A.xlt	CESIO0.6CMFE3MIN-B.xlt	CESIO0.6CMFE3M

Tabla 15. Archivo de seguimiento de los resultados obtenidos. Fuente: elaboración propia.

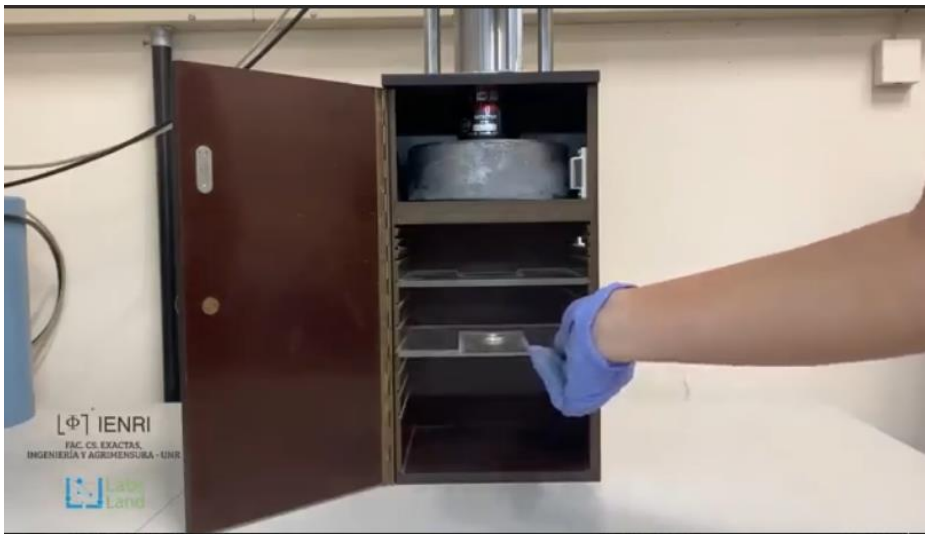


Figura 37. Fotograma del video Asociado a cada medición. Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de asegurar la trazabilidad de la información, cada archivo es identificado mediante un sistema de codificación único, lo cual permite su indexación automática y facilita la búsqueda y recuperación de los datos. Adicionalmente, se incorporaron mecanismos de control de calidad, tales como la verificación del número total de cuentas, la presencia de picos característicos en los espectros y la estabilidad de los conteos de fondo. El almacenamiento de los registros se realiza en una base de datos estructurada, alojada en un servidor local, con respaldos periódicos para evitar pérdidas de información. Esta base de datos alimenta posteriormente la interfaz de usuario, permitiendo la consulta y descarga de los espectros adquiridos de manera diferida. El diseño del LD potencia dicho enfoque al ofrecer un

repositorio estructurado de datos experimentales (espectros, metadatos, vídeos) que permite a los estudiantes no solo acceder a la información, sino también integrarla en procesos de indagación auténtica: ¿cómo varía la intensidad al modificar el material de blindaje? ¿Qué efecto tiene el espesor en la atenuación gamma? ¿Coinciden los resultados con el modelo de absorción exponencial? Estas preguntas invitan al estudiante a asumir un rol activo de investigador, favoreciendo la autonomía cognitiva, la metacognición y el desarrollo de pensamiento crítico (Gholam, 2019) (Sam, 2024). Asimismo, según (Pedaste et al., 2015) el ciclo de la indagación incluye fases claramente definidas como la orientación, conceptualización, investigación, conclusión y discusión, que pueden articularse con los componentes del sistema, así como los metadatos permiten la conceptualización, los espectros la investigación, y la interfaz web la visualización, comparación y discusión de resultados. La modularidad de la arquitectura tecnológica del LD garantiza que cada fase del ciclo pueda abordarse con las herramientas apropiadas, desde la generación del dato hasta su análisis y discusión por parte del estudiante. Por otra parte, la literatura muestra que la implementación de IBL con soporte tecnológico, cuando está bien estructurada, contribuye significativamente al desarrollo de habilidades del siglo XXI como la colaboración, la comunicación, la creatividad, la resolución de problemas y la alfabetización científica, siempre que se garantice un entorno de aprendizaje que incluya orientación docente, recursos adecuados y reflexión guiada (Sam, 2024). La plataforma LD cumple con estos requisitos al integrar audiovisuales, hojas de datos estandarizadas y acceso asincrónico, favoreciendo una experiencia rica, flexible y accesible. En síntesis, el registro de datos en el LD integra la rigurosidad del método científico con recursos tecnológicos y una metodología de indagación que potencia su valor como escenario educativo. Gracias a la diversidad de combinaciones experimentales, la estandarización en hojas de cálculo, el apoyo de recursos audiovisuales y el entorno web accesible, se garantiza que los usuarios puedan acceder a información completa, fiable y didácticamente enriquecida. Este enfoque posibilita que los estudiantes no solo reciban datos, sino que los investiguen, los cuestionen y los transformen en conocimiento, contribuyendo de forma significativa a la construcción de competencias investigativas, científicas y digitales en contextos de enseñanza virtual o híbrida.

4.3.3 Interfaz de usuario

La interfaz de usuario del LD fue concebida como un componente esencial para facilitar el acceso estructurado, seguro y eficiente a los datos experimentales adquiridos. Su diseño priorizó la funcionalidad, la claridad en la visualización de la información y la compatibilidad con distintos dispositivos. La interfaz fue desarrollada como una aplicación web basada en tecnologías estándar como HTML5, CSS3 y JavaScript. Estas constituyen el núcleo fundamental para el desarrollo web moderno, donde HTML5 establece la estructura semántica y el contenido de las páginas, incorporando elementos que mejoran la accesibilidad y la organización del documento; CSS3 complementa esta estructura dotando a la presentación visual de estilos avanzados, permitiendo el diseño responsivo y estéticamente sofisticado mediante selectores, propiedades y modelos de caja altamente flexibles; mientras que JavaScript provee la capa de programación que habilita la interactividad, y el control dinámico del contenido, posibilitando la creación de experiencias de usuario enriquecidas y aplicaciones web robustas. En conjunto, estos lenguajes forman un ecosistema interoperable que favorece la productividad y la estandarización en el desarrollo de aplicaciones web contemporáneas como se observa en la Figura 38. La elección de estas tecnologías responde a que constituyen los estándares fundamentales del desarrollo web moderno (Fouquet et al., 2023) (Shah, 2023). Para la puesta en operación del LD, se recurrió a LabsLand como proveedor de infraestructura de acceso remoto, lo que permitió alojar y gestionar el laboratorio aprovechando su soporte multiplataforma y sus mecanismos de autenticación. No obstante, el diseño, la lógica funcional, la arquitectura del sistema y el desarrollo completo de la interfaz web fueron elaborados como parte de esta tesis doctoral, constituyendo una contribución tecnológica original. Desde el punto de vista funcional, la interfaz permite a los usuarios seleccionar distintas variables experimentales, el tipo de fuente radiactiva, material de blindaje, espesor del mismo y tiempo de adquisición y así visualizar los espectros asociados. Cada espectro puede ser descargado en formato .xlsx o como imagen (.png o .jpg), lo cual posibilita su análisis posterior con herramientas externas como Excel, o software de procesamiento numérico. Adicionalmente, la interfaz fue diseñada con un enfoque modular y extensible, lo que permite su futura ampliación. Esta arquitectura facilita la incorporación de nuevos conjuntos de datos experimentales, herramientas interactivas de análisis (como ajustes de curvas o normalización de espectros) o incluso exportación directa a plataformas como Google Drive, Moodle o sistemas de gestión académica. También se incorporaron mecanismos

básicos de autenticación, registro de actividad e identificación de usuario, a través de la infraestructura de LabsLand y LabRem-FCEIA. Esto garantiza la trazabilidad del acceso a los datos, resguarda la integridad del sistema y permite generar estadísticas de uso por parte de docentes y estudiantes. El resultado es una herramienta accesible, robusta y orientada a la experiencia del usuario que cumple con los requisitos esenciales de consulta remota, gestión de datos y visualización interactiva. La integración con LabsLand no solo optimiza la operación técnica, sino que también permite escalar la solución a otras instituciones educativas, fomentando la colaboración, el acceso abierto y la expansión del aprendizaje experimental en física nuclear.



Figura 38. Relación entre HTML5, CSS3 y JavaScript. Fuente: elaboración propia.

4.3.4 Acceso e interacción con el LD

El LD desarrollado se encuentra integrado en la plataforma LabsLand, lo que permite su acceso remoto a través de una interfaz web intuitiva, estructurada en tres solapas principales: Introducción, Configuración y Observación. En la solapa Introducción, el usuario encuentra una descripción general del experimento disponible, los objetivos del mismo y una breve

explicación sobre el funcionamiento del sistema, como se detalla en la Figura 39. Esta sección proporciona el contexto necesario para comprender el alcance de la experiencia y las variables involucradas.

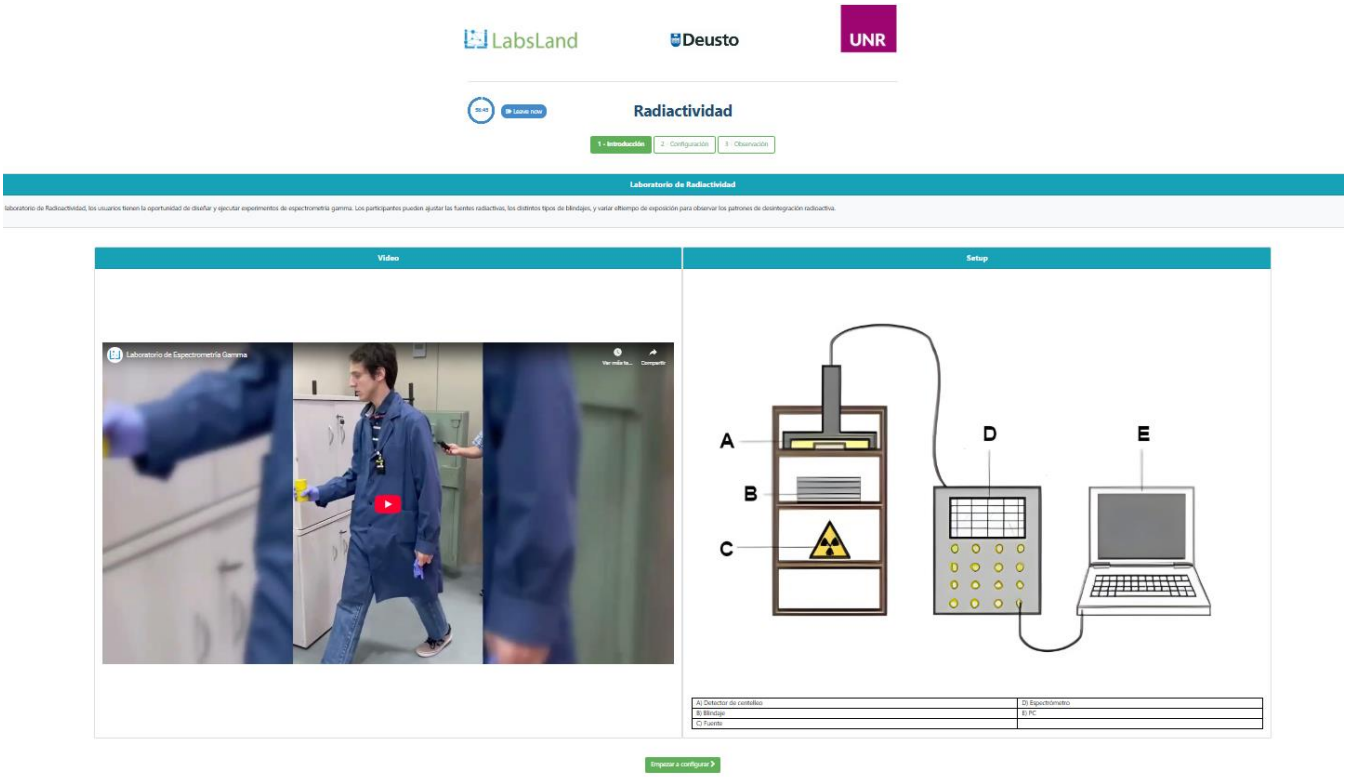


Figura 39. Pantalla Principal del LD. https://labsland.com/es.

.

La solapa Configuración, que se observa en las Figuras 40, 41 y 42, constituye el núcleo interactivo del LD. Allí, el usuario tiene la posibilidad de seleccionar las condiciones experimentales específicas bajo las cuales desea observar el desarrollo del experimento. Las variables configurables incluyen:

- Fuente: ^{137}Cs o ^{133}Ba,
- Material de blindaje: Al, Pb, Fe
- Espesor del blindaje:0,6 cm, 1 cm o 2 cm,

- Tiempo de adquisición de datos:3 o 5 minutos

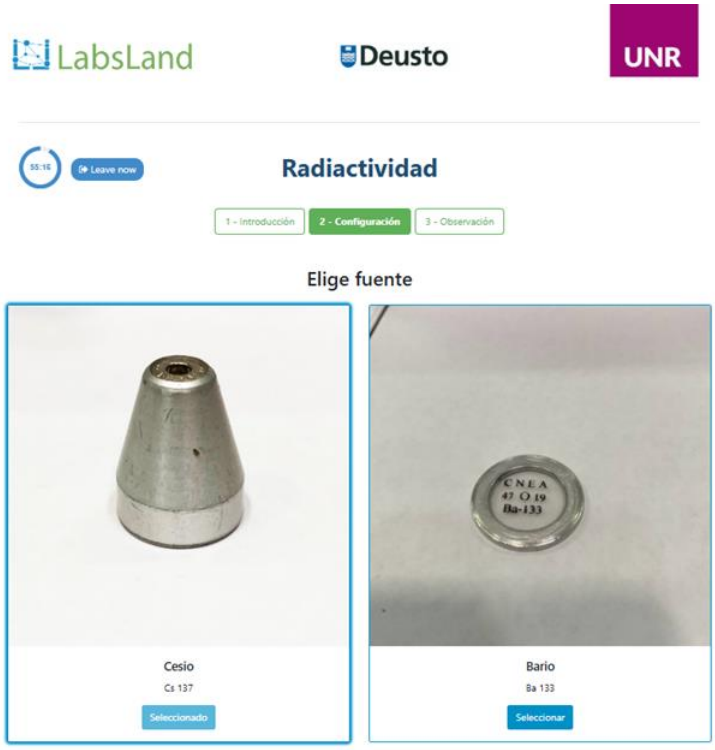


Figura 40. Configuración. Selección de Fuente. https://labsland.com/es.



Figura 41. Configuración. Selección de Blindaje. https://labsland.com/es.



Figura 42. Configuración. Selección de espesor del blindaje y tiempo. https://labsland.com/es.

Una vez seleccionadas estas variables, el sistema recupera el registro correspondiente desde la base de datos de experiencias previamente grabadas, garantizando la coherencia entre la configuración elegida y los datos experimentales mostrados.

En la solapa Observación, Figura 43, el usuario accede al resultado de la experiencia seleccionada. Esta sección presenta un video del desarrollo experimental, como muestra la Figura 44, en el que se puede visualizar el montaje físico, la ubicación de los elementos (fuente, blindaje y detector) y el proceso de adquisición. Simultáneamente, se despliega el espectro gamma correspondiente, observado en la Figura 45, que refleja el resultado cuantitativo de la medición bajo las condiciones previamente configuradas. Esta integración audiovisual facilita la interpretación del fenómeno físico observado, permitiendo relacionar las condiciones experimentales con la forma y características del espectro resultante.

En conjunto, la organización del LD en estas tres solapas permite una navegación clara y secuencial que guía al usuario desde la comprensión del experimento hasta la interpretación de los resultados, constituyéndose como una herramienta sólida para la realización y el análisis de experiencias diferidas en espectrometría gamma.



Figura 43. Observación de las variables seleccionadas. https://labsland.com/es.



Figura 44. Fotograma del video con las variables seleccionadas. https://labsland.com/es.

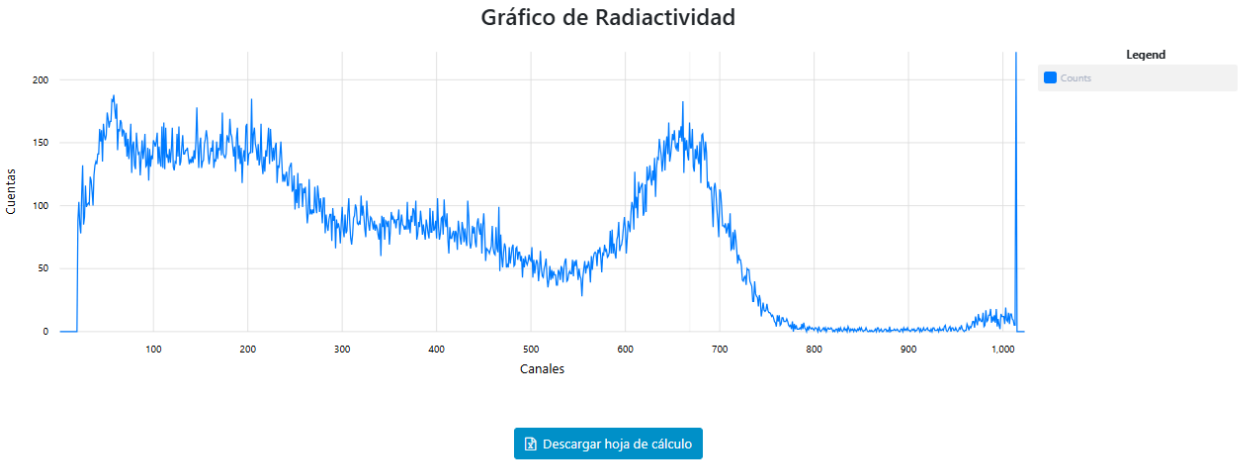


Figura 45.Espectro correspondiente a las variables seleccionadas. https://labsland.com/es.

4.4 Guía Práctica del LD

Con el propósito de facilitar la utilización del LD y garantizar la coherencia pedagógica entre los contenidos teóricos y la práctica experimental, se elaboró una Guía Práctica del Laboratorio de Espectrometría Gamma (Versión 1.0), que se observa en el Anexo A. Dicha guía fue redactada por el equipo técnico y docentes del IENRI, y constituye un instrumento complementario destinado a docentes y estudiantes que interactúan con el LD. La misma tiene como objetivos: comprender los principios físicos de la espectrometría gamma, estudiar la interacción de la radiación gamma con la materia y los mecanismos de atenuación, diferenciar los procesos de efecto fotoeléctrico, evaluar la eficiencia de distintos materiales de blindaje frente a la radiación, promover la capacidad de análisis, representación gráfica y elaboración de conclusiones basadas en datos experimentales. Y como resultados de aprendizaje se espera que el estudiante sea capaz de: analizar e interpretar un espectro gamma obtenido a partir de fuentes radiactivas reales, identificar las regiones características del espectro, registrar, organizar y graficar los datos experimentales obtenidos, calcular el coeficiente de atenuación lineal (μ) para diferentes materiales, procesar los resultados y elaborar inferencias comparativas entre los distintos blindajes. A su vez se describe el desarrollo del experimento utilizando las fuentes de ^{137}Cs y ^{133}Ba, el detector de centelleo NaI(Tl) acoplado al fotomultiplicador y blindajes de Aluminio (Al), Hierro (Fe) y Plomo (Pb), descripto en el capítulo 2. El procedimiento experimental consiste en colocar la fuente radiactiva dentro de un receptáculo, sobre el cual se insertan las placas de blindaje que separan la fuente del detector. La configuración permite variar el material y el espesor del blindaje (0,6 cm, 1 cm y 2 cm), manteniendo fija la geometría fuente–detector. El detector convierte los pulsos luminosos generados en el material centellador en pulsos eléctricos proporcionales a la energía depositada por los fotones gamma. Estos pulsos se procesan en un analizador multicanal (MCA), que construye un histograma o espectro de altura de pulsos, desarrollado en el capítulo 2. El espectro obtenido permite identificar la energía característica de los fotones emitidos por la fuente y cuantificar su atenuación al atravesar los diferentes materiales. En la guía se presenta además un ejemplo de cómo un estudiante puede utilizarlo para explorar los fenómenos de atenuación de la radiación gamma.

4.5 Encuestas Realizadas a los Usuarios

El proceso de validación de la experiencia de usuario para el LD se realizó utilizando la encuesta UXQ4RL versión 1.0 (User eXperience Questionnaire for Remote Labs), según lo descripto en (Cuadros et al., 2021), que se puede observar en el Anexo C. El UXQ4RL 1.0 es un cuestionario tipo Likert de siete puntos diseñado para evaluar la experiencia de usuario en laboratorios remotos (RL). Este instrumento se basó en un cuestionario previo que incluía 16 preguntas distribuidas en cuatro dimensiones: usabilidad, utilidad, inmersión y satisfacción, Tabla 16. Tras un análisis y validación exhaustivos, el cuestionario fue revisado: se eliminó la escala de satisfacción junto con siete preguntas, dando lugar al UXQ4RL 1.0, que ahora cuenta con nueve preguntas distribuidas en tres dimensiones: usabilidad, utilidad e inmersión. De manera complementaria, se elaboró una versión adaptada del mismo cuestionario destinada a docentes que se puede observar en el Anexo D, con el objetivo de relevar su percepción sobre la claridad del diseño experimental, la pertinencia pedagógica y la integración del LD en las asignaturas donde fue implementado. En particular, se buscó identificar el modo en que el diseño de la interfaz, la organización de las variables experimentales y la disponibilidad de los datos influyeron en la experiencia general de los usuarios.

Escala	Preguntas
Usabilidad (Usability)	Q00: El laboratorio remoto es fácil de usar.
	Q05: Puedo predecir el resultado que se obtiene al usar cada elemento de la interfaz del laboratorio remoto.
	Q06: El diseño del laboratorio remoto es suficientemente intuitivo, de modo que no se requiere ayuda para usarlo.
Utilidad (Utility)	Q03: El laboratorio remoto me ayuda a aprender.
	Q07: El laboratorio remoto cumple con mis requisitos
	Q08: El laboratorio remoto me ayudará a aprobar el curso.
Inmersión (Immersion)	Q01: Usar el laboratorio remoto se parece a estar en un laboratorio real.
	Q02: Mis interacciones con el laboratorio remoto parecen reales.
	Q04: Cuando trabajo en el laboratorio remoto me concentro en las tareas asignadas.

Tabla 16. Estructura del cuestionario. Fuente: elaboración propia.

4.6 Indicadores Técnicos de Rendimiento de la Interfaz Web

La evaluación técnica de la interfaz web del LD no se limita al aspecto visual o funcional, sino que requiere considerar un conjunto de indicadores de rendimiento que permiten estimar la calidad, estabilidad y eficiencia del acceso remoto. Aunque en esta instancia no se registraron métricas cuantitativas, se identificaron los parámetros técnicos clave que deben emplearse para futuros procesos de validación y mejora continua. Estos indicadores constituyen criterios de referencia ampliamente utilizados en el diseño y evaluación de plataformas web interactivas y laboratorios remotos.

- Tiempo de respuesta percibido: evalúa la rapidez con la que la interfaz reacciona ante acciones del usuario, como la selección de una variable, la carga de un archivo o la visualización de un resultado. Este indicador permite estimar la eficiencia del servidor y la optimización del frontend.
- Estabilidad y consistencia visual: se refiere al comportamiento estable de la interfaz durante la carga de contenido. Una interfaz estable evita movimientos bruscos de los elementos, desajustes de diseño o cambios inesperados en el orden de la información. Este aspecto mejora la experiencia del usuario y reduce confusiones durante la navegación.
- Carga y renderizado de contenido: considera la fluidez con la que la interfaz muestra gráficos, tablas, menús y elementos interactivos. En un LD, la visualización de datos experimentales constituye un componente crítico, por lo que es importante garantizar que el contenido se renderice de manera clara, sin retrasos ni interrupciones.
- Robustez frente a distintas condiciones de acceso: Incluye la capacidad de la interfaz de operar adecuadamente bajo diferentes velocidades de conexión, dispositivos y navegadores. Un diseño responsivo y liviano asegura que los usuarios puedan acceder al sistema desde computadoras personales, notebooks institucionales o equipos de menor rendimiento.
- Disponibilidad y continuidad del servicio: este indicador contempla la accesibilidad general del sistema web a lo largo del tiempo. Un LD debe ofrecer disponibilidad permanente, permitiendo que estudiantes, docentes o investigadores accedan al contenido cuando lo necesiten, independientemente del horario o la ubicación geográfica.

- Integridad y fiabilidad de las operaciones: analiza la capacidad de la interfaz para ejecutar correctamente las acciones solicitadas por el usuario, evitar fallas en la navegación, prevenir errores de carga y asegurar que los datos presentados sean coherentes con los registros almacenados. Este indicador se vincula con la estabilidad del servidor, la estructura del sistema y el manejo de excepciones.
- Escalabilidad del uso: considera la habilidad de la interfaz para continuar funcionando de manera adecuada a medida que aumenta la cantidad de usuarios o el volumen de datos. Un diseño eficiente debe permitir la ampliación del uso sin degradar la experiencia.

En conjunto, estos indicadores constituyen una guía técnica para asegurar que la interfaz web del LD mantenga niveles adecuados de rendimiento, estabilidad y accesibilidad. Aunque en esta etapa no se han registrado datos empíricos, la identificación de estos parámetros sienta las bases para una futura evaluación sistemática del sistema y para la implementación de mejoras orientadas a la calidad del servicio.

4.7 Conclusiones

El desarrollo metodológico del LD de Radiactividad permitió materializar una propuesta innovadora que integra el conocimiento teórico, la experimentación remota y la gestión asincrónica de datos en un entorno digital. A lo largo de este capítulo se expusieron los criterios de diseño, las capas funcionales de la arquitectura, el desarrollo del sistema de registro y análisis, así como la elaboración de la guía práctica de espectrometría gamma. El proceso de diseño e implementación evidenció que la metodología del LD resulta eficaz para abordar tres dimensiones complementarias, pedagógica, al asegurar la alineación entre los objetivos de aprendizaje y las competencias experimentales que se desarrollan mediante la práctica virtual. Tecnológica, al garantizar la interoperabilidad entre los módulos de adquisición, almacenamiento, procesamiento y visualización de datos experimentales. Y por último operativa, al promover la sostenibilidad y escalabilidad con la integración con plataformas como LabsLand y LabRem. A su vez la Guía Práctica de Espectrometría Gamma (Versión 1.0) consolidó el vínculo entre el entorno físico del laboratorio y su versión diferida. Esta herramienta estandariza los procedimientos, define los objetivos formativos y ofrece un marco reproducible para la interacción del estudiante con los datos experimentales. De este modo, la guía se convierte en un elemento clave de la experiencia de usuario, ya que permite que las

mediciones reales, registradas en el IENRI, sean reutilizadas con fines didácticos en contextos asincrónicos. Asimismo, la arquitectura modular implementada demostró ser adaptable a futuras ampliaciones del LD, ya sea mediante la incorporación de nuevos experimentos, la automatización de procesos de adquisición o la integración de algoritmos de análisis basados en inteligencia artificial para la clasificación espectral. En términos pedagógicos, la metodología propuesta fortalece el aprendizaje autónomo y la comprensión a través del análisis de datos reales. El estudiante puede explorar diferentes combinaciones de variables, observar el comportamiento de la radiación gamma frente a diversos materiales y validar las leyes fundamentales de atenuación y decaimiento radiactivo.

CAPITULO 5. VALIDACION DEL LABORATORIO DIFERIDO

5.1 Introducción

El presente capítulo aborda la validación del LD considerando su desempeño técnico, estabilidad operativa y grado de aceptación por parte de los usuarios finales. La validación constituye una etapa esencial dentro del ciclo de vida del desarrollo del sistema, ya que permite verificar el cumplimiento de los requisitos funcionales, tecnológicos y de interoperabilidad definidos en las fases previas del diseño. El objetivo de esta etapa es comprobar la correspondencia entre el comportamiento esperado y el comportamiento observado del sistema, tanto en la adquisición y procesamiento de los datos experimentales como en la presentación asincrónica de los resultados a través de la interfaz web. Asimismo, se analiza la confiabilidad del registro, la repetitividad de las mediciones, la consistencia de los espectros generados y la integridad de los datos almacenados en el servidor del IENRI. La validación se llevó a cabo durante el primer semestre de 2025, con la participación de tres docentes del IENRI, junto con 16 usuarios de prueba pertenecientes a las asignaturas. Estos usuarios interactuaron con el LD en condiciones reales de uso, accediendo a las mediciones registradas, y procesando los espectros. El protocolo de validación se estructuró en tres etapas: verificación técnica del sistema, incluyendo pruebas de funcionamiento de los módulos de adquisición, procesamiento y visualización de espectros. Prototipo con usuarios reales, para evaluar la estabilidad del sistema, tiempos de respuesta, calidad de visualización y precisión de los datos descargados. Y por último la evaluación de desempeño mediante encuestas orientadas a medir la accesibilidad, la claridad del entorno, la utilidad percibida y la equivalencia funcional con el laboratorio tradicional. La información recolectada permitió determinar los índices de disponibilidad, confiabilidad y aceptación del sistema, y contrastar el desempeño del LD con el de los LT y los LR en tiempo real. Los resultados de estas pruebas se presentan en las secciones siguientes, donde se analizan los parámetros de validación funcional, la estabilidad del sistema, la trazabilidad de datos y la experiencia general de los usuarios.

5.2 Validación Técnica

La validación técnica del LD tuvo como objetivo verificar el cumplimiento de los requerimientos establecidos durante la fase de diseño e implementación. Esta instancia permitió evaluar la fiabilidad operativa, la integridad del flujo de datos y la consistencia del sistema en diferentes escenarios de uso, asegurando su estabilidad bajo condiciones reales de operación. La validación se llevó a cabo mediante una combinación de ensayos controlados y pruebas con usuarios reales. Los procedimientos de prueba se dividieron en tres niveles como se observa en la Figura 46, Validación modular: comprobación independiente de cada capa funcional del LD (adquisición, procesamiento, almacenamiento y visualización). Validación de integración: verificación de la interoperabilidad entre módulos y del intercambio correcto de datos entre el servidor del IENRI y la interfaz web. Validación de desempeño global: medición de la eficiencia del sistema, el tiempo de respuesta de la interfaz y la estabilidad durante el acceso simultáneo de múltiples usuarios. Cada prueba se diseñó considerando las especificaciones de confiabilidad y rendimiento establecidas en los requisitos del sistema, desarrolladas en el Capítulo 3. Durante el período de validación, el sistema operó de forma continua sin interrupciones críticas. Se demostró una respuesta estable con accesos simultáneos, sin errores en la transmisión de espectros. Asimismo, la verificación de integridad mediante comparación de datos confirmó la coincidencia exacta entre los almacenados y los descargados por los usuarios, garantizando la trazabilidad del registro experimental. Esta evidencia que el LD puede operar de manera confiable como plataforma de experimentación diferida, manteniendo la fidelidad de las mediciones originales del IENRI. Por lo que la validación técnica demuestra que el sistema es estable, confiable y reproducible, cumpliendo con los requerimientos de calidad propios de un entorno de experimentación diferido.



Figura 46. Procedimiento de Validación. Fuente: elaboración propia.

5.3 Validación Pedagógica y de Experiencia

La validación del LD se diseñó como un proceso integral orientado a evaluar tanto su desempeño técnico-funcional como su adecuación pedagógica y la experiencia de usuario percibida. Este enfoque multidimensional se fundamenta en la literatura sobre evaluación de laboratorios remotos en educación en ingeniería, donde se recomienda integrar análisis técnico, aceptación del usuario y valor pedagógico como dimensiones complementarias (Nickerson et al., 2007), (Heradio et al., 2016). Desde el punto de vista funcional, la validación tuvo como propósito verificar que los componentes del sistema cumplieran con las especificaciones establecidas en la etapa de diseño, particularmente en lo referido a la correcta secuencia de ejecución de procesos (carga de variables experimentales, reproducción de video diferido, visualización y descarga de espectros), estabilidad del entorno gráfico y consistencia en la interacción asincrónica.

De manera complementaria, la evaluación de la experiencia de usuario se realizó mediante la aplicación del cuestionario UXQ4RL versión 1.0 (User eXperience Questionnaire for Remote Labs), desarrollado por (Cuadros et al., 2021). Este instrumento constituye una adaptación específica del User Experience Questionnaire (UEQ), validado en sistemas interactivos digitales y utilizado en más de 9.900 aplicaciones con análisis psicométricos robustos (Schrepp et al., 2017). El UXQ4RL ha sido validado empíricamente en plataformas consolidadas como VISIR y WebLab-Deusto, reportando adecuados niveles de consistencia y validez mediante análisis factorial exploratorio y confirmatorio. Su adopción en el presente estudio se fundamenta, por tanto, en antecedentes metodológicos consolidados dentro del campo de los LR. Las dimensiones evaluadas desarrolladas en la Tabla 17, usabilidad, utilidad e inmersión, coinciden con los criterios identificados como críticos en estudios comparativos de LT, LV y LR (Corter et al., 2004), donde la percepción de control, facilidad de uso y valor formativo influyen directamente en la aceptación del entorno experimental.

Dimensión	Descripción
Usabilidad	Evalúa facilidad de uso, claridad de navegación, accesibilidad e interacción con la interfaz.
Utilidad	Analiza la percepción de aporte al aprendizaje, comprensión conceptual y valor formativo del laboratorio.
Inmersión	Examina el grado de involucramiento del usuario y la percepción de cercanía con una experiencia experimental auténtica.

Tabla 17. Dimensiones evaluadas mediante UXQ4RL. Fuente: elaboración propia

En este sentido, el instrumento seleccionado resulta conceptualmente coherente con el marco teórico adoptado para el diseño del LD. La validación se llevó a cabo con un grupo de 19 usuarios de prueba entre estudiantes y docentes del IENRI, quienes realizaron tareas estandarizadas en el entorno del LD, registrándose parámetros cuantitativos y cualitativos sobre su desempeño y percepción de uso. Si bien la muestra de 19 participantes no tiene como objetivo constituir una representación estadística de la población total de estudiantes potenciales, resulta adecuada para una validación exploratoria en el marco de un estudio de diseño e implementación tecnológica, donde el foco se sitúa en la evaluación del artefacto

desarrollado en un contexto real de uso, más que en la generalización estadística de los resultados (Hevner et al., 2004) . En este sentido, la participación de docentes y estudiantes del IENRI permitió verificar la funcionalidad del sistema, su estabilidad operativa y la percepción inicial de usabilidad, utilidad e inmersión, aportando evidencia empírica suficiente para validar el prototipo en su fase actual de desarrollo. No obstante, futuras implementaciones a mayor escala podrían incorporar estudios con muestras ampliadas y análisis estadísticos inferenciales más robustos. En conjunto, los resultados de la validación funcional y de experiencia de usuario confirman que el LD es un sistema estable, confiable, accesible y funcionalmente robusto, capaz de ofrecer una experiencia de uso satisfactoria y técnicamente equivalente a la de un laboratorio convencional. Los resultados evidenciaron valoraciones positivas, con puntuaciones altas en las dimensiones de usabilidad, accesibilidad y utilidad funcional. Los participantes destacaron la facilidad para seleccionar variables experimentales, la claridad en la visualización de los espectros y la fluidez en las operaciones de descarga y análisis de datos. Asimismo, se valoró especialmente la posibilidad de acceso asincrónico, sin restricciones horarias, lo cual constituye una ventaja distintiva respecto de los LT y de los LR en tiempo real. En síntesis, los datos obtenidos confirman que el LD ofrece una experiencia de usuario altamente satisfactoria, caracterizada por su facilidad de uso, claridad visual y eficiencia operativa. A su vez, muestra ser una herramienta robusta, confiable y segura, capaz de replicar de manera precisa y accesible los procedimientos de espectrometría gamma, potenciando la autonomía y la comprensión práctica de los usuarios sin comprometer la seguridad radiológica ni la calidad experimental.

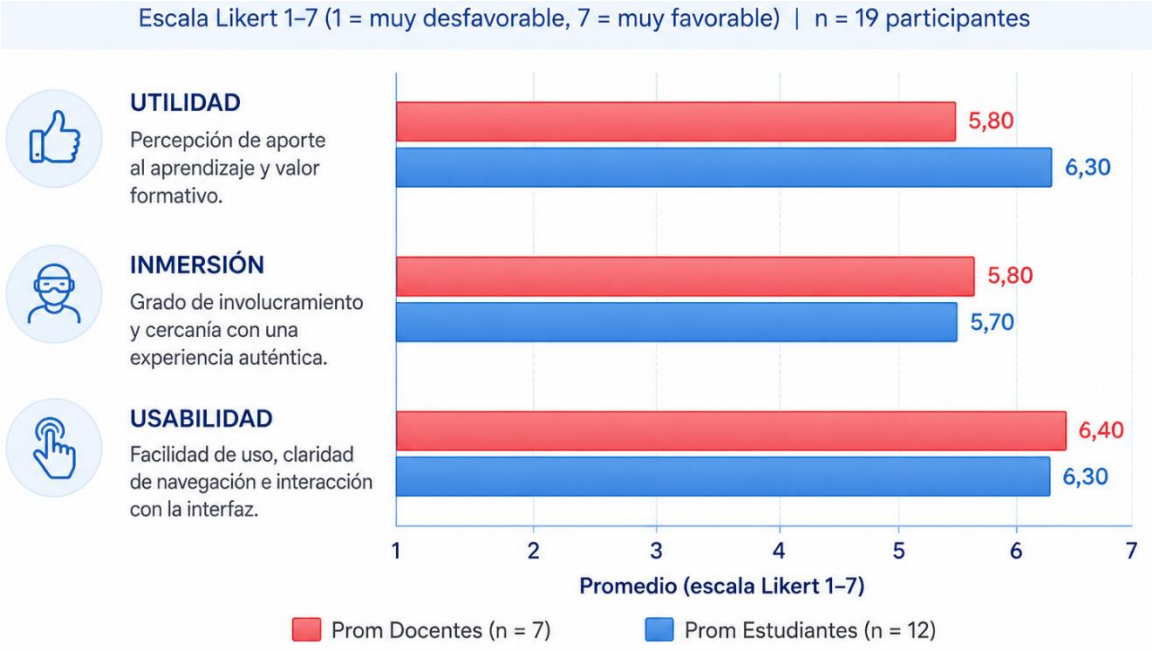


Figura 47. Valoraciones de las encuestas. Fuente: elaboración propia.

Los resultados, Figura 47, evidencian una percepción favorable del LD en ambos grupos de usuarios, observándose puntuaciones promedio superiores a 5,5 en todas las dimensiones evaluadas. La usabilidad constituyó el aspecto mejor valorado tanto por docentes como por estudiantes, alcanzando valores cercanos a 6,4, lo que sugiere una experiencia positiva en términos de navegación, facilidad de uso y comprensión de la interfaz. Este resultado aporta evidencia favorable respecto de la efectividad del diseño implementado y de la simplicidad de interacción con el entorno experimental. En relación con la dimensión utilidad, se observa una ligera diferencia favorable al grupo de estudiantes, quienes percibieron un mayor aporte del LD al aprendizaje de contenidos vinculados con espectrometría gamma y al análisis de resultados experimentales. Este hallazgo resulta coherente con el propósito pedagógico del laboratorio diferido, centrado en facilitar la comprensión conceptual y el análisis de datos reales previamente adquiridos. Por otra parte, la dimensión inmersión presentó valores levemente inferiores respecto de las restantes, aunque igualmente positivos. Este comportamiento resulta esperable en un entorno diferido, dado que el usuario no interactúa físicamente con el equipamiento en tiempo real. No obstante, las puntuaciones obtenidas sugieren que la experiencia es percibida como suficientemente auténtica y coherente con un entorno

experimental genuino, aun cuando la interacción se produce sobre mediciones previamente registradas. Desde el punto de vista técnico-funcional, no se registraron fallas durante la ejecución de las tareas estandarizadas y la totalidad de los participantes completó correctamente la secuencia experimental prevista. Asimismo, el sistema respondió adecuadamente frente a consultas concurrentes, manteniendo estabilidad en el acceso, integridad en los datos recuperados y consistencia en la visualización de los resultados (Garcia-Zubia et al., 2008). En conjunto, los resultados obtenidos permiten afirmar que el LD constituye un entorno estable, funcionalmente robusto y pedagógicamente pertinente, capaz de ofrecer una experiencia de uso satisfactoria para fines formativos en espectrometría gamma. Si bien no reemplaza completamente la experiencia presencial asociada a un laboratorio tradicional, demuestra capacidad para complementar significativamente las prácticas experimentales, ampliando el acceso a datos reales bajo condiciones de seguridad radiológica, trazabilidad y disponibilidad asincrónica.

5.4 Discusión

La etapa de validación permitió evaluar integralmente el desempeño del LD, tanto desde la perspectiva técnica como desde su funcionamiento operativo y la interacción con los usuarios finales. Los resultados obtenidos demuestran que el sistema cumple con los requerimientos de desempeño, confiabilidad e interoperabilidad establecidos en las fases de diseño, alcanzando una estabilidad operativa que lo posiciona como una alternativa viable a los laboratorios remotos en tiempo real. No se detectaron errores en la transmisión de datos ni fallas en la integridad de los archivos descargados, confirmando la consistencia del sistema y la fidelidad de los registros experimentales. Estos resultados validan la robustez del proceso de adquisición y almacenamiento implementado, garantizando que los datos obtenidos por los usuarios reflejen fielmente las mediciones originales realizadas en el IENRI. En relación con la validación funcional, todos los casos de uso críticos definidos (selección de variables, reproducción de video, visualización de espectros y descarga de datos) fueron ejecutados exitosamente, sin interrupciones ni inconsistencias. Esto demuestra que el sistema cumple plenamente con los requerimientos especificados y que las operaciones se realizan de forma estable en distintas plataformas y navegadores. El desempeño del LD frente a carga concurrente también confirmó la escalabilidad del entorno y su capacidad para mantener tiempos de respuesta aceptables con múltiples usuarios conectados. Respecto a la experiencia de usuario, los resultados obtenidos muestran un alto nivel de satisfacción en

términos de eficiencia operativa, claridad de la interfaz, compatibilidad y utilidad percibida. La consistencia entre las mediciones percibidas y los resultados esperados refuerza la confiabilidad del modelo de laboratorio diferido como herramienta de experimentación asistida. Además, la arquitectura implementada permitió mantener una trazabilidad completa del flujo de datos, desde la adquisición hasta la visualización final, asegurando la reproducibilidad de las experiencias. Finalmente, los resultados obtenidos sustentan la viabilidad tecnológica y operativa del LD como una solución innovadora en el campo de la instrumentación nuclear educativa e investigativa. El sistema no solo garantiza precisión y estabilidad en el registro de mediciones, sino que también proporciona una interfaz intuitiva que facilita el análisis asincrónico de resultados sin comprometer la validez de los datos. Esta validación integral permite considerar al LD como un sistema escalable, capaz de ser integrada en otros entornos experimentales del IENRI o replicada en instituciones que requieran acceso remoto a equipamiento especializado.

5.5 Conclusión

La validación integral del LD permitió verificar de manera sistemática el cumplimiento de los requerimientos técnicos, funcionales y operativos definidos en las etapas de diseño e implementación. Los resultados obtenidos confirman que el sistema posee las características necesarias para su funcionamiento estable y confiable en condiciones reales de uso, alcanzando los estándares esperados para una plataforma de experimentación remota asincrónica. La consistencia entre los espectros originales y los archivos descargados por los usuarios respalda la trazabilidad y reproducibilidad de los datos experimentales, aspectos fundamentales para su utilización en entornos académicos y de investigación. En términos funcionales, la totalidad de los casos de uso definidos fue ejecutada satisfactoriamente, confirmando la correcta interoperabilidad entre los distintos componentes del sistema. La plataforma soportó múltiples conexiones simultáneas, lo cual evidencia su escalabilidad y robustez operativa. En cuanto a la experiencia de usuario, las pruebas realizadas reflejaron una alta aceptación general, en las dimensiones de eficiencia, claridad, compatibilidad y utilidad percibida. En conjunto, los resultados de la validación confirman que el LD cumple con los principios de diseño planteados en los capítulos anteriores, consolidándose como una herramienta robusta, confiable y sostenible para la experimentación asincrónica en el ámbito nuclear. Su implementación demuestra la viabilidad técnica capaz de preservar la fidelidad de

los datos y ofrecer acceso remoto a mediciones reales sin requerir conexión en tiempo real. Finalmente, los indicadores obtenidos permiten proyectar líneas de desarrollo futuras orientadas a:

- Incorporar algoritmos de inteligencia artificial para clasificación espectral y detección de anomalías.
- Ampliar la infraestructura a otros experimentos del IENRI (por ejemplo, medición de actividad específica o determinación de semividas).

En síntesis, la validación confirmó que el Laboratorio Diferido cumple con los objetivos de precisión, estabilidad, interoperabilidad y usabilidad planteados en su diseño, constituyéndose en un prototipo consolidado y tecnológicamente transferible, capaz de fortalecer la infraestructura experimental distribuida del Instituto de Estudios Nucleares y Radiaciones Ionizantes.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES

El presente trabajo de tesis logró desarrollar y validar una metodología integral para el diseño e implementación de un LD de Espectrometría Gamma en el reactor nuclear RA-4, cumpliendo con los principios de seguridad radiológica, trazabilidad de datos, reproducibilidad experimental y accesibilidad asíncrona. A continuación, se exponen las conclusiones alcanzadas en relación con cada uno de los objetivos específicos propuestos.

6.1 Validación de los Objetivos

6.1.1 Identificación de variables experimentales críticas

Se identificaron las principales variables que condicionan la calidad de los espectros gamma: tipo de fuente radiactiva, material y espesor de blindaje y tiempo de adquisición. El análisis sistemático de estas variables permitió establecer rangos operativos óptimos y reconocer su influencia en la resolución energética y la relación señal-ruido. Estos resultados fueron fundamentales para definir las configuraciones experimentales incluidas en la base de datos del LD, asegurando coherencia, seguridad y representatividad de las mediciones.

6.1.2 Estandarización de protocolos de registro y trazabilidad

Se diseñaron y documentaron protocolos normalizados para el registro, almacenamiento y recuperación de datos experimentales. La incorporación de metadatos (tipo de fuente, parámetros de adquisición, fecha, usuario y configuración instrumental) permitió garantizar la trazabilidad y reproducibilidad de cada experiencia. Este procedimiento asegura la integridad del flujo de información entre las etapas de adquisición, procesamiento y consulta, aportando transparencia al proceso experimental y a la validación académica de los resultados.

6.1.3 Diseño de una arquitectura tecnológica modular

La arquitectura del sistema se estructuró en tres capas: adquisición, gestión-almacenamiento, interfaz del usuario. Esta organización modular permitió el desarrollo independiente de cada componente y su integración mediante servicios web seguros. La validación técnica demostró estabilidad, escalabilidad y confiabilidad del sistema ante múltiples accesos concurrentes, confirmando la robustez del modelo planteado y su potencial para replicarse en otros entornos experimentales.

6.1.4 Implementación de una interfaz web accesible

Se implementó una interfaz web responsiva que posibilita el acceso diferido a los espectros, la selección de variables experimentales y la descarga de datos. El diseño se basó en criterios de usabilidad y accesibilidad. La validación mediante el cuestionario UXQ4RL v. 1.0, aplicado a docentes y estudiantes, evidenció altos niveles de satisfacción, utilidad e inmersión, confirmando que el LD resulta intuitivo, eficiente y didácticamente efectivo.

6.1.5 Validación comparativa de datos diferidos y mediciones directas

Las pruebas comparativas entre los espectros registrados en modo diferido y las mediciones directas realizadas en el reactor RA-4 evidenciaron una alta concordancia en la posición, la intensidad relativa y la forma de los picos característicos de emisión gamma. Esta coincidencia demuestra que el LD no opera sobre simulaciones, sino que emplea registros experimentales reales, obtenidos con el mismo equipamiento y bajo las mismas condiciones de medición que en el entorno físico. La utilización de datos auténticos asegura que el proceso de análisis y las conclusiones derivadas mantengan validez científica y rigor experimental, permitiendo al usuario interactuar con resultados que reproducen fielmente el comportamiento del sistema de detección. En consecuencia, se confirma la equivalencia funcional del LD respecto del LT y su idoneidad para actividades académicas, de entrenamiento y evaluación en física nuclear.

6.1.6 Propuesta de modelo replicable y escalable

El LD desarrollado constituye un modelo transferible que puede adaptarse a otras instituciones y a diferentes áreas. Su arquitectura, la documentación técnica generada y el uso de herramientas de código libre facilitan la replicación y la interoperabilidad con plataformas como RLMS o LabsLand. De este modo, el LD contribuye a democratizar el acceso a la experimentación científica, ampliando las posibilidades formativas bajo criterios de seguridad, eficiencia y sostenibilidad.

6.2 Conclusiones y Futuras Líneas

El trabajo desarrollado consolida una metodología de diseño, implementación y validación para laboratorios diferidos aplicados a entornos de alta complejidad experimental. La propuesta integra aspectos de instrumentación nuclear, adquisición de datos, arquitectura de sistemas distribuidos y accesibilidad remota, conformando una solución tecnológica robusta, reproducible y escalable. Los resultados obtenidos confirman que el Laboratorio Diferido de Espectrometría Gamma del reactor RA-4 cumple con los principios de seguridad radiológica, trazabilidad de datos y estabilidad operativa, garantizando la equivalencia funcional con el entorno físico de medición. El sistema validó su capacidad de ofrecer acceso asíncrono a información experimental real, sin recurrir a simulaciones, y de mantener la fidelidad espectral necesaria para el análisis y la verificación. Su diseño orientado a servicios (HTTP) y su compatibilidad con bases de datos estructuradas permiten su replicación e integración con plataformas distribuidas y sistemas de gestión de laboratorios a distancia (RLMS). Asimismo, la validación mediante pruebas funcionales demostró la fiabilidad y consistencia del sistema, confirmando su aplicabilidad para fines de investigación, control o entrenamiento técnico. El cumplimiento de los objetivos específicos y la validación empírica alcanzada permiten proyectar nuevas líneas de desarrollo tecnológico, orientadas a la ampliación de las capacidades del modelo. Entre las proyecciones más relevantes se destacan: La integración de tecnologías de realidad virtual y aumentada (VR/AR), que permitirán representar de manera inmersiva los procesos de detección y análisis, ofreciendo una interfaz tridimensional para la manipulación de datos y el control de variables experimentales. El desarrollo de un gemelo digital (Digital Twin) del laboratorio físico, sincronizado con los registros reales, posibilitando la supervisión y el análisis comparativo en tiempo real. La implementación de algoritmos de inteligencia artificial para la optimización de parámetros de adquisición y la detección de anomalías, incrementando la autonomía y capacidad predictiva del sistema. La incorporación de estándares de ciberseguridad y gestión de acceso que fortalezcan la integridad de los datos y la trazabilidad en entornos distribuidos. El modelo propuesto posee un alto potencial de escalabilidad hacia otras áreas del campo nuclear y científico-tecnológico. En particular, la arquitectura modular del Laboratorio Diferido puede replicarse en otros reactores de baja potencia o en laboratorios de radioprotección, física médica, entre otros. Asimismo, la incorporación del LD a entornos virtuales de aprendizaje, como Moodle, favorecería una mayor integración pedagógica, conectando las prácticas diferidas del laboratorio con contenidos teóricos y actividades de aprendizaje interactivas. Estas mejoras y proyecciones apuntan a

consolidar el Laboratorio Diferido como una herramienta estratégica en el marco de la Industria 4.0, fortaleciendo las capacidades digitales locales y promoviendo la transferencia tecnológica en el ámbito nuclear. En síntesis, la incorporación de indicadores técnicos, la explicitación de la arquitectura tecnológica y la comparación con plataformas internacionales consolidan el carácter ingenieril y de innovación de esta tesis. Las perspectivas de automatización, interoperabilidad y replicabilidad posicionan al Laboratorio Diferido del RA-4 como un desarrollo con impacto educativo, científico y de transferencia, coherente con los lineamientos de innovación digital y sostenibilidad promovidos por la Industria 4.0.

6.3 Publicaciones realizadas durante el trabajo de investigación

A lo largo del desarrollo de esta tesis se procuró relevar información, experiencias y perspectivas provenientes de investigadores, docentes y grupos especializados en física nuclear, instrumentación y tecnologías para laboratorios remotos. Paralelamente, se realizaron diversas acciones de difusión orientadas a socializar los avances del Laboratorio Diferido de Radiactividad (LD) y contrastar su enfoque con desarrollos internacionales consolidados. Con este propósito, se participó en congresos, jornadas académicas y reuniones técnicas vinculadas a la enseñanza de la ingeniería y la física, y a la experimentación mediada por tecnologías digitales. Estos espacios permitieron exponer los progresos alcanzados en el diseño de la arquitectura del LD, una propuesta centrada en el uso asincrónico y en la gestión de datos experimentales previamente adquiridos, y recibir aportes de la comunidad científica para fortalecer su fundamentación y alcance pedagógico. Un hito particularmente significativo en el desarrollo de esta tesis fue la estadía académica, mediante dos becas obtenidas, Becas de Movilidad con Perspectiva Género 2023 (Resolución Conjunta MPCyT N° 804 y MIGyD Nº 186) y del Programa de Ayuda a Viajes al Exterior AVE Docente de la Universidad Nacional de Rosario, realizada en la Universidad de Deusto, instancia que permitió un intercambio directo y sostenido con el equipo de WebLab-Deusto, referente internacional en tecnologías para laboratorios remotos. Esta experiencia resultó decisiva para comprender en profundidad los modelos arquitectónicos predominantes en la experimentación remota y para contrastarlos con las necesidades y restricciones propias de un entorno nuclear como el del Reactor RA-4. Esta estadía en Deusto y los posteriores intercambios consolidaron los lineamientos conceptuales

y tecnológicos del LD, especialmente en aspectos de escalabilidad, disponibilidad, seguridad radiológica y accesibilidad educativa.

De esta manera las publicaciones, ponencias y documentos técnicos generados durante el desarrollo de esta tesis reflejan la evolución conceptual y tecnológica del Laboratorio Diferido: desde el análisis crítico de los laboratorios remotos tradicionales y los primeros prototipos hasta la consolidación de una arquitectura modular sustentada en principios de ingeniería del software, estándares de trazabilidad experimental y criterios de usabilidad. Esta trayectoria evidencia no solo el progreso del proyecto, sino también la maduración de un enfoque original que amplía las posibilidades de la experimentación en línea en contextos de física nuclear, preservando al mismo tiempo la seguridad, la reproducibilidad y la calidad de los datos.

- Figallo, G., Hernández Jayo, U., & Sáez de Arregui, G. (2022). Experiencias de formación práctica online para el desarrollo de un laboratorio de radiactividad. En XV Congreso TAEE: Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica.
- Figallo, G., & Hernández Jayo, U. (2022). Experimentación con fuentes radiactivas mediante un laboratorio remoto. En CADI–CAEDI 2022: 6° Congreso Argentino de Ingeniería y 12° Congreso Argentino de Enseñanza de la Ingeniería.
- Figallo, G., Orso, J., Id Betan, R., & Peire, O. (2022). Implementación de un laboratorio remoto para la formación en tecnología nuclear con radiaciones ionizantes. En XLVI Reunión de Tecnología Nuclear.
- Figallo, G., & Hernández Jayo, U. (2022). Diseño de un prototipo de un laboratorio remoto de radiactividad. En XVI Jornadas de Ciencias, Tecnología e Innovación de la Universidad Nacional de Rosario.
- Figallo, G., Hernández-Jayo, U., García-Zubia, J., Orso, J. (2024). Diseño de un laboratorio diferido de radiactividad. DYNA, 99, 465–469. https://doi.org/10.52152/D11168
- Figallo, G., Orso, J., Clerici, A., & Peire, O. (2025). Desarrollo de la interfaz del Laboratorio Diferido de un reactor nuclear de investigación RA-4. En XIX Jornadas de Ciencias, Tecnología e Innovación de la Universidad Nacional de Rosario.
- Figallo, G., Orso, J., Clerici, A., Peire, O., & López, G. (2025). Laboratorio Diferido de Radiactividad: acercando la física nuclear a la educación. En XLIX Reunión de Tecnología Nuclear.

BIBLIOGRAFIA

Aktan, B. (1996). Distance learning applied to control engineering education. Oregon State University.

Almazaydeh, L., Abdelfattah, E., Al-Bzoor, M., & Al-Rahayfeh, A. (2010). Performance Evaluation of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks. International Journal of Computer Science & Information Technology, 2(2), 66-75. https://doi.org/10.5121/ijcsit.2010.2206

Almenara, J., Gutiérrez Castillo, J. J., Osuna, J., & Palacios-Rodríguez, A. (2023). Digital Teaching Competence According to the DigCompEdu Framework. Comparative Study in Different Latin American Universities. Journal of New Approaches in Educational Research, 12, 276-291. https://doi.org/10.7821/naer.2023.7.1452

Alves, G. R., Fidalgo, A. V., Marques, M. A., Viegas, M. C., Felgueiras, M. C., Costa, R. J., Lima, N., Castro, M., Díaz-Orueta, G., SanCristóbal-Ruiz, E., García-Loro, F., García-Zubía, J., Hernández-Jayo, U., Kulesza, W. J., Gustavsson, I., Nilsson, K., Zackrisson, J., Pester, A., Zutin, D. G., … Bertramo, B. (2018). International Cooperation for Remote Laboratory Use. En M. M. Nascimento, G. R. Alves, & E. V. A. Morais (Eds.), Contributions to Higher Engineering Education (pp. 1-31). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8917-6_1

AR 10.1.1. (2019). Norma básica de seguridad radiológica.

Arguedas Matarrita, C., & Concari, S. (2015). Hacia un estado del arte de los laboratorios remotos en la enseñanza de la física. Revista de Enseñanza de la Física, 27, 133-139.

Arguedas Matarrita, C., & Concari, S. (2018). Características deseables en un Laboratorio Remoto para la enseñanza de la física: Indagando a los especialistas. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, 35, 702-720. https://doi.org/10.5007/2175-7941.2018v35n3p702

Arias, P. F. (2013). Historia de la evolución técnica de los reactores nucleares de agua a presión = History of the technical evolution of pressurized water nuclear reactors. ArtefaCToS, 6(1), 109–138.

Autoridad Regulatoria Nuclear. (2001). Criterios radiológicos relativos a accidentes en reactores nucleares de potencia. Protección contra terremotos en los mencionados reactores nucleares. Desmantelamiento de los mismos. Criterios generales de seguridad para el diseño. Diseño del núcleo. Circuito primario de presión. Sistema de protección relacionada con la seguridad de reactores nucleares de potencia. Sistema de confinamiento. Sistema de calidad. Criterios generales de seguridad para la operación de reactores nucleares de potencia. https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/70000-74999/72145/norma.htm

Banitaan, S., Al-refai, G., Almatarneh, S., & Alquran, H. (2023). A Review on Artificial Intelligence in the Context of Industry 4.0. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 14. https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140204

Bencomo, S. D. (2002). CONTROL LEARNING: PRESENT AND FUTURE. IFAC Proceedings Volumes, 15th IFAC World Congress, 35(1), 71-93. https://doi.org/10.3182/20020721-6-ES-1901.01641

Blanc, R. L., Lepratte, L., Rodríguez, M. A., & Ratto, D. (s. f.). El largo y sinuoso camino hacia la Industria 4.0 en pymes argentinas. Un análisis de Argentina en cuanto a la aplicación de industria inteligente. Revista Pymes, Innovación y Desarrollo, 12(1), 100-122.

Bochicchio, M. A., & Longo, A. (2009). Hands-On Remote Labs: Collaborative Web Laboratories as a Case Study for IT Engineering Classes. IEEE Transactions on Learning Technologies, 2(4), 320-330. https://doi.org/10.1109/TLT.2009.30

Brinson, J. (2015). Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research. Computers and Education, 87, 218-237. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.07.003

Castro, M., Llamas, M., Díaz, G., Cristóbal, E. S., Martín, S., Gil, R., Tawfik, M., Caeiro, M., Fontenla, J., Pastor, R., Hernández, R., Ros, S., Pesquera, A., García-Zubía, J., Orduña, P., Gómez, J. M., Tovar, E., Martínez-Bonastre, Ó., & Vicent, Y. L. (2012). Servicios para plataformas educativas: laboratorios y aplicaciones.

Colwell, C., Scanlon, E., & Cooper, M. (2002). Using remote laboratories to extend access to science and engineering. Computers & Education, 38(1), 65-76. https://doi.org/10.1016/S0360-1315(01)00077-X

Corter, J. E., Nickerson, J., Esche, S. K., Chassapis, C., Im, S., & Ma, J. (2007). Constructing reality: A study of remote, hands-on, and simulated laboratories. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 14(2), Article 7. https://doi.org/10.1145/1275511.1275513

Corter, J., Nickerson, J., Esche, S., & Chassapis, C. (2004). Remote versus hands-on labs: A comparative study. 2, F1G-17. https://doi.org/10.1109/FIE.2004.1408586

Cuadros, J., Serrano, V., García-Zubía, J., & Hernandez-Jayo, U. (2021). Design and Evaluation of a User Experience Questionnaire for Remote Labs. IEEE Access, 9, 50222-50230. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069559

Dave, P. M., & Dalal, P. D. (2013). Simulation & Performance Evaluation of Routing Protocols in Wireless Sensor Network. 2(3).

De Jong, T., Linn, M., & Zacharia, Z. (2013). Physical and Virtual Laboratories in Science and Engineering Education. Science (New York, N.Y.), 340, 305-308. https://doi.org/10.1126/science.1230579

De Jong, T., Sotiriou, S., & Gillet, D. (2014). Innovations in STEM education: The Go-Lab federation of online labs. Smart Learning Environments, 1(1), 3. https://doi.org/10.1186/s40561-014-0003-6

Del Alamo, J., Brooks, L., McLean, C., Hardison, J., Mishuris, G., Chang, V. y Hui, L. (2002). The microelectronics WebLab 6.0: An implementation using web services and the iLab shared architecture. En Proceedings of Exploring Innovation in Education and Research (iCEER 2005), Tainan, Taiwan.

Errico, L. A., Montes, M. L., & Taylor, M. A. (2023). Radioactividad, medioambiente y espectroscopía gamma: De la teoría al laboratorio. https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/2412/6801/11301-1

Feisel, L., & Rosa, A. J. (2005). The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education. Journal of Engineering Education, 94. https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2005.tb00833.x

Fernandez, R., Loro, F., Alves, G., López-Rey, A., Meier, R., & Castro, M. (2024). New Scenarios and Trends in Nontraditional Laboratories From 2000 to 2020. IEEE Transactions on Learning Technologies, PP, 1-20. https://doi.org/10.1109/TLT.2024.3387280

Fouquet, R., Laperdrix, P., & Rouvoy, R. (2023). Breaking Bad: Quantifying the Addiction of Web Elements to JavaScript. ACM Transactions on Internet Technology, 23(1), 1-28. https://doi.org/10.1145/3579846

Franco, S. F., Graña, J. M., & Robert, V. (2024). Industria 4.0 como sistema tecnológico. Los desafíos de la política pública. Pymes, Innovación y Desarrollo, 12(1), 32-54. https://doi.org/10.70453/2344.9195.v12.n1.45151

Gamage, K., Wijesuriya, D., Yatigammana Ekanayake, S., Rennie, A., Lambert, C., & Gunawardhana, N. (2020). Online Delivery of Teaching and Laboratory Practices: Continuity of University Programmes during COVID-19 Pandemic. Education Sciences, 10, 291. https://doi.org/10.3390/educsci10100291

García Peñalvo, F. J. (2024). Generative Artificial Intelligence and Education: An Analysis from Multiple Perspectives. Education in the Knowledge Society (EKS), (25), 1.

García Zubía, J., & Alves, G. (2011). (PDF) Using Remote Lab for Physics Teaching. https://www.researchgate.net/publication/255785889_Using_Remote_Lab_for_Physics_Teaching

Garcia-Loro, F., Cristobal, E. S., Diaz, G., Castro, M., Orduña, P., Kulesza, W., Nilsson, K., Fidalgo, A., Alves, G., Hernandez-Jayo, U., Garcia-Zubia, J., Kreiter, C., Pester, A., Auer, M., Garcia, C., Tavio, R., Valtonen, K., & Lehtikangas, E. (2019). PILAR: Sharing VISIR Remote Labs Through a Federation. 2019 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), 102-106. https://doi.org/10.1109/EDUCON.2019.8725093

García-Zubía, J., & Gomes, L. (Eds.). (2007). Advances on Remote Laboratories and E-Learning Experiences. Universidad de Deusto.

Garcia-Zubia, J., López-de-Ipiña, D., Orduña, P., Hernandez, U., Angulo, I., & Irurzun, J. (2008). Acceptance, usability and usefulness of WebLab-Deusto from students point of view. 5, 899-904. https://doi.org/10.1109/ICDIM.2008.4746846

Gholam, A. (2019). Inquiry-Based Learning: Student Teachers' Challenges and Perceptions. Journal of Inquiry & Action in Education, 10(2). https://digitalcommons.buffalostate.edu/jiae/vol10/iss2/7

Gierlik, M., Iwanowska, J., Kozlowski, T., Moszynski, M., Swiderski, L., & Szczesniak, T. (2012). Investigation of the Properties of 3 ' ' x 3 ' ' Different Scintillation Detectors for Neutron Activation Analysis Techniques. IEEE Transactions on Nuclear Science - IEEE TRANS NUCL SCI, 59, 230-235. https://doi.org/10.1109/TNS.2011.2176350

Gilmore, G. R. (2008). Practical Gamma-Ray Spectrometry (1.ª ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470861981

Gomes, L., & Bogosyan, S. (2009). Current Trends in Remote Laboratories. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56(12), 4744-4756. https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2033293

Gröber, S., Vetter, M., Eckert, B., & Jodl, H.-J. (2007). Experimenting from a distance—Remotely controlled laboratory (RCL). European Journal of Physics, 28, S127-S141. https://doi.org/10.1088/0143-0807/28/3/S12

Grove, M., & Overton, T. (2013). Getting Started in Pedagogic Research within the STEM Disciplines. University of Birmingham STEM Education Centre. https://www.birmingham.ac.uk/Documents/college-eps/college/stem/guide-pedagogic-research.pdf

Gustavsson, I. (2002). A Remote Laboratory For Electrical Experiments. 2002 Annual Conference Proceedings, 7.100.1-7.100.9. https://doi.org/10.18260/1-2--10624

Harward, J., Alamo, J., Lerman, S., Bailey, P., Carpenter, J., DeLong, K., Felknor, C., Hardison, J., Harrison, B., Jabbour, I., Long, P., Mao, T., Naamani, L., Northridge, J., Schulz, M., Talavera, D., Varadharajan, C., Wang, S., Yehia, K., & Zych, D. (2008). The iLab Shared Architecture: A Web Services Infrastructure to Build Communities of Internet Accessible Laboratories. Proceedings of the IEEE, 96, 931-950. https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.921607

Henke, K., Vietzke, T., Wuttke, H.-D., & Ostendorff, S. (2015). Safety in Interactive Hybrid Online Labs. International Journal of Online Engineering (iJOE), 11. https://doi.org/10.3991/ijoe.v11i3.4557

Heradio, R., de la Torre, L., & Dormido, S. (2016). Virtual and remote labs in control education: A survey. Annual Reviews in Control, 42, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.08.001

Hesselink, L., Rizal, D., & Bjornson, E. (2000). CyberLab: Remote access to laboratories through the world-wide-web

Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design Science in Information Systems Research. MIS Quarterly, 28(1), 75–105. https://doi.org/10.2307/25148625

Hoyos, H. A., García, N. C., Izquierdo, A. G., López, V. L., & Acuña, K. R. (2024). Impacto de la Adopción de Competencias Digitales y Tecnológicas de la Industria 4.0 en la Productividad, Empleabilidad, Innovación y Sostenibilidad Económica en Sectores Industriales: Un Análisis Comparativo con Competencias Laborales Tradicionales. Gestión de Operaciones Industriales, 3(2), 24-37

Idoyaga, I., Vargas Badilla, L., César, N., Moya, Montero-Miranda, E., Ana, M., & Garro-Mora, L. (2020). El Laboratorio Remoto: Una alternativa para extender la actividad experimental

Iñonan Moran, M. J., Orduña Fernandez, P., & Hussein, R. (2023). Adaptación de un laboratorio remoto de SDR para analizar desigualdades digitales en educación de comunicaciones inalámbricas en Latinoamérica. Innovaciones Educativas, 25(Especial), 32-43. https://doi.org/10.22458/ie.v25iEspecial.4920

Jacob, F. L., Marques, M. A., Alves, G. R., Fidalgo, A. V., Loro, F. G., & Ruiz, E. S. C. (2025). The VISIR Remote Laboratory: Analysis of Limitations and Proposals for Improvement. Laboratories, 2(4), 20. https://doi.org/10.3390/laboratories2040020

Kalúz, M., Orduña, P., García-Zubia, J., Fikar, M., & Ĉirka, L. (2013). Sharing Control Laboratories by Remote Laboratory Management System WebLab-Deusto. IFAC Proceedings Volumes, 10th IFAC Symposium Advances in Control Education, 46(17), 345-350. https://doi.org/10.3182/20130828-3-UK-2039.00074

Khan, M. Z., Askwith, B., Bouhafs, F., & Asim, M. (2011). Limitations of Simulation Tools for Large-Scale Wireless Sensor Networks. 2011 IEEE Workshops of International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 820-825. https://doi.org/10.1109/WAINA.2011.59

Krane, K. S. (1988). Introductory nuclear physics (Rev. ed., [Nachdr.]). Wiley

López, S., Carpeño, A., & Arriaga, J. (2014). Laboratorio remoto eLab3D: Un mundo virtual inmersivo para el aprendizaje de la electrónica. 2014 11th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 100-105. https://doi.org/10.1109/REV.2014.6784234

Lowe, D. (2013). Integrating Reservations and Queuing in Remote Laboratory Scheduling. IEEE Transactions on Learning Technologies, 6(1), 73-84. https://doi.org/10.1109/TLT.2013.5

Lustigova, Z., & Novotna, V. (2012). The role of virtual and remote labs in promoting conceptual understanding of students. Proceedings of 2012 International Conference on Interactive Mobile and Computer Aided Learning (IMCL), 42-47. https://doi.org/10.1109/IMCL.2012.6396448

Musa, R. Z. (2012). Laboratorios Remotos: Actualidad y Tendencias Futuras. Scientia et Technica, 17(51), 113–118. https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/6911

Nickerson, J., Corter, J., Esche, S., & Chassapis, C. (2007). A Model for evaluating the effectiveness of remote engineering laboratories and simulations in education. Computers & Education, 49, 708-725. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2005.11.019

Orduña, P., Irurzun, J., Rodriguez-Gil, L., Garcia-Zubia, J., Gazzola, F., & López-de-Ipiña, D. (2011). Adding New Features to New and Existing Remote Experiments through their Integration in WebLab-Deusto. International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE), 7, 33-39. https://doi.org/10.3991/ijoe.v7iS2.1774

Orduña, P., Rodriguez-Gil, L., Garcia-Zubia, J., Angulo, I., Hernandez, U., & Azcuenaga, E. (2016). LabsLand: A sharing economy platform to promote educational remote laboratories maintainability, sustainability and adoption. 2016 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), 1-6. https://doi.org/10.1109/FIE.2016.7757579

Orduña, P., Rodriguez-Gil, L., Garcia-Zubia, J., Angulo, I., Hernandez, U., & Azcuenaga, E. (2018). Increasing the Value of Remote Laboratory Federations Through an Open Sharing Platform: LabsLand. En M. E. Auer & D. G. Zutin (Eds.), Online Engineering & Internet of Things (pp. 859-873). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64352-6_80

Orduña, P., Zutin, D. G., Govaerts, S., Zorrozua, I. L., Bailey, P. H., Sancristobal, E., Salzmann, C., Rodriguez-Gil, L., DeLong, K., Gillet, D., Castro, M., López-de-Ipiña, D., & García-Zubia, J. (2015). An Extensible Architecture for the Integration of Remote and Virtual Laboratories in Public Learning Tools. IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje, 10(4), 223-233. https://doi.org/10.1109/RITA.2015.2486338

Ozvoldova, M., Cernansky, P., & Lustig, F. (2005). Experience with Remote Physics Experiments in Student's Laboratory. In Proceedings of the International Conference on Engineering Education (ICEE 2005), Gliwice, Poland.

Palau, R., Mogas-Recalde, J., & Domínguez-García, S. (2020). El proyecto Go-Lab como entorno virtual de aprendizaje: Análisis y futuro. EDUCAR, 56(2), 407-421. https://doi.org/10.5565/rev/educar.1068

Pedaste, M., Mäeots, M., Siiman, L. A., de Jong, T., van Riesen, S. A. N., Kamp, E. T., Manoli, C. C., Zacharia, Z. C., & Tsourlidaki, E. (2015). Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle. Educational Research Review, 14, 47-61. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2015.02.003

Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M., & Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. Journal of Management Information Systems, 24, 45-77.

PhET: Free online physics, chemistry, biology, earth science and math simulations. (s. f.). Recuperado 17 de febrero de 2026, de https://phet.colorado.edu/

Poenaru, D. N., Gherghescu, R. A., Hamilton, J. H., & Stöcker, H. (2022). Short History of Nuclear Decays Including Nuclear Fission. Advances in Historical Studies, 11(04), 216-250. https://doi.org/10.4236/ahs.2022.114018

Pokoo-Aikins, G. A., Hunsu, N., & May, D. (2019). Development of a Remote Laboratory Diffusion Experiment Module for an Enhanced Laboratory Experience. 2019 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), 1-5. https://doi.org/10.1109/FIE43999.2019.9028460

Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrović, V. M., & Jovanović, K. (2016). Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review. Computers & Education, 95, 309-327. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002

Pressman, R. S. (2005). Software Engineering: A Practitioner's Approach (7th ed.). McGraw-Hill.

Rodriguez-Gil, L., Orduña, P., García-Zubia, J., & López-de-Ipiña, D. (2018). Interactive live-streaming technologies and approaches for web-based applications. Multimedia Tools and Applications, 77(6), 6471-6502. https://doi.org/10.1007/s11042-017-4556-6

Saliah-Hassane, H., Correia, R. C., & Fonseca, J. M. (2013). A network and repository for online laboratory, based on ontology. 2013 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), 1177-1189. https://doi.org/10.1109/EduCon.2013.6530257

Sam, R. (2024). Systematic review of inquiry-based learning: Assessing impact and best practices in education. F1000Research. https://doi.org/10.12688/f1000research.155367.1

Scanlon, E., Colwell, C., Cooper, M., & Di Paolo, T. (2004). Remote experiments, re-versioning and re-thinking science learning. Computers & Education, 21st Century Learning: Selected Contributions from the CAL 03 Conference, 43(1), 153-163. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2003.12.010

Schauer, F., Lustig, F., Ak, J., Ožvoldo, M., & Endnote, S. (2008). An easy-to-build remote laboratory with data transfer using the Internet School Experimental System. European Journal of Physics - EUR J PHYS, 29. https://doi.org/10.1088/0143-0807/29/4/010

Schauer, F., Ozvoldova, M., Gerza, M., Krbecek, M., Beno, P., Komenda, T., Das, S., & Archibong, M. I. (2017). REMLABNET IV – LTI Federated Remote Laboratory Management System with Embedded Multiparameter Simulations. International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE), 13(10), 103-113. https://doi.org/10.3991/ijoe.v13i10.7802

Schrepp, M., Hinderks, A., & Thomaschewski, J. (2017). Construction of a Benchmark for the User Experience Questionnaire (UEQ). International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence, 4, 40-44. https://doi.org/10.9781/ijimai.2017.445

Sears, & Zemansky. (2019). Fisica Universitaria Moderna (PEARSON EDUCACIÓN, Vol. 2).

Shah, H. (2023, noviembre 28). Harnessing customized built-in elements—Empowering Component-Based Software Engineering and Design Systems with HTML5 Web Components. arXiv.Org. https://doi.org/10.5121/csit.2023.132219

Silva, I. N. da, García-Zubía, J., Hernández-Jayo, U., Alves, J. B. da M., & Dandolini, G. A. (2023). Design, Implementation and Evaluation of Deusto XRL, a Reference Architecture for Extended Remote Laboratories (XRLs). Electronics, 12(23), 4812. https://doi.org/10.3390/electronics12234812

Soysal, O. A. (2000). Computer Integrated Experimentation In Electrical Engineering Education Over Distance. 2000 Annual Conference Proceedings, 5.164.1-5.164.10. https://doi.org/10.18260/1-2--8230

Spilakova, P., & Schauer, F. (2015). Remote laboratory management system remlabnet and its booking system. 1-5. https://doi.org/10.1109/ICeND.2015.7328544

Tawfik, M., Sancristobal, E., Martín, S., Gil Ortego, R., Pesquera, A., Tovar, E., Llamas Nistal, M., Diaz, G., Peire, J., & Castro, M. (2012). Common Multidisciplinary Prototypes of Remote Laboratories in the Educational Curricula of Electrical and Computer Engineering. 25.326.1-25.326.16. https://doi.org/10.18260/1-2--21084

Tawfik, M., Sancristobal, E., Martin, S., Gil, R., Diaz, G., Colmenar, A., Peire, J., Castro, M., Nilsson, K., Zackrisson, J., Håkansson, L., & Gustavsson, I. (2013). Virtual Instrument Systems in Reality (VISIR) for Remote Wiring and Measurement of Electronic Circuits on Breadboard. IEEE Transactions on Learning Technologies, 6(1), 60-72. https://doi.org/10.1109/TLT.2012.20

Tzes, A., Wong, H., & Kapila, V. (2001). Mechatronics/Process Control Remote Laboratory. 6.711.1-6.711.17. https://doi.org/10.18260/1-2--9544

Veloza García, J. D. (2020). Diseño de laboratorios híbridos para la enseñanza de ingeniería de manufactura. http://hdl.handle.net/10882/10110

Villar-Martínez, A., Ortiz-de-Zarate, L., Rodriguez-Gil, L., Hernandez, U., Garcia-Zubia, J., Angulo, I., Terkowsky, C., Ortelt, T., Wilkesmann, U., Nowak, R., Frei, S., Arguedas Matarrita, C., Montero-Miranda, E., & Orduña, P. (2024). LabsLand Electronics Laboratory: Distributed, Scalable and Reliable Remote Laboratory for Teaching Electronics (pp. 261-272). https://doi.org/10.1007/978-3-031-42467-0_24

Zutin, D. G., Auer, M. E., Maier, C., & Niederstätter, M. (2010). Lab2go—A repository to locate educational online laboratories. In 2010 IEEE Education Engineering Conference (pp. 1741-1746)

ANEXO A: GUIA PRACTICA QUE ACOMPAÑA AL LD

IENRI

FAC. CS. EXACTAS,
INGENIERÍA Y AGRIMENSURA - UNR

Labs Land

Laboratorio de Espectrometría Gamma

Versión 1.0

Documento elaborado por: **Instituto de Estudios Nucleares y Radiaciones Ionizantes (IENRI)** de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) - Universidad Nacional de Rosario (UNR).

Autores: Figallo Gabriela, Orso Jose, Hernandez-Jayo Unai, Peire Oscar, Clerici Alan.

Fecha: **16 de** octubre **de** 2024

ÍNDICE de contenidos

Contenido

1. Espectrometría Gamma 5
2. Desarrollo del Experimento 9
3. Experiencia de usuario 10
4. Toma de Mediciones 12
5. Análisis de resultados 12
6. Ejemplo 14

OBJETIVOS

Los objetivos del experimento son:

- Comprender los principios de la espectrometría gamma.

- Estudiar la interacción de la radiación gamma con la materia.

- Diferenciar el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares

- Evaluar cómo actúa el blindaje sobre las radiaciones.

RESULTADOS DE APRENDIZAJE

Se espera que el estudiante sea capaz de:

- Analizar el espectro obtenido.

- Distinguir las regiones de la curva del espectro correspondiente.

- Tomar datos y representarlos gráficamente.

- Calcular el coeficiente de atenuación lineal.

- Procesar datos, analizar resultados y elaborar conclusiones.

ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento está estructurado de la siguiente manera:

1. Introducción a la Espectrometría Gamma.

2. Desarrollo del experimento.

3. Experiencia del usuario.

4. Toma de mediciones

4. Análisis de resultados.

5. Ejemplo

1. Espectrometría Gamma

La radiactividad fue descubierta en 1896 por Henri Becquerel, mientras investigaba la fluorescencia de ciertos compuestos, como el uranilsulfato de potasio, que mostraba la capacidad de impresionar placas fotográficas. Su fluorescencia podía atravesar las cubiertas que protegían dichas placas. Posteriormente, Marie y Pierre Curie continuaron las investigaciones de Becquerel, descubriendo que el torio poseía propiedades similares a las del uranio, y denominaron a este fenómeno "radiactividad". Más tarde, Ernest Rutherford identificó que la radiación era un fenómeno complejo, descubriendo la existencia de las partículas alfa y beta (Friedlander y Kennedy, 1960). Adicionalmente, P. Villard identificó un tercer componente de la radiación, más penetrante que las partículas alfa y beta, el cual no era desviado por campos eléctricos o magnéticos, sugiriendo que se trataba de una onda electromagnética, que fue denominada rayos gamma (Pérez y Héctor, 2001).

La radiactividad es un fenómeno aleatorio que ocurre de manera natural, en el cual un núcleo atómico inestable sufre desintegración mediante la emisión de partículas alfa (α), beta (β) o por captura electrónica. Tras esta desintegración, el núcleo resultante puede quedar en un estado excitado, con una cantidad de energía superior a la necesaria para estar en su estado fundamental. Esta energía excedente se libera a través de la emisión de rayos gamma (γ), los cuales son característicos del núcleo emisor (Pérez y Héctor, 2001).

Por medio de detectores utilizados en espectrometría gamma, es posible identificar la energía y la intensidad de los fotones de rayos gamma que inciden en dichos detectores, lo que permite analizar las propiedades específicas de los radioisótopos emisores (Friedlander y Kennedy, 1960).

El análisis mediante espectrometría gamma se basa en la obtención del espectro energético de las radiaciones emitidas por una muestra. Este procedimiento utiliza un detector capaz de generar una señal, cuya amplitud de pulso de voltaje es proporcional a la energía de la radiación incidente, lo que permite caracterizar las propiedades energéticas de la radiación emitida.

El detector centellador permite determinar la energía y el número de cuentas proporcional a la intensidad detectada de las radiaciones gamma producidas por isótopos radioactivos usando una adecuada calibración en energía y eficiencia. Dicho detector está compuesto por varios elementos, en primer lugar, un material centellador, encargado de convertir la radiación ionizante en fotones dentro del rango ultravioleta-visible. Luego, un fotocátodo que, al absorber estos fotones, emite electrones. A continuación, un sistema multiplicador que amplifica la señal de electrones generada. Finalmente, un circuito electrónico se encarga de procesar las señales eléctricas producidas por el fotomultiplicador. Un esquema ilustrativo de este sistema de detección se presenta en la figura 1.

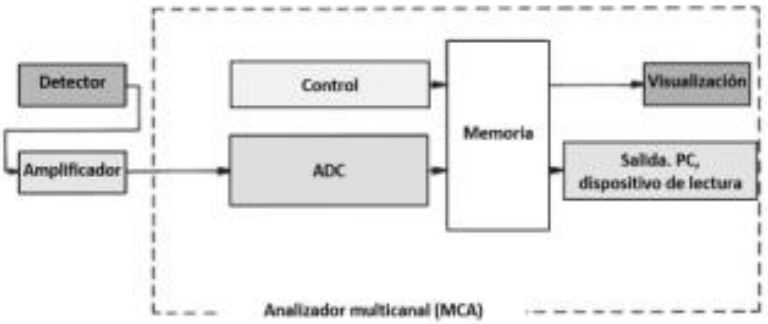


Figura 1. Componentes de un analizador multicanal (MCA). Fuente: Radioactividad, Medioambiente y espectroscopía gamma – l. a. Errico, m. l. Montes y m. a. Taylor -UNLP

El Analizador Multicanal (MCA) clasifica los pulsos de entrada según su amplitud, generando un valor proporcional a dicha magnitud. Esta información se almacena en un acumulador multicanal en forma de histograma, el cual representa la salida del sistema y puede visualizarse como un espectro utilizando equipo externo adicional. El componente principal del MCA es el convertidor analógico-digital, que mide la amplitud de cada pulso entrante, los discrimina y los organiza en función de su amplitud. El ADC convierte este rango continuo en un número finito de intervalos discretos, denominados canales, para su procesamiento y análisis.

El espectro que se obtiene a la salida con el detector centellador de NaI(Tl) se puede observar en la figura 2, donde el eje x está en canales y el eje y en cuentas. Si se determina la relación entre canales y energía se tendrá la calibración en energías y se podrá convertir el espectro de altura de pulsos de canales a energías y obtener el espectro de energías, el cual contiene la información necesaria para saber que energías emite la muestra en estudio.

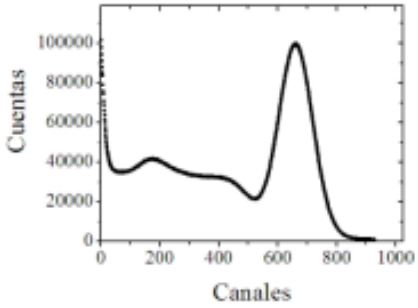


Figura 2. Espectro de altura de pulsos del Cs - 137 tomado con un detector centellador de NaI (Tl). Fuente: Radioactividad, Medioambiente y espectroscopía gamma – l. a. Errico, m. l. Montes y m. a. Taylor -UNLP

Una vez obtenido el espectro, se puede determinar algunas constantes características de la muestra estudiada, como se describe a continuación.

Sea N(t) el número (muy grande) de núcleos radiactivos en una muestra, en el momento t, y sea dN(t) el cambio (negativo) en ese número durante un corto intervalo de tiempo dt. La cantidad de decaimientos durante el intervalo dt es -dN(t). La tasa de cambio de N(t) es el negativo de dN(t)/dt; entonces, -dN(t)/dt es la tasa de decaimiento, rapidez de decaimiento, velocidad de decaimiento o **actividad**. La actividad (A), es decir que cuanto mayor sea la cantidad de núcleos en la muestra, más núcleos decaen durante cualquier intervalo de tiempo. Por lo que la actividad es directamente proporcional a N(t); entonces es igual a una constante λ multiplicada por N(t)

$$\lambda . N = \frac{-dN}{dt} \qquad \textit{Ecuación 1}$$

dónde: λ se le llama **constante de decaimiento**, constante radiactiva o coeficiente de decaimiento, y tiene distintos valores para núclidos diferentes. Un valor grande de λ corresponde a un decaimiento rápido, y uno pequeño, a un decaimiento más lento

La unidad de la actividad (A) dentro del sistema internacional, es el becquerel (Bq). Un becquerel es la actividad correspondiente a una desintegración por segundo. Otra unidad de medida para la actividad es el Curie (Ci). Un Curie es igual a $3{,}7 \times 10^{10}$ Bq.

Ahora bien, ¿qué ocurre si se coloca un material entre la fuente radiactiva y el detector? Cuando un fotón atraviesa un medio material absorbente con un espesor específico, existe una probabilidad de que sufra una interacción. Esta probabilidad depende de varios factores, incluyendo la energía del fotón, la composición del material absorbente y su espesor. Es importante destacar que, a medida que aumenta el grosor del absorbente, también se incrementa la probabilidad de que se produzca una interacción. Asimismo, al elevarse el número atómico o la densidad del material, la atenuación que se produce a un espesor dado también tiende a aumentar.

Para cuantificar esta interacción, se considera un haz de fotones con intensidad I_0 que incide perpendicularmente sobre una lámina de espesor Δx. Se puede demostrar que la atenuación experimentada por un haz de fotones sigue la ley de atenuación exponencial, conocida como Ley de Lambert-Beer:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \qquad \textit{Ecuación 2}$$

I_0 representa la intensidad inicial del haz, μ es el coeficiente de atenuación lineal, y x es el espesor del absorbente. La presencia del signo negativo en la ecuación indica que la intensidad del haz disminuye al aumentar el espesor del absorbente.

Para obtener el coeficiente de atenuación lineal μ mediante regresión lineal, se aplica el logaritmo natural a ambos miembros de la ecuación y se desprecia la variación de la actividad de la fuente durante el lapso de duración del experimento.

$$In\frac{I}{I_0} = -\mu x \qquad \textit{Ecuación 3}$$

El **coeficiente de atenuación** es una magnitud que describe la eficacia con la que un material puede ser penetrado por un haz de radiación. Un coeficiente de atenuación elevado indica que el haz experimenta una atenuación más eficiente al atravesar dicho material, mientras que un coeficiente de atenuación bajo sugiere que la atenuación del haz es menor. Por lo tanto, la capacidad de un material para atenuar la radiación está íntimamente relacionada con su coeficiente de atenuación lineal.

2. Desarrollo del Experimento

La experiencia se realiza de la siguiente manera: en primer lugar, se coloca en un receptáculo la fuente radiactiva, Cs- 137 (Cesio) o Ba- 133 (Bario), y dentro del mismo receptáculo, en un soporte sobre las fuentes, se ubican las placas de material que actúan como blindaje, es decir que los blindajes quedan entre la fuente y el detector como se observa en la Figura 3.

Los blindajes pueden ser de hierro, de aluminio o de plomo; para cada uno de estos materiales, se cuenta con diez placas, con espesores variables. Dichas placas permiten ser superpuestas de modo que se puede variar el espesor del blindaje. De este modo, en el Laboratorio Diferido en desarrollo se utilizarán espesores de 0,6 cm, 1 cm y 2 cm.

En la parte superior del receptáculo se coloca el detector. El mismo está compuesto de un cristal de centelleo alimentado por una fuente de alta tensión y los pulsos son analizados en el espectrómetro multicanal analógico, Figura 4.



Figura 3. Receptáculo con fuente y blindaje. Fuente: imagen del Lab. Del IENRI- Figallo.



Figura 4. Laboratorio de Espectrometría gamma del IENRI. Fuente: imagen del Laboratorio del IENRI-Figallo.

3. Experiencia de usuario

La experiencia de laboratorio se divide en las siguientes etapas:

En una primera fase, se seleccionan las variables, como se observa en la interfaz, para llevar a cabo el experimento:

Fuente: Cesio, Bario

Blindaje: Plomo, Hierro, Aluminio

Espesor Blindaje: 0,60 cm-1,00 cm - 2 cm

Tiempo: 3 min - 5 min

Posteriormente se observa un video mostrando las variables seleccionadas y el espectro obtenido.



Figura 5 y 6. Variables a seleccionar. Fuente: imágenes en el IENRI- Figallo.



Figura 7. Video que muestra las variables seleccionadas. Fuente: imagen en el IENRI - Figallo.

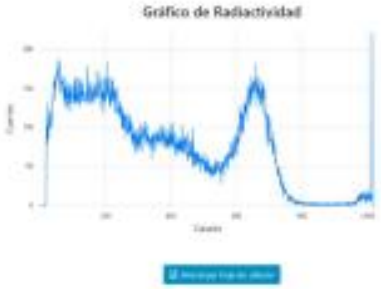


Figura 8. Espectro Obtenido. Fuente: imagen obtenida en el IENRI - Figallo

4. Toma de Mediciones

A la hora de la experiencia el estudiante debe:

- Primero colocar la fuente (de Cesio en este caso) en el receptáculo donde se encuentra el detector y realizar una medición sin blindaje, en diferentes tiempos. Obteniendo así los espectros correspondientes.

- Posteriormente con la fuente, de Cesio aun, en el receptáculo donde se encuentra el detector se coloca el blindaje de aluminio, se realizan sucesivas mediciones variando la cantidad de láminas de aluminio, de menor a mayor espesor y, a su vez, variando los tiempos. Obteniendo así los espectros correspondientes.

- Posteriormente con la fuente, de Cesio aun, en el receptáculo donde se encuentra el detector se coloca el blindaje de hierro, se realizan sucesivas mediciones variando la cantidad de láminas de hierro, de menor a mayor espesor y, a su vez, variando los tiempos. Obteniendo así los espectros correspondientes.

- Posteriormente con la fuente, de Cesio aun, en el receptáculo donde se encuentra el detector se coloca el blindaje de plomo se realizan sucesivas mediciones variando la cantidad de láminas de hierro, de menor a mayor espesor y, a su vez, variando los tiempos. Obteniendo así los espectros correspondientes.

Una vez obtenidos los espectros, se comienza a analizar los mismos. Posteriormente se grafica el logaritmo neperiano de la cantidad de fotones (conteos) registrados versus el espesor de material de blindaje. Finalmente, mediante la Ecuación 3, se calcula el coeficiente de atenuación μ con una regresión lineal de la gráfica obtenida.

La misma experiencia se debe repetir con la fuente de Bario.

5. Análisis de resultados

Una vez obtenidos los espectros, analice y responda:

1. ¿Qué zonas se pueden distinguir en el espectro?
2. Completar el cuadro con los espesores seleccionados para cada fuente y el número de cuentas obtenido.

Espesor [mm]	Numero de cuentas

3. Calcular el coeficiente de atenuación μ haciendo uso de la ecuación 3 para cada fuente con los blindajes seleccionados.

4. Graficar las curvas de la intensidad en función del espesor del blindaje

5. ¿Qué conclusiones puede obtener en base a los coeficientes obtenidos?

6. Ejemplo

En la figura 9 se reproduce el espectro para la fuente de Cs-137. Alrededor de la energía 662 KeV se observa el pico de radiación y, a la izquierda de este, la radiación producida por el efecto Compton.

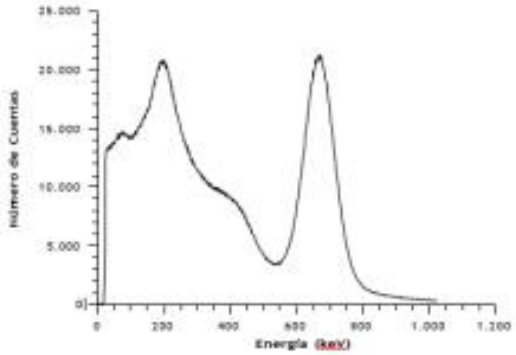


Figura 9. Espectro de Cs-137

Se utilizó el pico de 662 KeV para la determinación de los coeficientes de atenuación.

Se determina el coeficiente de atenuación lineal μ del Al, Fe y Pb. En las tablas siguientes, se muestra la cantidad de cuentas obtenidas al cabo de 400 segundos, alrededor del pico de 662 Kev correspondiente al Cs-137, para los distintos materiales al variar el espesor de los mismos.

Espesor ± 0.05 [mm]	Número de cuentas ± 300
0	34400
2,00	33200
4,00	32700
6,00	30800
8,00	30700
10,00	29800
12,00	28600

14,00	27800
16,00	26100
18,00	25400
20,00	24500

Tabla 1: Resultados obtenidos para el Aluminio

Espesor ± 0.05 [mm]	Número de cuentas ± 300
0	36400
1,10	34700
2,20	32300
3,30	30700
4,40	29300
6,40	28400
8,40	24500
10,40	23800

Tabla 2: Resultados obtenidos para el Hierro

Espesor ± 0.05 [mm]	Número de cuentas ± 300
0	35100
3,00	24900
6,00	18800
9,00	13600
12,00	11900
15,00	9200
19,80	5600
24,70	3300
30,30	2200

Tabla 3: Resultados obtenidos para el Plomo

Aplicando regresión lineal a estos valores y haciendo uso de ecuación 3 se obtiene el valor del coeficiente de atenuación lineal μ para cada material de blindaje.

Material	Coeficiente de atenuación lineal μ $[cm]^{-1}$	Incerteza $[cm]^{-1}$
Aluminio	0,169	0,006
Hierro	0,43	0,01
Plomo	0,93	0,01

Tabla 4: Coeficientes μ obtenidos para cada material

Con estos valores de μ, podemos graficar las curvas de la intensidad en función del espesor del blindaje, quedando de la siguiente manera:

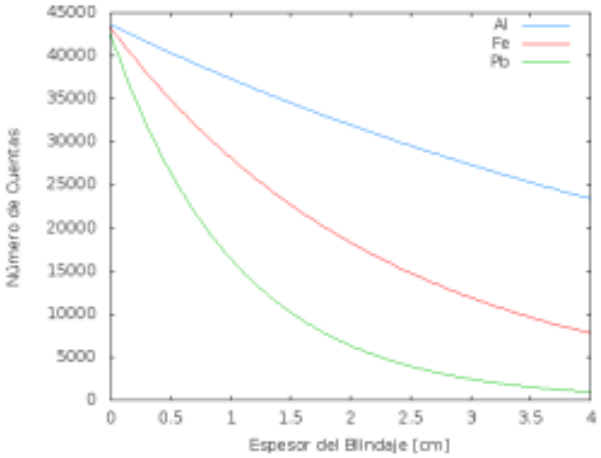


Figura 10. Nro de cuentas en función del espesor del blindaje para los distintos materiales

En la Figura 10 se observa que, de los materiales usados, el plomo es el mejor aislante de radiación gamma.

ANEXO B: VIDEO DE INICIO EN LA PANTALLA PRINCIPAL DEL LD

https://drive.google.com/file/d/1l_N9K_tNxA9tj27Q82fuCY4UE4s3WDzU/view?usp=drive_link



ANEXO C: ENCUESTA UXQ4RL VERSIÓN 1.0

User eXperience Questionnaire for Remote Laboratories (UXQ4RL) v. 1.0

Please answer this questionnaire having in mind your experience when using the remote laboratory. Circle your answer to each of the statements. DON'T WRITE YOUR NAME. The questionnaire is anonymous. Thanks!

Por favor, contesta el cuestionario pensando en tu experiencia usando el laboratorio remoto. Rodea tu respuesta para cada uno de los enunciados. NO ESCRIBAS TU NOMBRE. El cuestionario es anónimo. ¡Gracias!

	Strongly disagree ***Muy en desacuerdo***			**Neutral** ***Neutral***			**Strongly agree** ***Muy de acuerdo***
The remote lab is easy to use. ***El laboratorio remoto es fácil de usar.***	1	2	3	4	5	6	7
Using the remote lab feels like using a real lab. ***Usar el laboratorio remoto se parece a estar en un laboratorio real.***	1	2	3	4	5	6	7
My interactions with the remote lab seem real. ***Mis interacciones con el laboratorio remoto parecen reales.***	1	2	3	4	5	6	7
The remote lab helps me learn. ***El laboratorio remoto me ayuda a aprender.***	1	2	3	4	5	6	7
When working on the remote lab I concentrate on the assigned tasks. ***Cuando uso el laboratorio remoto, me concentro en las tareas encomendadas.***	1	2	3	4	5	6	7
I can predict the result of using each element in the remote lab interface. ***Puedo predecir el resultado que se obtiene al usar cada elemento de la interfaz del laboratorio remoto.***	1	2	3	4	5	6	7
The remote lab layout is sufficiently apparent so that help is not needed to use it. ***El diseño del laboratorio remoto es suficientemente intuitivo de forma que no se requiere ayuda para usarlo.***	1	2	3	4	5	6	7
The remote lab meets my requirements. ***El laboratorio remoto cumple con mis requisitos.***	1	2	3	4	5	6	7
The remote lab will help me pass the course. ***El laboratorio remoto me ayuda a aprobar.***	1	2	3	4	5	6	7
	Strongly disagree ***Muy en desacuerdo***			**Neutral** ***Neutral***			**Strongly agree** ***Muy de acuerdo***

Please add any comments on the reverse of the questionnaire.
Por favor, añade cualquier comentario en el reverso del cuestionario.

ANEXO D: ENCUESTA A DOCENTES

Las calificaciones van del 1 (Muy en desacuerdo) al 7 (Muy de acuerdo)

En qué nivel/es realiza Docencia

- ◯ Pregrado
- ◯ Grado
- ◯ Posgrado
- ◯ Otro: _____

El LR de espectrometría gamma es fácil de usar.

1 2 3 4 5 6 7

☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆

La interfaz del LR es intuitiva para docentes.

1 2 3 4 5 6 7

☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆

El LR reproduce adecuadamente la experiencia de un laboratorio de espectrometría gamma real.

1 2 3 4 5 6 7

☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆

Los datos experimentales que se obtienen son válidos para objetivos didácticos (análisis, interpretación)

1 2 3 4 5 6 7

☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆

El LR facilita la explicación de conceptos clave de espectrometría gamma a los estudiantes.

1 2 3 4 5 6 7

☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆

El LR contribuye a mejorar los resultados de aprendizaje de los estudiantes.

1 2 3 4 5 6 7

☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆

Puedo diseñar actividades prácticas que cumplan con los objetivos de la asignatura usando el LR

1 2 3 4 5 6 7

☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆

Recomendaría el LR para su uso en otras asignaturas relacionadas con física/ingeniería.

1 2 3 4 5 6 7

☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆

Por favor, añade cualquier comentario que creas necesario.

Tu respuesta

Enviar Borrar formulario