



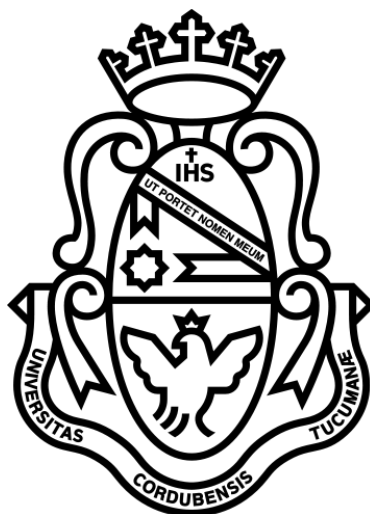
Universidad
Nacional
de Córdoba



FCM
Facultad de
Ciencias Médicas



Proyecto integrador: Dosímetro educativo de radiación simulada



Alumno:

Tomás Presman

Matrícula:

34989258

Asesor:

Lic. Chautemps, Adriana

Co-Asesor:

Ing. Rossi, Federico

Córdoba, año 2017

1 AGRADECIMIENTOS

A mis padres, mi hermana y compañeros por el apoyo.

A la UNC por el acceso a la educación de nivel medio y universitario.

A los Ing. Nicotra, Taborda y Malamud por la dedicación en la labor docente.

A la Lic. Adriana Chautemps, Ing. Laura Díaz y al personal del reactor RA-0 por su predisposición.

El objetivo de este simulador es modelar, mediante tecnologías inofensivas para la salud, la propagación espacial de la radiación gamma emitida por un radionucleido. Serán contemplados en el diseño del instrumento los modos de funcionamiento de monitores ambientales comerciales que miden: Dosis y Dosis acumulada, con alarmas lumínicas y sonoras.

El simulador utilizará sensores de ultrasonido para medir la distancia a la fuente radioactiva simulada, mediante algoritmos calculará y mostrará en una pantalla un valor teórico de dosis. El control remoto, que simulará la fuente radioactiva, permitirá cargar los datos sobre la actividad de diferentes radionucleidos y los posibles blindajes.

Palabras clave: Simulador educativo, Radiación gamma, Arduino.

ABSTRACT

The aim of this simulator is to model the spatial propagation of gamma radiation emitted by a radionuclide using technologies that are harmless to health. The modes of operation of commercial environmental monitors will be contemplated in the design: Accounts per second, Dose and Exposure, will also have light and sound alarms.

The simulator will use ultrasound sensors to measure the distance to the simulated radioactive source and through algorithms shows on a screen a theoretical value of CPS, dose and exposure. The remote control, which will simulate the radioactive source, will allow loading data on the activity of different radionuclides and possible shielding.

Key words: Educational Simulator, Gamma rays, Arduino.

3 ÍNDICE

1	Agradecimientos	- 1 -
2	Resumen	- 2 -
3	Índice	3
4	Introducción.....	5
5	Objetivos.....	6
5.1	Objetivo General del proyecto	6
5.2	Objetivos Específicos del simulador.....	6
6	Marco Teórico	7
6.1	Reseña histórica del reactor nuclear RA-0.....	7
6.2	Actividades desarrolladas por el RA-0 y el CUTeN.....	7
6.3	La Radioactividad	9
6.4	Las Radiaciones Electromagnéticas.....	9
6.5	Clasificación de las radiaciones ionizantes (RI)	10
6.6	Radiación gamma y su atenuación mediante blindajes.....	10
6.7	Dosimetría.....	11
6.8	Radiobiología y radioprotección.....	13
6.9	Medición de la radiación: Monitores, dosímetros y detectores	15
6.10	Simuladores de detección de radiación.....	16
6.11	Plataforma de hardware libre Arduino Uno.....	18
7	Metodología.....	20
7.1	Descripción del problema	20
7.2	Solución propuesta.....	21
7.3	Desarrollo matemático	21
7.4	Diagrama de Flujo de Funcionamiento.....	22
7.5	Materiales.....	23
7.6	Diseño esquemático	24
7.7	Descripción del código de programación.....	25
8	Resultados.....	27
8.1	Fotos del dispositivo y su funcionamiento.....	27
8.2	Ficha de características	28
8.3	Curva de Respuesta.....	29
8.4	Comparación con un dosímetro real y con el modelo aplicado	29
9	Análisis de Resultados y Comentarios de los docentes	32

10	Conclusión	34
11	Bibliografía y Referencias	35
12	Anexo.....	37
12.1	Código de programación.....	37
12.2	Datasheets del hardware utilizado	45

4 INTRODUCCIÓN

A partir de la Práctica Profesional Supervisada, realizada en el reactor nuclear RA-0 como parte del cursado de la carrera Ingeniería Biomédica, surge la propuesta del Centro Universitario de Tecnología Nuclear (CUTeN) de desarrollar un simulador de detección de radiaciones para demostraciones educativas y de entrenamiento.

El simulador debía reproducir una situación real de monitoreo de radiación gamma, sin comprometer la salud de profesionales y alumnos. Actualmente el CUTeN cuenta con software educativo para realizar simulaciones, pero resulta idóneo complementar la actividad virtual con un instrumento portátil.

Es importante aclarar que existe un marco normativo que regula el traslado y manipulación de radionucleidos. El mismo establece procedimientos de seguridad para realizar estas operaciones debido a la peligrosidad del material y la persona que lo manipula debe poseer un permiso otorgado por la Autoridad Regulatoria Nuclear. Este simulador permitiría evitar estos procedimientos y disponer del instrumento para prácticas en protección radiológica.

La primera etapa del proyecto comenzó con una revisión bibliográfica sobre las características de las radiaciones ionizantes. Y luego se realizó una investigación sobre los modelos matemáticos que describen sus comportamientos, entre otros aspectos a tener en cuenta para que el simulador resulte realista.

A continuación se hizo a un estudio de mercado sobre las opciones disponibles de estos productos y un análisis sobre tecnologías y métodos aplicables al proyecto. Las empresas líderes en el rubro son “Teletrix”, “Argon Technology”, “Military Systems”, “STS-safe training systems”.

Se clasificó a los dispositivos en dos grupos: las réplicas idénticas a detectores o dosímetros para entrenamiento en seguridad, uso civil o militar, y los que apuntan a modelar el comportamiento de la radioactividad para fines educativos.

Se utilizan actualmente diferentes tecnologías en estos dispositivos, las más frecuentes son: radiofrecuencia, medición de campo magnético, censado de concentración de gases y láser. Usualmente los aparatos cuentan con modos de funcionamiento análogos a los reales, midiendo: Dosis y Dosis acumulada, con alarmas lumínicas y sonoras. Otros simuladores emulan la contaminación radioactiva en diferentes materiales mediante el uso de gases ino- cuos.

A partir del estado del arte y teniendo en cuenta lograr una implementación abordable, se planteó el primer prototipo con un sensor de ultrasonido “US-HCR04” para medir la distancia a un objetivo (fuente radioactiva simulada) que mediante algoritmos calcula y exhiba un valor de dosis en una pantalla. Se garantizó que la distancia medida para realizar el cálculo de dosis, sea medida en dirección a la “fuente radioactiva” mediante una conexión de Infrarrojo (IR) “VS-1838”. El emisor IR (control remoto) proporciona además datos sobre diferentes radionucleidos y blindajes.

La base de la implementación fue la plaqueta programable multipropósito Arduino. Esta resulta ideal para este tipo de desarrollos por su versatilidad, robustez y precio. Fue

necesario realizar una capacitación para el uso de la misma, que permitió la integración de los sensores y periféricos con la programación (C++) al funcionamiento de la placa.

Por otra parte se utilizaron varios softwares: IDE de Arduino 1.6.8 para la programación en C++, ArguML para la generación de diagrama en bloques del funcionamiento y Fritzing 0.9.3 para el diseño de las conexiones esquemáticas.

Aprovechando la disponibilidad de un detector obsoleto, se realizó la soldadura de plaquetas, cableado y conexionado de los componentes dentro de la carcasa del mismo. Esto implicó modificaciones como: mecanizado de aluminio, plegado de chapa, corte laser en medium density fiberboard (mdf) y recubrimientos vinílicos.

La experiencia resultó un desafío sumamente enriquecedor desde diversos aspectos. En lo que se refiere a lo académico, requirió la integración de conocimientos de asignaturas como: Informática (C++), Electrónica Digital I y II, Transductores y Sensores, Física Biomédica, Medicina nuclear, Radiaciones No Ionizantes y Seguridad y Normalización en Instrumentación Biomédica. Además desde un punto de vista profesional fue una primera aproximación al trabajo interdisciplinario con Físicos, Ingenieros y Licenciados especialistas en Radioprotección.

5 OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO

Desarrollar un detector/monitor de radiación gamma simulada, que contemple blindajes, modos de operación realistas, que sea seguro y económico.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL SIMULADOR

- Representar la distribución espacial, según la inversa del cuadrado de la distancia, de la dosis efectiva en el aire dada por un radionucleido puntual y que admita la presencia teórica de blindajes.
- Desarrollar un dispositivo que permita familiarizar y capacitar a los futuros profesionales con la utilización de detectores, evitando la exposición a radiaciones.
- Diseñar un dispositivo portátil que permita realizar demostraciones o actividades educativas sobre el uso de un detector en cualquier ámbito, prescindiendo de las medidas de seguridad sobre el traslado de aparatos y fuentes radioactivas.
- Utilizar materiales económicos y accesibles en el mercado para poder replicar el desarrollo.

6 MARCO TEÓRICO

6.1 RESEÑA HISTÓRICA DEL REACTOR NUCLEAR RA-0

Finalizada la década del cincuenta y a instancias de la Empresa Provincial de Energía de Córdoba (EPEC), la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) inicia estudios de factibilidad para la instalación de una central nucleoelectrónica. Previendo la necesidad de formación de personal local en el área de reactores nucleares, la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) y la CNEA firman en 1969 un convenio por el cual el Reactor Nuclear RA-0 es trasladado a la capital de la provincia. Su finalidad es la formación de nuevos técnicos y profesionales en el área de la energía nuclear. Posteriormente, el plantel de operación aportado por EPEC es absorbido por la puesta en marcha de la Central Nuclear Embalse, por tal motivo, el RA-0 opera hasta fines de 1974. (Murúa y Morero, 2015).

En 1977 los gobiernos de las Repúblicas del Perú y Argentina firmaron un convenio por el cual la CNEA suministraría al Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) un Reactor de “potencia cero”. El núcleo del RA-0 formó parte entonces del RP-0, y se implementó un programa de capacitación para asegurar el aprovechamiento integral del mismo. El núcleo del RA-0 permaneció allí casi 11 años, retornando en 1990 a la UNC con el objetivo de experiencias docentes y científicas en el ámbito universitario.

En el año 2001 se dio comienzo al desarrollo de instrumentación destinado a instalaciones nucleares, enfocado a la experimentación. En ese marco se desarrolló un sistema electrónico de adquisición de datos (SEAD) que inicialmente fue instalado en el Reactor Nuclear RA-0 y posteriormente implementado con modificaciones en los reactores RA-1 (Centro Atómico Constituyentes), RA-3 (Centro Atómico Ezeiza) y RA-6 (Centro Atómico Bariloche). (Murúa y Morero, 2015).

En el 2004 comenzó el nuevo período de operación del Reactor en forma rutinaria y realizando entre otras, las siguientes tareas:

- Prácticos sobre Física de Reactores.
- Mediciones de parámetros físicos necesarias para el desarrollo de instrumentación para Reactores Experimentales y de Producción.
- Entrenamiento en Reactores para personal ingresante a la Central Nuclear Embalse.
- Irradiación de Muestras como semillas y hojuelas.

El 28 de mayo de 2013 se constituyó el Centro Universitario de Tecnología Nuclear (CUTeN) con el fin de canalizar las tareas de Producción de Bienes y Servicios relacionados con la Ciencia y la Tecnología Nuclear contando para ello con el Reactor Nuclear RA-0.

6.2 ACTIVIDADES DESARROLLADAS POR EL RA-0 Y EL CUTeN

Los grupos de trabajo del RA-0 desarrollan actividades de formación, capacitación e investigación relacionadas a los usos pacíficos de la energía nuclear. Algunas de las cuales se detallan a continuación:

- Proyecto de colaboración dentro del convenio de Práctica Profesional supervisada entre el Ministerio de Educación de la Provincia y la Facultad de Ciencia Exactas, Físicas

y Naturales de la UNC, para recibir a los alumnos y docentes con el fin de participar en el desarrollo propios de la instalación.

- Atención de visitas de colegios secundarios, dentro del programa de Alfabetización Científica y Tecnológica que lleva adelante el Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba.
 - Realización de actividades sobre Ciencia y Tecnología Itinerante dentro del convenio de cooperación académica entre la UNC y el Ministerio de Ciencia y Tecnología de la provincia de Córdoba.
 - Dictado de la asignatura Física Nuclear (teórico, práctico y laboratorios) en la materia Física III para las carreras de Ingeniería Electrónica y en Computación.
 - Prácticas de laboratorios con manejo de fuentes radiactivas en la materia Medicina Nuclear de la carrera de Ingeniería Biomédica.
 - Dictado de la materia Protección Radiológica y Seguridad en la carrera de Higiene y Seguridad en universidad privada. A distancia.
 - Dirección de prácticas supervisada y tesis de grado de varias carreras.
 - Organización y dictado de cursos a los ingresantes a la CNE, técnicos y profesionales. Las prácticas se realizan en el Reactor Nuclear RA-0 y consisten en operación del reactor y mediciones relacionadas.
 - Organización y dictado del Curso “Metodología y Aplicación de Radionucleidos” con asistencia de participantes profesionales de la salud. El mismo está aprobado por la ARN para tramitar los permisos individuales.
 - Organización y dictado clases sobre “Física nuclear y Protección Radiológica” para capacitar a personal que necesita rendir licencias y autorizaciones específicas.
 - Organización y dictado clases en cursos para el Departamento de Física, en el programa capacitación docente.
 - Dictado de Protección Radiológica en la maestría de Gestión Ambiental de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNC.
 - Se realizan investigaciones para la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNC.
 - Se realiza entrenamiento (prácticas sobre física de reactor) para técnicos y profesionales de la Central Nuclear Embalse.
 - Se realizan prácticas para alumnos de la materia Física III, dentro del módulo de Física Nuclear.
 - Se realizan simulacros de protección radiológica y trabajos de laboratorio utilizando los instrumentos de medición, como prácticas de los cursos de posgrado y extensión.
 - Se fundó el Centro Universitario de Tecnología Nuclear para incorporar actividades de capacitación y divulgación a la “Red Latinoamericana para la Educación y la Capacitación en Tecnología Nuclear”.
- (Murúa y Morero, 2015).

6.3 LA RADIOACTIVIDAD

El término radioactividad se refiere a aquellas emisiones espontáneas de energía por parte del núcleo de un átomo. Dichas transformaciones liberan energía en forma de radiación ionizante (fotones, electrones, etc.) y no ionizante (luz, calor, etc.). Este proceso se llama desintegración radiactiva y responde a leyes estadísticas, sus propiedades son independientes de cualquier influencia del entorno (presión, temperatura, campos eléctricos, etc.). La probabilidad de que ocurra la desintegración es propia del radionucleido considerado (Brosed, 2010).

Las desintegraciones (decaimientos) producidas por unidad de tiempo determinan la Actividad (A) de una muestra y como consecuencia de estas, el número de átomos radiactivos va disminuyendo en el tiempo. Su unidad es la inversa de tiempo, por ejemplo: segundo^{-1} y su comportamiento es exponencial. En función del tiempo y considerando una actividad “cero” (A_0) responde a la fórmula:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \text{ [Bq]}$$

La Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación (ICRU), en su Publicación N° 33, recomienda el uso del Becquerel (Bq) como unidad de actividad. Se define el Becquerel como una desintegración por segundo. Dado que 1 Bq es una cantidad muy pequeña de actividad es muy frecuente el uso de los múltiplos del mismo, por ejemplo: MBq, GBq, TBq, etc.

Los trabajos de P. Becquerel, M. Curie y E. Rutherford entre 1896 y 1907, demostraron no sólo la emisión espontánea de radiación, sino que existían diferentes tipos de radiaciones con distinto poder de penetración.

La Tabla 1 muestra algunas propiedades generales de los tipos de radiación emitida por núcleos radiactivos.

Radiación	Naturaleza	Penetración en aire	Penetración en sólidos
α	Núcleo de Helio	~cm	~ μm
β	Electrón	~m	~mm
γ	Fotones	~100m	~cm-m

Tabla 1: Naturaleza y penetración de la radiación

Resulta de gran importancia la caracterización de la penetración de las radiaciones ionizantes en la materia por dos motivos: primero porque cuando interactúa con la materia se produce una deposición de la energía del haz, y segundo porque las radiaciones ionizantes son nocivas para los sistemas biológicos.

6.4 LAS RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS

La radiación electromagnética es energía que se traslada por el espacio mediante dos campos, uno eléctrico y otro magnético, ambos variables y perpendiculares entre sí. Se desplaza a la velocidad de la luz y su generación y propagación responden al modelo matemático

planteado en 1873 por James Clerk Maxwell en “Treatise on Electricity and Magnetism” (Sears, 1999).

Existen múltiples fenómenos físicos relacionados con la radiación electromagnética, entre ellos la luz visible, las ondas de radio, las microondas, los rayos X y los rayos gamma. Estos eventos difieren entre sí en la longitud de onda (o su equivalente en frecuencia), en base a esto se los clasifica y ordena en el espectro electromagnético.

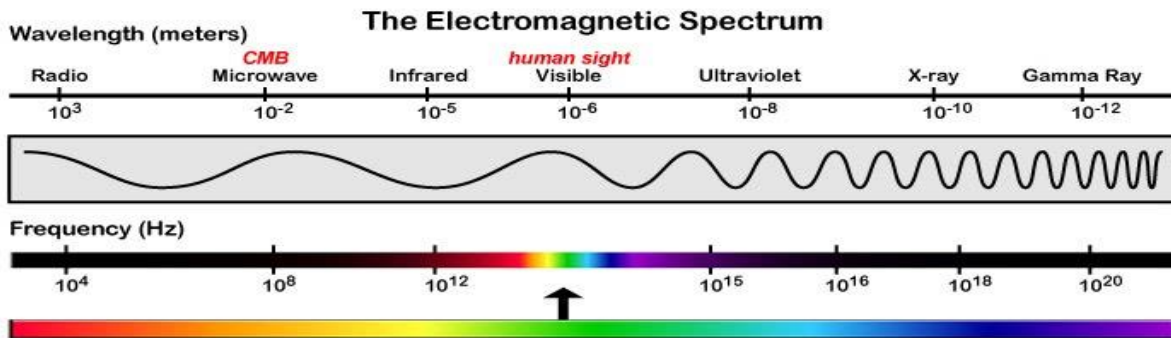


Figura 1 El espectro electromagnético

Las ondas electromagnéticas se pueden estudiar en función de su interacción con la materia, aquí se hace una gran distinción entre la radiación ionizante (RI) y la no ionizante (RNI) debido a sus efectos biológicos. La RI es aquella con energía suficiente para extraer un electrón ligado a un átomo y proviene de sustancias radiactivas o puede ser generada artificialmente.

6.5 CLASIFICACIÓN DE LAS RADIACIONES IONIZANTES (RI)

Las RI se clasifican atendiendo en primer lugar a la carga eléctrica de las partículas y luego en función de la masa de las mismas (Brosed, 2010):

- Radiación indirectamente ionizante (Neutras)
 - Fotones: X, γ
 - Neutrones
- Radiación directamente ionizante (Partículas cargadas)
 - Ligeras : $e^{+/-}$
 - Pesadas: iones (ej. He) y partículas exóticas (μ , π , etc.)

6.6 RADIACIÓN GAMMA Y SU ATENUACIÓN MEDIANTE BLINDAJES

Dentro de las radiaciones ionizantes emitidas por radionucleidos, los rayos gamma son los que pueden causar mayor daño celular debido a su gran poder de penetración. Se caracterizan por poseer una longitud de onda inferior a 10^{-19} m, frecuencias superiores a 10^{19} Hz y energías en el orden de los MeV. Se utilizan entre otras aplicaciones para: radiodiagnóstico, tratamientos oncológicos y como método de esterilización para equipos médicos y alimentos.

Para atenuar los rayos gamma se requiere gran cantidad de masa, es por ello que materiales de número atómico y densidad altos se utilizan para blindajes. A mayor energía de los rayos, el espesor del material para frenarlos debe ser superior. Los materiales utilizados para blindaje se clasifican según el espesor necesario para reducir la intensidad de los

rayos gamma a la mitad, espesor conocido como HVL (“half value layer”o capa de valor medio).

Al atravesar la materia, la radiación gamma interactúa con los átomos de tres maneras: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y creación de pares. Además, existe otro fenómeno que no ioniza la materia llamado dispersión coherente. La probabilidad de absorción en una capa de material está vinculado al grosor de dicha capa(x). Esto implica un decrecimiento exponencial de la intensidad de un fotón mono energético (I_0) de una fuente puntual e isotrópica según la fórmula:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu(h\nu, Z)x}$$

Siendo μ el coeficiente de atenuación lineal que depende del número atómico (Z) del material y de la energía del fotón ($h\nu$).

6.7 DOSIMETRÍA

Las magnitudes dosimétricas proporcionan una medida física relacionada con los efectos reales o potenciales de la radiación, estas son en esencia un producto de magnitudes radiométricas (número y energía de las partículas ionizantes) vinculadas a coeficientes de interacción de estos con la materia (Tomasz, 2000).

Las unidades más utilizadas en radioprotección incluyen la exposición “X”, medida en roentgen [R], la dosis absorbida “D” [Gy] o [rad], la dosis equivalente “H” [Sv] o [REM] y la dosis efectiva “E” [Sv] o [REM].

La exposición “X” cuantifica la capacidad que posee un haz de rayos para ionizar una masa de aire. Es muy utilizada porque resulta de sencilla medición, pero no ofrece información sobre el daño producido en el organismo, ya que no tiene en cuenta la radiosensibilidad de los tejidos. La tasa de exposición es una magnitud que determina la exposición por unidad de tiempo. En radiología, es usual medir la cantidad de mR/h detectados antes o después de un blindaje.

El kerma “K” en aire se define como la energía cinética en Joules transferida por los fotones incidentes a los electrones liberados por unidad de masa de aire ionizado. Su unidad según el Sistema Internacional (SI), es el Gray [J/kg]. Para una fuente radiactiva puntual que emite radiación gamma con una actividad “A”, la tasa de kerma en aire a una distancia “d”, viene dada por (Valente, 2016):

$$\dot{K}(d) = \frac{A \Gamma}{d^2}$$

Siendo Γ la constante de tasa de kerma en el aire, propio y característico de cada radionucleido.

El Código de práctica de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) aclara que hay dificultades experimentales para determinar la dosis en aire, especialmente en la proximidad de una interfaz entre dos medios distintos y que en realidad lo que muestran los equipos de dosimetría no es la energía de la radiación absorbida por el aire, sino la energía transferida por la radiación a las partículas cargadas resultantes de la ionización. Por estas razones el Código de práctica de la OIEA y el informe nº 74 de la Comisión Internacional

de Unidades Radiológicas (ICRU) recomiendan utilizar el kerma en aire en lugar de la dosis absorbida en aire.

La dosis absorbida “D” es una magnitud que expresa la cantidad de energía absorbida por unidad de masa de un material. Es una magnitud genérica definida para cualquier tipo de radiación ionizante y material, pero se utiliza en radiobiología para estimar el daño producido por la radiación en un órgano. Se puede encontrar una descripción más detallada en el Informe n° 74 de la ICRU y en la publicación n° 457 de los informes técnicos de la OIEA. Su unidad es el Gy, pero si se desea convertir un valor de exposición en dosis absorbida, deben utilizarse factores de conversión que dependen del material.

La magnitud conocida como dosis equivalente “H” introduce factores que ponderan estos efectos biológicos en función del tipo de radiación, entonces la dosis equivalente se define como el producto entre uno de estos factores de ponderación y la dosis absorbida. Según el SI, su unidad es el Sievert (Sv), diferenciándolo de las dosis absorbidas con el fin de indicar la consideración de daño biológico. La dosis equivalente es un indicador primario de protección radiológica, ya que especifica los límites de radiación para los trabajadores expuestos. (Andiscoa, 2014). La dosis equivalente se calcula según la fórmula:

$$H_T = W_r D$$

Tipo de Radiación	Factor (W_r)
Fotones	1
Electrones y Muones	1
Neutrones (entre 10 y 20 MeV)	Desde 5 hasta 20
Protones (de más de 2 MeV)	5
Partículas α y núcleos pesados	20

Tabla 2: factores de ponderación de la radiación

La dosis efectiva “E” es una magnitud definida en la publicación n° 60 de la Comisión Internacional de Radio Protección (ICRP) como la suma ponderada de las dosis equivalentes a todos los tejidos y órganos. Su unidad es el Sievert (Sv) y su finalidad es indicar la combinación de dosis en diferentes tejidos de manera que sea posible la correlación con el total de los efectos estocásticos. Esto resulta aplicable aunque la distribución de la dosis absorbida por el cuerpo humano no sea homogénea.

$$E = \sum W_T H_T$$

Tejidos	W_T
Gónadas	0.20
Pulmón	0.12
Médula Ósea	0.12
Vejiga	0.05
Piel	0.01
Estómago	0.12

Tabla 3: Ejemplos de factores de ponderación en tejidos

Esquema de la relación entre las dosis y el cuerpo humano:

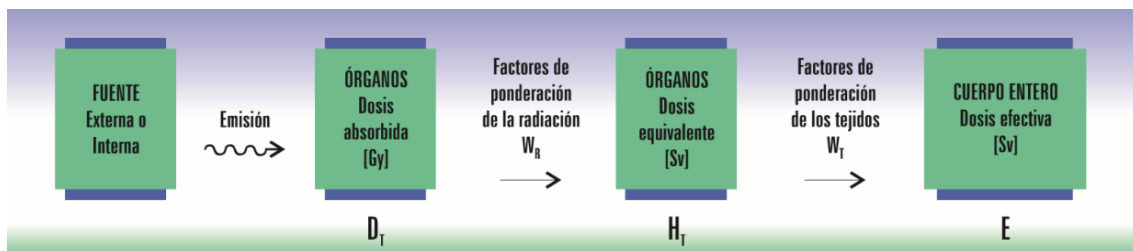


Figure 2 Relación entre la dosis y el cuerpo humano

6.8 RADIOBIOLOGÍA Y RADIOPROTECCIÓN

La radiobiología es el área de conocimientos que estudia las alteraciones y reparaciones de un organismo debido a las radiaciones ionizantes. Estas producen ionización de las moléculas ocasionando efectos denominados directos. La absorción energética, al ser los organismos medios acuosos, genera radicales libres que dan lugar a daños secundarios, llamados indirectos.

La proporción de células sobrevivientes en un sistema biológico disminuye a medida que aumenta la dosis absorbida, pero la respuesta biológica está condicionada por otros factores: el tipo de tejido irradiado, la concentración de oxígeno, la tasa de dosis, el fraccionamiento de la dosis y la calidad de la radiación. (Podgorsak 2005)

Al producirse daños celulares y no repararse adecuadamente, existe el riesgo de que ocurran diversas consecuencias: que las células afectadas mueran, que se vea impedida su reproducción, o bien que se origine una célula viable pero modificada. Todas estas con diferentes implicancias para el organismo.

Si el número de células muertas es lo suficientemente elevado se producirá un daño susceptible de ser observado como una pérdida de funcionalidad de un tejido u órgano, este tipo de efectos se denominan determinísticos. La ocurrencia de tales daños será baja a dosis pequeñas, pero por encima de un determinado umbral aumentan rápidamente. (Tomasz, 2010)

Dosis	Efecto biológico
0-0.25 Gy	Sin manifestaciones clínicas.
0.25-1 Gy	Nauseas, Disminución de linfocitos y plaquetas.
1-2 Gy	Vómitos, alteraciones en el hematocrito.
2-4 Gy	Daño moderado a la función hematopoyética.
4-6 Gy	Deterioro grave de la función hematopoyética, hemorragias internas, daño mortal en 50% de los casos.
6-10 Gy	Vómitos, insuficiencia hematopoyética, daño mortal en 80% de los casos.
>10 Gy	Daño gastrointestinal, neurológico y cardiovascular, mortal en el 100% de los casos.

Tabla 4- Efectos determinísticos por sobreexposición en todo el cuerpo

El resultado será diferente si en vez de producirse la muerte de las células irradiadas, éstas sobreviven con una alteración en su genoma. Este tipo de efectos se denominan estocásticos y son de naturaleza aleatoria o estadística. Si la transformación se produce en células germinales el efecto se expresará en la descendencia del organismo expuesto. Este

tipo de efecto estocástico se denomina hereditario. Si en cambio son células somáticas podría dar lugar, luego de un período de latencia a la inducción de un cáncer.

En el año 1990, la ICRP propuso recomendaciones basadas en la revisión de los resultados del estudio epidemiológico en los sobrevivientes a las explosiones atómicas de Hiroshima y Nagasaki. Surgieron así los nuevos coeficientes de riesgo de cáncer radioinducido por unidad de dosis y los factores de ponderación de órganos y tejidos actualmente vigentes.

Tomando como hipótesis una exposición instantánea a 1 Sv de radiación de baja transferencia lineal de energía (LET), se utilizaron tres modelos de proyección de riesgo y se aplicaron a las tablas de vida de cinco poblaciones diferentes a fin de minimizar las variaciones demográficas. Finalmente se calculó un promedio de esos valores con un factor de corrección en un rango bajo de tasas de dosis, obteniendo los coeficientes actualmente recomendados:

- Público (0-90 años): $0,05 \text{ Sv}^{-1}$
- Trabajadores (18-65 años): $0,04 \text{ Sv}^{-1}$

Por otra parte los efectos hereditarios surgen como consecuencia de un daño genético. Estos ocurren debido a mutaciones en la estructura o en la regulación de los genes de las células germinales.

Las mutaciones inducidas son similares a las espontáneas, de manera que no es posible asegurar sobre una mutación en particular, si es inducida o espontánea y no existe un umbral por debajo del cual no haya inducción de mutaciones. La ocurrencia frecuentemente depende de la tasa de dosis y por lo tanto del período de tiempo durante el cual las células germinales son irradiadas. Los coeficientes de riesgo hereditario estimado en la publicación n° 60 de la ICRP son:

- Público (0-90 años): $0,01 \text{ Sv}^{-1}$
- Trabajadores(18-65 años): $0,006 \text{ Sv}^{-1}$

Demostrada la peligrosidad y el daño que genera la radiación en las células, resulta fundamental reducir los efectos negativos y factores de riesgo, para poder aprovechar los beneficios del uso de las radiaciones ionizantes: médico, tecnológico, energético e industrial. El objetivo de la radioprotección es preservar al individuo, su descendencia y población en general de los riesgos por la utilización de material o equipos que producen radiación ionizante. Los criterios básicos incluyen mantener un nivel de dosis inferior al umbral para efectos determinísticos e intentar reducir al mínimo los efectos estocásticos. Los tipos de exposición a RI:

- Ocupacional: por la actividad laboral.
- Médica: por diagnóstico o tratamiento.
- Pública: todas las demás.

También se considera si la circunstancia es práctica (voluntaria o conocida) o si es una intervención (accidentes o fuentes naturales), en ambos se tienen en cuenta diferentes criterios.

Ningún tipo de práctica debe ser llevada a cabo si no existen evidencias de que la misma conlleva beneficios para los individuos o la sociedad. La exposición tanto en dosis como en cantidad de personas involucradas debe ser optimizada según el criterio “ALARA”(As Low As Reasonably Possible – tan bajo como sea razonablemente alcanzable).

Se utilizan tres principios vinculados a las características de la radiación:

1. Minimizar el tiempo de exposición: De esta manera se evita incrementar la dosis acumulada.
2. Aumentar la distancia a la fuente: La dosis disminuirá al aumentar la distancia por la absorción en el aire.
3. Maximizar el blindaje: Si no fuese posible tomar las precauciones 1 y 2, será indispensable interponer un blindaje entre la fuente y la persona para atenuar la radiación incidente.

Los límites admisibles de dosis para las personas están explicitados y detallados en la norma AR 10.1.1. “Norma básica de seguridad radiológica”, en ella se expresan los siguientes valores:

- Ocupacional:
 - Dosis efectiva máxima: 50 mSv/año siempre que se cumpla como máximo 100 mSv en 5 años.
 - Dosis equivalente máxima: 150 mSv/año para el cristalino y 500 mSv/año para la piel.
- Pública:
 - Dosis efectiva máxima: 5 mSv en 5 años.
 - Dosis equivalente máxima: 15 mSv/año en el cristalino y 50 mSv/año para la piel.
- Médica: Al ser una circunstancia diferente por comprometer la salud del paciente con un potencial beneficio, la ICRP en su publicación n°60 recomienda optimizar al máximo la dosis pero no establece límites.

6.9 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN: MONITORES, DOSÍMETROS Y DETECTORES

La radiación no es perceptible por los sentidos por lo que es necesario valerse de instrumentos apropiados para detectarla. Además resulta de interés en ciertas circunstancias poder caracterizar su intensidad, energía, y otras propiedades que ayuden a evaluar los posibles efectos sobre materiales, organismos o el medio ambiente.

El diseño de los detectores está basado en el conocimiento de la interacción de la radiación con la materia. Las radiaciones depositan energía en los materiales, principalmente a través de la ionización y excitación de los átomos o moléculas que lo componen, puede haber además emisión de luz, cambios de temperatura o efectos químicos, que indican la presencia de radiación.

Cada clase de detector es sensible a cierto tipo de radiación en cierto intervalo de energía. Resulta de primordial importancia seleccionar el detector adecuado al tipo y características de la radiación que se desea medir.

Los detectores gaseosos han sido usados por más de 50 años, a pesar de que hay diversos tipos, sus propiedades fundamentales son similares. Estos detectores constan de un gas encerrado en un recipiente de paredes tan delgadas como sea posible para que no atenúen la radiación incidente (Knoll 2009).

Los más utilizados son cilindros metálicos que contienen un gas con un alambre central, entre el alambre y las paredes del cilindro se aplica un voltaje alto y positivo, de esta manera el alambre actúa como ánodo y el cilindro como cátodo. Estos dispositivos operan sobre el principio de que la energía de la radiación incidente produce pares iónicos en el gas y la carga es colectada mediante la aplicación de una diferencia de potencial a través del gas. La diferencia de potencial aplicada hace que los electrones se muevan hacia el ánodo y los iones positivos hacia el cátodo, evitándose así la recombinación. La corriente eléctrica generada da lugar a pulsos que son contados como eventos, o activan un medidor de corriente que es la entrada de un amplificador.

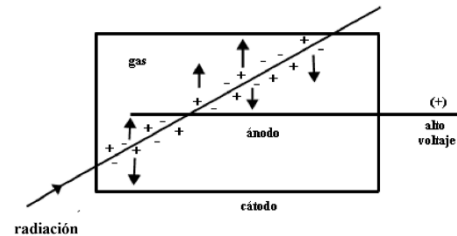


Figura 3 Esquema de funcionamiento de un detector

Estos principios de detección y medición son utilizados en instrumentos llamados monitores de radiación, muy difundidos en todas las áreas de trabajo con radiaciones ionizantes para la protección radiológica de los trabajadores y del público.

Los valores de tasa equivalente de dosis ambiental medidos habitualmente por los monitores están en el rango $\mu\text{Sv/h}$ a mSv/h . Cabe señalar que la denominación de monitor implica el predominio de la noción de vigilancia por encima de la fiabilidad de sus estimaciones. Se utilizan en diversas circunstancias, entre ellas:

- La vigilancia radiológica de las áreas de trabajo, en las que exista riesgo de operar en campos de radiación ionizante, por ejemplo para evaluar blindajes estructurales.
- Medir niveles de radiación alrededor de equipos de radioterapia y contenedores de fuentes.
- En zonas vigiladas como estimadores de las dosis efectivas y de las dosis equivalentes en órganos recibidas por los trabajadores.

6.10 SIMULADORES DE DETECCIÓN DE RADIACIÓN

La simulación de eventos brinda la oportunidad de tomar decisiones en escenarios reales, cometer equivocaciones sin riesgo de provocar un accidente, entrenar frente al uso de radiaciones, aplicar los conocimientos teóricos y arribar a conclusiones certeras (Chautemps, Odetto y Keil, 2015).

Surgen por varios motivos en la práctica profesional y la enseñanza, inconvenientes a la hora de entrenar o hacer demostraciones fuera de los establecimientos habilitados para manipular materiales o equipos radioactivos.

En un primer lugar cuando un monitor, dosímetro o detector es operado por una persona efectuando mediciones sobre radiación ionizante en cierto espacio, los sujetos presentes estarán siendo expuestos a recibir cierta dosis

En segundo lugar existen requerimientos y procedimientos especificados en la norma AR 10.16.1 “Transporte de materiales radioactivos”, que establecen una serie de medidas de seguridad para trasladar una fuente radioactiva. Esta norma aprobada por Resolución del Directorio de la Autoridad Regulatoria Nuclear, dicta principios fundamentales acordes a lo planteado por múltiples organismos entre ellos: La Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE (AEN), la Euratom, la FAO, la OIT y la OMS. Estas indicaciones se remiten y complementan con el “Manual explicativo para la aplicación del Reglamento para transporte seguro de materiales radiactivos” de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Algunos de los elementos contemplados en la norma establecen la obligatoriedad de: contar con un sistema de gestión acorde a normas internacionales, clasificar y etiquetar la fuente dentro de su embalaje (secc. IV), elaborar y aplicar controles y documentos para el transporte (secc. V), entre otras tareas.

Por último cabe mencionar el elevado costo de los instrumentos de medición y detección, que al momento de ser manipulados por el público pueden sufrir daños producto de la inexperiencia de los operadores y la fragilidad de los aparatos.

Actualmente existen fuentes y detectores simulados que brindan la posibilidad de capacitar o entrenar sin perjuicios para las personas o los artefactos reales y además evitar el trabajo de cumplir con el marco normativo. Se puede aplicar a ellos una división entre los genéricos o educativos que apuntan a ámbitos de enseñanza, y las réplicas exactas de algún dispositivo comercial particular, estos son desarrollados como una herramienta de formación profesional para las personas que deban utilizarlos luego en situaciones reales.

A continuación se describen algunos modelos de los monitores de radiación gamma simulados comerciales disponibles actualmente en el mercado.

RADSIM SS2

- Fabricante: Argon Electronics, Luton, Bedfordshire, Reino Unido.
- Tecnología: Ultrasonido y bluetooth
- Accesorios: 2 Fuentes simuladas isotrópicas
- Funciones:
 - Dosis
 - Cuentas por segundo
 - Alarma de dosis acumulada
 - Almacenamiento de datos mediante Bluetooth a un Smartphone
- Características:
 - Uso complementario con simuladores de contaminación química y biológica provistos por el mismo fabricante.
 - Batería de 5 hs integrada recargable.
 - Rango de uso 30m. (ideal uso en exteriores)
- Limitaciones:
 - No admite blindajes
- Precio: USD:\$6380



Figure 4 RADSIM SS2

STS 6150AD / RAM GENE / SURVEY SAFE

El fabricante provee tres diseños exteriores diferentes idénticos a los comerciales, todos con idénticas prestaciones.

- Fabricante: Safe Training Systems, Billingbear, Reino Unido.
- Tecnología: Radiofrecuencia
- No incluye accesorios, ni fuente simulada.
- Funciones:
 - Dosis
 - Alarma sonora
- Características:
 - Simulación del blindaje por atenuación de RF.
 - Admite varias fuentes simultáneas
 - Alimentación con 3 baterías 1,5v “AAA”
- Limitaciones:
 - No provee conectividad con otro dispositivo
- Precio: USD:\$5185+\$1860 (fuente simulada) = USD \$7045



Figure 5 STS 6150AD / RAM GENE / SURVEY SAFE

6.11 PLATAFORMA DE HARDWARE LIBRE ARDUINO UNO

Arduino Uno es una plaqueta programable multipropósito con un microcontrolador basado en el ATmega328P. Tiene 14 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reinicio.

Integra en su diseño todo lo necesario para soportar el microcontrolador, además posee un puerto de conexión USB desde donde se puede alimentar la placa y establecer comunicación con el computador.

El software consiste en un entorno de desarrollo (IDE) basado en el entorno de procesamiento con lenguaje de programación C++, así como en el cargador de arranque es ejecutado en la placa. El microcontrolador de la placa se programa mediante la conexión a una computadora, usando una comunicación serial con un convertidor de niveles RS-232 a TTL serial. (Arduino 2016).



Figure 6 Arduino Uno

7 METODOLOGÍA

7.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las radiaciones ionizantes interactúan con la materia transfiriendo su energía y existen numerosos factores que influyen durante el proceso.

El valor de Dosis o Kerma en el aire a cierta distancia de una fuente dependerá de: la energía del haz incidente, geometría del emisor, tipo y calidad de la radiación, espesor y geometría del blindaje, número atómico del material que atraviesa, distancia a la fuente, colimación y generación de radiación secundaria. Entre otros factores particulares de cada situación.

Surge a partir de estas consideraciones, la necesidad de simplificar el modelado de la distribución espacial de la tasa de Dosis eligiendo un conjunto de fórmulas que permitan estimarla de manera práctica, contemplando la modificación de algunas variables principales y fijando otras como constantes.

La situación a simular estará dada por la presencia un radionucleido puntual emisor de radiación gamma caracterizada por su constante de Kerma en el aire Γ . La Actividad de la muestra se considerará constante, suponiendo que la duración de la simulación será despreciable frente al tiempo de vida de la misma.

El blindaje se supondrá homogéneo y la radiación secundaria generada será colimada de modo que sobre este incidirá un haz plano monoenergético, que luego llegará al detector. Eliminando la radiación secundaria. Los Radionucleidos a simular serán: Cobalto 57, Cesio 137, Iodo 131, Y los blindajes serán: Plomo, y Hormigón.

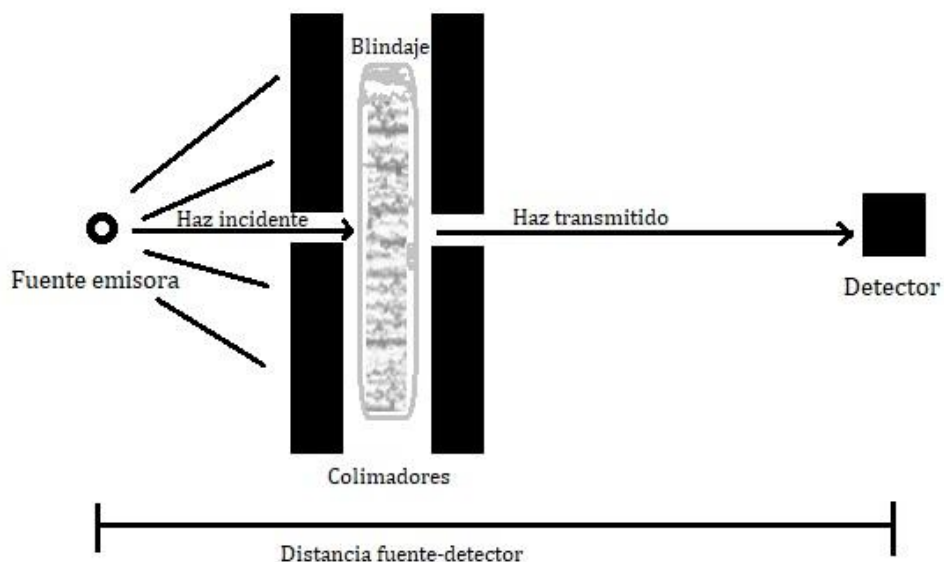


Figure 7: Esquema de la simulación

7.2 SOLUCIÓN PROPUESTA

En base a los objetivos propuestos, los conocimientos adquiridos durante el cursado de la carrera y las tecnologías disponibles, se decidió implementar como fuente simulada un control remoto infrarrojo genérico, y como detector un instrumento basado en la electrónica de Arduino. Este último controla un receptor infrarrojo que decodifica los comandos y un sensor de distancia por ultrasonido. El montaje del hardware está situado dentro de la carcasa de un dosímetro obsoleto.

La fuente emisora simulada (control remoto) se utiliza con dos finalidades:

1. Programar los parámetros de la simulación:
 - a. Selección del Radionucleido
 - b. Selección de Blindaje
2. Determinar la duración de la simulación.

Por otro lado el detector ejecuta cuatro tareas:

1. Confirmar los comandos recibidos.
2. Mostrar el valor de tasa de dosis y dosis total de la simulación en una pantalla.
3. Advertir la modificación de la tasa de dosis mediante un indicador visual tipo vómetro.
4. Emitir una alarma sonora de frecuencia proporcional a la dosis

7.3 DESARROLLO MATEMÁTICO

Para el cálculo de la Dosis o Kerma en el aire a cierta distancia “d” de la fuente monoenergética de radiación gamma, sin interposición de blindaje se utiliza la fórmula:

$$H \approx \dot{K}(d) = \frac{A \Gamma}{d^2}$$

Los valores de Γ son propios de cada radionucleido y están cargados en la programación de la plaqueta. La Actividad estará fijada para cada elemento y la distancia será medida por el sensor de ultrasonido del dispositivo.

En el caso de incluir blindajes en la simulación, el tipo (μ) y espesor (x) del mismo, serán seleccionados por el usuario. Y la ecuación utilizada para el cálculo será:

$$H_{blind} = H e^{-\mu x}$$

$$H_{blind} \approx \frac{A \Gamma}{d^2} e^{-\mu x}$$

7.4 DIAGRAMA DE FLUJO DE FUNCIONAMIENTO

Para la programación placa Arduino Uno utilizada como base del desarrollo electrónico del detector, fue necesario plantear un diagrama de flujo de las tareas que debía realizar. Dicho diagrama se presenta a continuación.

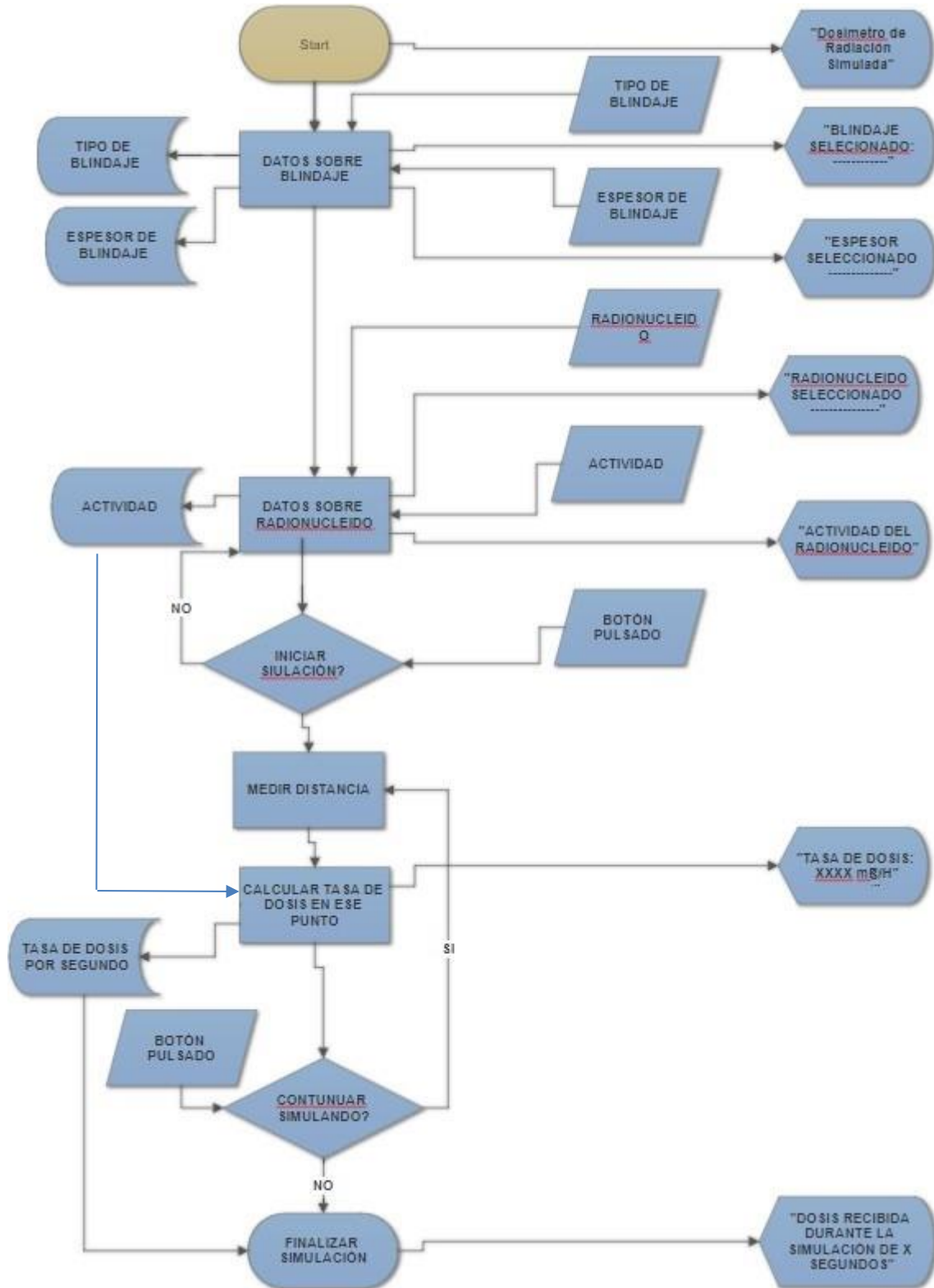
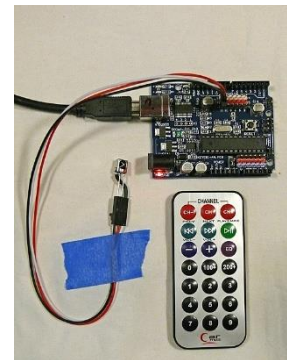


Figure 8 Diagrama de Flujo

7.5 MATERIALES

Para el ensamblado del instrumento se utilizaron los siguientes componentes electrónicos:

- 1 Arduino UNO R3
- 1 Display LCD 16x2
- 1 Sensor Ultrasónico HC-SR04
- 1 Sensor Infrarrojo VS-1808B
- Cables Jumper Dupont Macho-Hembra y Hembra-Hembra
- 1 Cable USB genérico para Arduino
- 1 Control remoto IR genérico
- 26 Pines macho
- 18 Pines hembra
- 1 Potenciómetro 10k
- 7 Leds
- 7 Resistencias 1k
- 1 Buzzer
- 1 Llave de dos posiciones
- 1 Plaqueta multipropósito
- 1 Power Bank de 2000 mA



Costo total de los materiales fue de \$1865 (u\$d 145).

Las herramientas necesarias para el montaje y prueba fueron las siguientes:

- Osciloscopio
- Generador de señales
- Protoboard
- Soldador
- PC
- Fresadora
- Torno manual

Y el software utilizado para el diseño y programación de la plaqueta arduino:

- IDE Arduino: Para la programación de la plaqueta
- Fritzing: para el diseño esquemático y la simulación

El software Fritzing contempla la opción de generar una placa PCB (*printed circuit board*), sin embargo, ante la necesidad de distribuir los componentes dentro de una carcasa de un detector real, esta opción no resultó práctica y se optó por el soldado y ensamblado en plaquetas multipropósito que permitan adaptar las conexiones y posiciones de los componentes.

Respecto del tiempo requerido se estima unas 300 horas, equivalentes a 2 meses de trabajo con una jornada de 8 horas. En función de los aranceles estipulados por el Colegio de Ingenieros Especialistas de Córdoba el monto ascendería a \$28.000. (CIEC, 2016).

7.6 DISEÑO ESQUEMÁTICO

Las conexiones esquemáticas de los componentes están representadas en la siguiente figura:

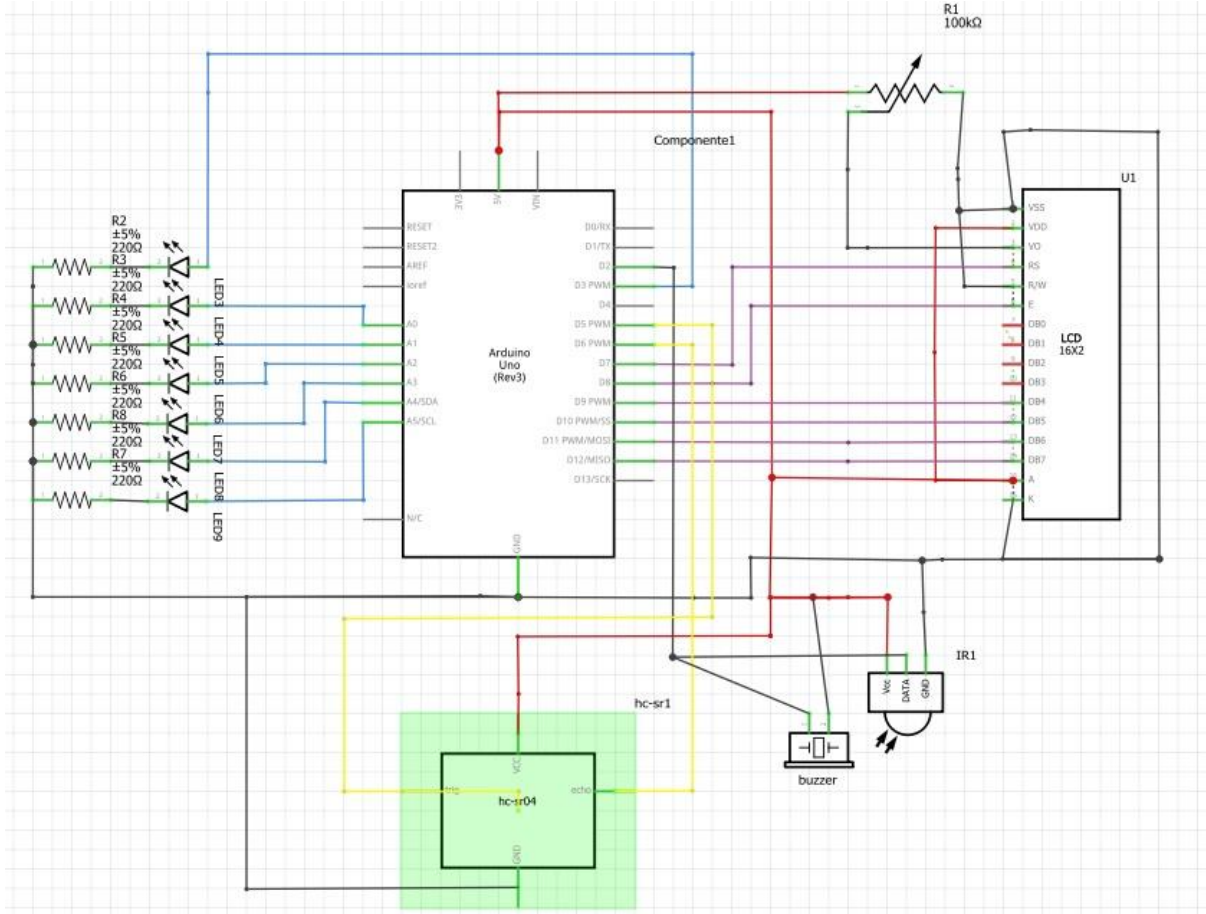


Figure 9 Conexiones esquemáticas

7.7 DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

El lenguaje de programación utilizado por Arduino está basado en C, y se escribe, compila y carga a la placa utilizando “Arduino IDE” (entorno de desarrollo) libre y gratuito.

Como detalla el diagrama de flujo, el funcionamiento general del simulador está compuesto por 4 bloques de instrucciones:

1. Recibir interrupción del control remoto y decodificar el comando para configurar la fuente, actividad, tipo y espesor de blindaje
2. Medir la distancia del detector a la fuente.
3. Mostrar en pantalla el valor teórico de dosis y encender el vúmetro
4. Finalizar la simulación y mostrar el valor de dosis total recibida en la pantalla

Las librerías para el funcionamiento de los periféricos fueron las siguientes:

```
#include <IRLremote.h> // Control IR
#include <LiquidCrystal.h> // Pantalla LCD
#include <Arduino.h> // Librería básica de Arduino
```

La decodificación de los comandos del control remoto (nucleído simulado) se realiza mediante un bucle “case”, que asigna una fuente, actividad, tipo de blindaje y espesor. Un ejemplo de esta sección es:

```
case 12495: //boton 1 - codigo Cobalto57 - sin blindaje
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Cobalto 57      ");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("A=10MBq G=1,3");
  delay(4000);
  Act = 10; //Mbq
  K=1;
  FactGam = 1,30; //Rxm2/hxCi
  break;
```

El sensor de ultrasonido fue programado por separado ya que la librería recomendada por el fabricante no resulto aplicable al desarrollo. La función de medición de distancia por ultrasonido fue:

```
Tmedicion=millis();//Tiempo del contador interno
diferencia=Tmedicion-Tinterrup;
float duracion, distancia;
digitalWrite(trigPin, LOW);//Disparo US
delayMicroseconds(2); // retraso
digitalWrite(trigPin, HIGH);
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(trigPin, LOW);
duracion = pulseIn(echoPin, HIGH);//tiempo de retorno
distancia = (duracion / 2) / 29.1/100;//calculo en metros
```

La función de cálculo de la dosis está dada por la siguiente línea

$$dosis = (Act * FactGam * K) / (distancia * distancia);$$

Notar que el cálculo del factor K que representa la atenuación por el blindaje está incluida en el bloque de decodificación de los comandos.

8 RESULTADOS

8.1 FOTOS DEL DISPOSITIVO Y SU FUNCIONAMIENTO



Al inicializar su funcionamiento el simulador se enciende y queda en modo espera hasta recibir un comando. Una vez seleccionado la opción desde el control remoto, el dosímetro muestra en la pantalla el radionucleido elegido, el blindaje, el espesor, la actividad y el factor gamma. (figura 9), luego de 4 segundos muestra el valor dosis instantánea en la pantalla y activa las luces y sonidos correspondientes a los umbrales de alerta. Por último al finalizar la simulación expresa el valor de la dosis recibida durante la simulación.

A continuación se presentan fotografías representativas del funcionamiento:



Figure 10: Etapas del funcionamiento del simulador

8.2 FICHA DE CARACTERÍSTICAS

Las características del simulador como instrumento de medición, resultaron coherentes con las esperadas respecto de lo especificado por los fabricantes de los sensores utilizados.

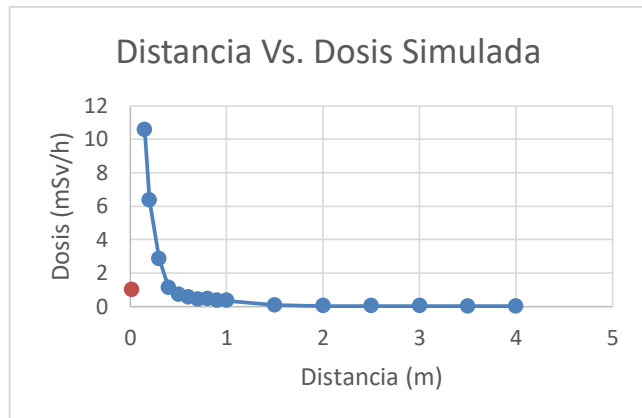
Parámetro	Valor		Unidad
	Min	Max	
Rango de Dosis	0,01	9999*	μSv/h- mSv/h (*máximo en función de los radionucleidos programados)
Rango de Distancia	1	400	cm
Resolución	0,1		μSv/h
Sensibilidad	0,1		μSv/h
Angulo de Medición	15		Grados
Tension de Trabajo	5		VDC
Autonomía	2		Horas
Tiempo de respuesta	0,3		Segundos
Cantidad de fuentes de ejemplo	3		-
Cantidad de Blindajes de ejemplo	2		-

Tabla 5 Ficha de características

8.3 CURVA DE RESPUESTA

Se registraron las mediciones obtenidas con el simulador, se cargaron los valores correspondientes al Iodo 131, con una actividad de 300 Mbq y un factor gamma de 0,06. Los resultados obtenidos fueron:

Distacia (m)	Valor obtenido (mSv/h)
4	0,01
3,5	0,02
3	0,03
2,5	0,03
2	0,04
1,5	0,08
1	0,36
0,9	0,36
0,8	0,45
0,7	0,42
0,6	0,55
0,5	0,7
0,4	1,12
0,3	2,85
0,2	6,35
0,15	10,56



Esta es la llamada curva característica del dispositivo, y conserva su forma a pesar de que sus valores de actividad y factor gamma varíen, modificará su amplitud en función de los datos programados a simular.

Table63 Valores de dosis en funcion de la distancia

8.4 COMPARACIÓN CON UN DOSÍMETRO REAL Y CON EL MODELO APLICADO

Las pruebas de funcionamiento se realizaron comparando con mediciones de dosis de fuentes reales, realizadas con un detector facilitado por el reactor nuclear RA-0, modelo: "FAG Radiameter FH 40B". El procedimiento realizado fue medir la dosis de tres fuentes radioactivas en función de la distancia, para luego conociendo su naturaleza y actividad, comparar los resultados con obtenidos mediante la simulación.

Las fuentes seleccionadas fueron.

- Na22 (ID:4989): Actividad al 31/5/17: 7.6 Kbbq $\Gamma = 0,5$ (R.m²/Ci.h)
- Co60 (ID:7606): Actividad al 31/5/17: 10 KBq $\Gamma = 1,3$ (R.m²/Ci.h)
- Cs137(ID:4804): Actividad al 31/5/17: 21 Kbbq $\Gamma = 0,324$ (R.m²/Ci.h)

Todas las fuentes poseen una vida media superior a los 5 años por lo que los valores de actividad fueron considerados adecuados, a pesar de haberse medido 6 meses previos a este ensayo. Este decaimiento puede ser tenido en cuenta en el análisis de resultados del error.

Los valores leídos por el dosímetro en tres intervalos de distancia para cada fuente, fueron comparados con valores teóricos esperados según el modelo utilizado. Notar que debió realizarse una conversión de unidades para realizar la comparación.

$$1\text{Ci}=37000000\text{Kbq}$$

Esto se expresa en la siguiente tabla:

Distancia	Dosis medida reales (mR/h)			Valores esperados por el modelo (mR/h)		
	Cs137	Co60	Na22	Cs137	Co60	Na22
m						
0,01	1,5	1	2	1,8389	3,5135	1,0270
0,1	0,25	0,15	0,2	0,0184	0,0351	0,0103
0,2	0,07	0,06	0,08	0,0046	0,0088	0,0026

Tabla 7 Valores medidos en ensayos de dosis vs Valores esperados

Al ser tan grande la discrepancia entre los valores medidos y el modelo matemático utilizado, la comparación del simulador se hizo contra el modelo matemático y no el detector real. Luego se convirtieron los valores de mR/h a uSv/h utilizando el factor de conversión de unidades igual a 9,33.

Distancia	Valores esperados por el modelo (mR/h)			Valores esperados por el modelo (uSv/h)		
	Cs137	Co60	Na22	Cs137	Co60	Na22
m						
0,01	1,8389	3,5135	1,0270	17,157	32,781	9,582
0,1	0,0184	0,0351	0,0103	0,172	0,328	0,096
0,2	0,0046	0,0088	0,0026	0,043	0,082	0,024

Tabla 8 Conversión de valores esperados por el modelo

Por último se reprogramó el simulador con los valores de Actividad y factor gamma de las fuentes reales y se efectuaron las mediciones el simulador. Se eliminó la medición a 1 cm por ser el tope del rango del sensor. La tabla comparativa de resultados es:

Distancia	Valores esperados por el modelo (uSv/h)			Valores medidos (uSv/h)		
	Cs137	Co60	Na22	Cs137	Co60	Na22
m						
0,1	0,17	0,33	0,10	0,14	0,36	0,12
0,2	0,04	0,08	0,02	0,05	0,08	0,03

Tabla 9 Comparación entre valores teóricos y mediciones del simulador

Luego se calculó el error medio y el relativo:

cm	Error total (uSv/h)			Error relativo (%)		
	Cs137	Co60	Na22	Cs137	Co60	Na22
10	0,03	-0,03	-0,02	18,40	-9,82	-25,23
20	-0,01	0,00	-0,01	-16,57	0,00	-25,23
					Error medio	-9,74

Tabla10 Valores de error del simulador

Considerando que el rango del dispositivo es de 4 m y los ensayos realizados hasta el momento fueron a muy corta distancia, calcularon los valores teóricos esperados para las mediciones realizadas para la curva característica y se los contrastó, calculando también el error.

Distacia (m)	Valor obtenido (mSv/h)	Valor teórico (mSv/h)	Error absoluto	Error relativo (%)
4	0,01	0,0	-0,0039	38,75
3,5	0,02	0,018	0,0019	9,39
3	0,03	0,025	0,0053	17,78
2,5	0,03	0,036	-0,0055	18,40
2	0,04	0,056	-0,0155	38,75
1,5	0,08	0,099	-0,0187	23,33
1	0,36	0,222	0,1380	38,33
0,9	0,36	0,274	0,0859	23,87
0,8	0,45	0,347	0,1031	22,92
0,7	0,42	0,453	-0,0331	7,87
0,6	0,55	0,617	-0,0667	12,12
0,5	0,7	0,888	-0,1880	26,86
0,4	1,12	1,388	-0,2675	23,88
0,3	2,85	2,467	0,3833	13,45
0,2	6,35	5,550	0,8000	12,60
0,15	10,56	9,867	0,6933	6,57
			Error Promedio	20,93

Tabla 11 Comparación de valores teóricos con valores obtenidos con el simulador



Ilustración 1 Gráfico de la comparación entre valores teóricos y los obtenidos por el simulador

9 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COMENTARIOS DE LOS DOCENTES

En lo que respecta al dispositivo y su funcionamiento, este posee limitaciones propias de la tecnología utilizada, elegida por su accesibilidad, robustez y precio, pero resignando rendimiento. Por ejemplo el sensor de ultrasonido, da lecturas erróneas con valores atípicos, esto sucede de manera aleatoria en función de la geometría del espacio donde se simule. Ello requirió un filtrado digital de estos valores, situación que genera que el valor de dosis instantánea se mantenga por más de un ciclo de programa, con la consecuencia de alterar el valor de dosis total recibida. El manejo de las interrupciones por hardware y por timer resulta también complejo de controlar adecuadamente, dada la arquitectura utilizada por Arduino.

Analizando las especificaciones técnicas de los sensores utilizados, estas se mantuvieron durante la implementación del proyecto, por lo que la curva característica y hoja de datos resultan cercanas a lo esperado.

Evaluando de la comparación con valores de un dosímetro real, los resultados no resultan concluyentes por diversos motivos:

En primer lugar, la disponibilidad de fuentes radioactivas fue un condicionante a los ensayos ya que el rango de distancia medido era pequeño producto de su poca actividad, la dosis era detectable no más allá de los 20 cm. Esto dificulta la comparación entre las curvas. Además el primer dato medido se encuentra en el tope de rango del sensor de distancia.

En segundo lugar el dispositivo a contrastar era analógico, la aguja oscilante dificultaba las lecturas y obligó a un muestreo en intervalos demasiado grandes para ese rango. Se considera que este fue uno de los factores determinantes que impidieron la comparación, sumado a que la radiación de fondo no fue tenida en cuenta durante el ensayo y puede haber afectado, dado que los valores de dosis son muy pequeños.

En tercer lugar el modelo utilizado en el simulador, de un haz mono energético colimado, posee diferencias con el comportamiento de una fuente isotrópica, debido a fenómenos que introducen variables al cálculo de dosis y no fueron tenidas en cuenta en el algoritmo del simulador. Además la fórmula de cálculo resulta precisa en ciertas condiciones de emisión y de posición del detector respecto de la fuente que no pudieron ser aplicadas debido a lo detallado anteriormente.

Por último la comparación entre los valores teóricos del modelo de cálculo de dosis propuesto y los obtenidos por el simulador tuvo resultados aceptables, considerando las tecnologías utilizadas.

Por su parte el plantel docentes del reactor RA-0, integrado por la Lic. Adriana Chau-temps, y los ingenieros: Carlos Murúa, Walter Keil, Mauricio Morero, Alejandro Di Benedetto y David Almaraz. Luego de realizar las pruebas de funcionamiento del dispositivo destacaron varios aspectos positivos del desarrollo.

Les resultó sumamente útil para el ejercicio educativo la flexibilidad y sencillez a la hora de reprogramar el dispositivo, tanto en las fuentes teóricas configuradas como en el algoritmo de cálculo de dosis.

Además recalcaron la importancia de las alarmas luminosas y sonoras para el entrenamiento, situación irreplicable en la realidad sin acarrear grandes riesgos.

Se mostraron conformes con la interfaz y el diseño general, consideraron de mucha utilidad en las demostraciones áulicas y en la realización de prácticos que relacionen dosis y blindaje.

Como aspectos a optimizar recomendaron que la carga de actividad de las fuentes y blindajes se realice de manera completa, es decir que se pueda seleccionar cualquier espesor y cualquier actividad. Hecho que está apto para aplicarse a la programación del dispositivo.

10 CONCLUSIÓN

Se puede concluir en que el objetivo fue logrado de manera satisfactoria, con un presupuesto adecuado a lo planteado y la posibilidad de replicar el desarrollo para contar con más dispositivos de entrenamiento. Fue sumamente enriquecedor el trabajo interdisciplinario por la integración de conocimientos de distintas áreas necesarios para la resolución del problema y la implementación del diseño.

Como propuesta a un segundo prototipo se sugiere mejorar la carga de datos, aprovechando más la botonera del control remoto. Posibilitando una carga individual de variables que haga más versátil el dispositivo. Además podría mejorarse el diseño de la carcasa utilizando impresión 3D.

Desde el punto de vista del algoritmo de cálculo de la dosis, se podría complejizar el modelo para tener en cuenta más variables, esto haría más realistas los valores obtenidos.

11 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- SEARS, ZEMANSKY, YOUNG, FREEDMAN. (1999). *Física Universitaria*. Vol. II. Ed Pearson.
- BROSED A. Et Al. (2010) *Fundamentos de Física Médica*. Sevilla, España: Universidad Internacional de Andalucía.
- TOMASZ E. Et Al. (2000). *Radio protección en las aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes*. Buenos Aires. Argentina: Autoridad Regulatoria Nuclear.
- MURUA C, MORERO M. (2015). *Diseño e implementación de la aplicación web RaXconsult*. XLII Reunión Anual Asociación Argentina de Tecnología Nuclear.
- ODETTO J, CHAUTEMPS A, KEIL W. (2015). *Implementación de instrumental simulado para prácticos de laboratorio* Revista de Enseñanza de la Física. Vol. 27, No. Extra, Nov. 2015, 157-163.
- KNOLL G. (2009). *Radiation detection and measurements*. Nueva York, Estados Unidos: John Willey and Sons.
- ANDISCOA B, BLANCO D, BUSSI A. *Dosimetría en Radiología*. Revista Argentina de Radiología, Vol. 78(2) Mar. 2014,114-117.
- VALENTE M. (2016) *Fundamentos de Física Médica*. CONICET y Universidad Nacional de Córdoba, Argentina: Curso de posgrado - pp. 1-191. Recuperado de http://www.famaf.unc.edu.ar/~valente/Documents/DidacticsMaterial/Notas_FundamentosdeFisicaMedica_2016.pdf
- PODGORSK E.B. (2005) *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*. Vienna, Austria: Comisión Internacional de Energía Atómica.
- ICRP (1991), Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Annals of the ICRP, 21, p.1.
- ICRU (1980), Radiation Quantities and Units. ICRU Report 33 (Bethesda MD: ICRU Press).
- ICRU (2005), Patient Dosimetry for X Rays used in Medical Imaging. ICRU Report 74 (ICRU Press).
- ICRP (2007). International Commission on Radiation Protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP 103; 37: 2-4
- IAEA (2007). Technical Reports Series N°. 457. Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice. Vienna.
- ARN (2016). Transporte de Materiales Radiactivos, Norma AR 10.16.1, Rev 3. Disponible en:http://www.arn.gob.ar/images/stories/que_hace_la_ARN/resena_de_actividades/marco_regulatorio/normas_regulatorias/10-16-1_R03.pdf
- ARN (2016). Evaluación del emplazamiento de reactores nucleares de potencia, Norma AR 10.1.1, Rev 2. Disponible en: http://www.arn.gob.ar/images/stories/que_hace_la_ARN/resena_de_actividades/marco_regulatorio/normas_regulatorias/10-10-1R0.pdf
- Arduino (2017). ARDUINO UNO REV3. Disponible en: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- CIEC (2016). Boletín de novedades. Resolución N° 19.11/15. Junta de Gobierno del Colegio de Ingenieros de la Provincia de Córdoba. Córdoba. Argentina.

12 ANEXO

12.1 CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

```

//Inicia la inclusion de librerias
#include <IRLremote.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include <Arduino.h>
LiquidCrystal lcd(7, 8, 9, 10, 11, 12);
//Finaliza inclusion de librerias

//Comienza la asignacion de variables
unsigned long Tinterrup = 0;//momento de la interrupción
const long intervalo = 1000;//tiempo de intervalo para verificar la señal
unsigned long Tmedicion = 0;//momento de la medición
unsigned long diferencia=0;
const int interruptIR = 0; // Arduino interrupcion
0: Pin 2
int trigPin = 5; // Elegimos el pin 5 para Trigger del Ultrasonido
int echoPin = 6; // Elegimos el pin 6 para Echo del Ultrasonido
float dosis;
float Act;
float k;
float DosisTot;
float FactGam;
volatile int tecla=0;
volatile int protocolo=0;
int pinzumbador = 4;
int frecuencia = 50;
//Finaliza la asignacion de variables

void setup()
{
  Serial.begin(115200); // Seteo velocidad del Serial
  lcd.begin(16, 2);// Configurar e inicializar las filas y columnas de la pantalla LCD
  lcd.clear();
  IRLbegin<IR_NEC>(interruptIR);// Interrupcion y lectura del dato IR de la fuente simulada

```

```

//Seteo sensor Ultrasonico
pinMode(trigPin, OUTPUT);
pinMode(echoPin, INPUT);

// Seteo de pines
pinMode(A0, OUTPUT);
pinMode(A1, OUTPUT);
pinMode(A2, OUTPUT);
pinMode(A3, OUTPUT);
pinMode(A4, OUTPUT);
pinMode(A5, OUTPUT);
pinMode(3, OUTPUT);
}

void loop()
{
  if (protocolo==3)
  {
    if (tecla!=-1)
    {
      switch (tecla)// tabla que asocia los
      botones del control IR con las fuentes seleccionadas
      {
        case 12495: //boton 1 - codigo Co-
        balto57 - sin blindaje
          lcd.setCursor(0, 0);
          lcd.print("Co57 S/Blindaje");
          lcd.setCursor(0, 1);
          lcd.print("Act=2GBq G=0.36");
          delay(4000);
          Act = 2; //Gbq
          k=1;
          FactGam = 0.36; //mSv . m2/ h . Gbq
          break;

        case 0x18E7: //boton 2 - codigo Co-
        balto57 - blindaje Plomo 2cm
          lcd.setCursor(0, 0);
          lcd.print("Co57 Plomo 2cm");
          lcd.setCursor(0, 1);
          lcd.print("A=2GBq G=0.36");
          delay(4000);
          Act = 2; //Gbq
          k=0.5;
          FactGam = 0.36; //mSv . m2/ h . Gbq
          break;
      }
    }
  }
}

```

```

        case 0x7A85: //boton 3 - codigo Co-
balto57 - blindaje Concreto 25cm
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("Co57 Concret25cm");
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print("A=2GBq    G=0.36");
            delay(4000);
            Act = 2; //Gbq
            k=0.18;
            FactGam = 0.36; //mSv . m2/ h . Gbq
            break;

        case 0x10EF: //boton 4 - codigo Sodio
22 - sin blindaje
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("Na22 S/Blindaje");
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print("Act=2GBq    G=0.09");
            delay(4000);
            Act = 2; //Gbq
            k=1;
            FactGam = 0.09; //mSv . m2/ h . Gbq
            break;

        case 0x38C7: //boton 5 - codigo Sodio
22 - blindaje Plomo 2cm
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("Na22 Plomo 2cm");
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print("Act=2GBq    G=0.09");
            delay(4000);
            Act = 2; //Gbq
            k=0.8;
            FactGam = 0.09; //mSv . m2/ h . Gbq
            break;

        case 0x5AA5: //boton 6 - codigo Sodio
22 - blindaje concreto 25cm
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("Na22 Concret25cm");
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print("Act=2GBq    G=0.09");
            delay(4000);
            Act = 2; //Gbq
            k=0.36;
            FactGam = 0.09; //mSv . m2/ h . Gbq

```



```

break;

case 0x42BD: //codigo Cesio137 - sin
blindaje
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Cs137 S/blindaje");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Act=2GBq G=0.32");
    delay(4000);
    Act = 2; //Gbq
    k=1;
    FactGam = 0.32; //mSv . m2/ h . Gbq
break;

case 0x4AB5: //codigo Cesio137 - blin-
daje Plomo 2cm
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Cs137 Plomo 2cm");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Act=2GBq G=0.32");
    delay(4000);
    Act = 2; //Gbq
    k=0.5;
    FactGam = 0.32; //mSv . m2/ h . Gbq
break;

case 0x52AD: //codigo Cesio137 - blin-
daje Aluminio 1 mm
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Cs137 S/blindaje");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Act=2GBq G=0.32");
    delay(4000);
    Act = 2; //Gbq
    k=0.05;
    FactGam = 0.32; //mSv . m2/ h . Gbq
break;
}
tecla=0;
protocolo=0;
}

else
{
    if (protocolo==3 && Act!=0)
    {

```

```

while (tecla== -1 && diferencia<inter-
valo)
{
  Tmedicion=millis();
  diferencia=Tmedicion-Tinterrup;
  float duracion, distancia;
  digitalWrite(trigPin, LOW); //dis-
  paro US y para calcular distancia en cm
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(trigPin, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  duracion = pulseIn(echoPin, HIGH);
  distancia = (duracion / 2) /
  29.1/100; //calcula distancia en metros
  if (distancia<4)
  {
    dosis = (Act*FactGam*k)/(dis-
tancia*distancia);
    Serial.println(Act);
    Serial.println(FactGam);
    Serial.println(k);
    Serial.println(distancia);
    Serial.println(dosis);
    if (dosis<1)
    {
      lcd.clear();
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print("A=");
      lcd.setCursor(2,0);
      lcd.print(Act);
      lcd.setCursor(10,0);
      lcd.print("G=");
      lcd.setCursor(12, 0);
      lcd.print(FactGam);
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print("D=");
      lcd.setCursor(2, 1);
      lcd.print(dosis*1000);
      lcd.setCursor(10,1);
      lcd.print("uSv/h");
      if (dosis > 0.1)
digitalWrite(3, HIGH);
      else
digitalWrite(3, LOW);
      if (dosis> 0.3)
digitalWrite(A0, HIGH);

```

```

        else
        digitalWrite(A0, LOW);
        if (dosis> 0.5)
        digitalWrite(A1, HIGH);
        else
        digitalWrite(A1, LOW);
        if (dosis > 0.8)
        digitalWrite(A2, HIGH);
        else
        {digitalWrite(A2, LOW);
        noTone(pinzumbador);}
        if (dosis> 1)
        {digitalWrite(A3, HIGH);
        tone(pinzumbador,frecuencia);}
        else
        digitalWrite(A3, LOW);
        if (dosis > 2)
        {digitalWrite(A4, HIGH);
        tone(pinzumbador,frecuencia*2);}
        else
        digitalWrite(A4, LOW);
        if (dosis > 3)
        {digitalWrite(A5, HIGH);
        tone(pinzumbador,frecuencia*4);}
        else
        digitalWrite(A5, LOW);
        DosisTot=DosisTot+(do-
sis*300000/3600000);
        delay(300);
    }

    else
    {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("A=");
        lcd.setCursor(2,0);
        lcd.print(Act);
        lcd.setCursor(10,0);
        lcd.print("G=");
        lcd.setCursor(12, 0);
        lcd.print(FactGam);
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("D=");
        lcd.setCursor(2, 1);
        lcd.print(dosis);
        lcd.setCursor(10,1);
    }

```

```

        lcd.print("mSv/h");

        if (dosis > 0.1) // led 1
digitalWrite(3, HIGH);
        else
digitalWrite(3, LOW);

        if (dosis> 0.3) // led 2
digitalWrite(A0, HIGH);
        else
digitalWrite(A0, LOW);

        if (dosis> 0.5) // led 3
digitalWrite(A1, HIGH);
        else
digitalWrite(A1, LOW);

        if (dosis > 0.8) // led 4
digitalWrite(A2, HIGH);
        else
        {digitalWrite(A2, LOW);
noTone (pinzumbador);}
        if (dosis> 1)
{digitalWrite(A3, HIGH);
tone (pinzumbador,frecuencia);}
        else
digitalWrite(A3, LOW);
        if (dosis > 2)
{digitalWrite(A4, HIGH);
tone (pinzumbador,frecuencia*2);}
        else
digitalWrite(A4, LOW);
        if (dosis > 3)
{digitalWrite(A5, HIGH);
tone (pinzumbador,frecuencia*4);}
        else
digitalWrite(A5, LOW);
        DosisTot=DosisTot+(do-
sis*300000/3600000);
        delay(300);}}}

tecla=0;
}
diferencia=0;
}
}

```

```

else
{
    if (DosisTot!=0)
    {
        noTone(pinzumbador);
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Dosis Recibida");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print(DosisTot);
        lcd.setCursor(12,1);
        lcd.print("uSv");
        digitalWrite(A0,LOW);
        digitalWrite(A1,LOW);
        digitalWrite(A2,LOW);
        digitalWrite(A3,LOW);
        digitalWrite(A4,LOW);
        digitalWrite(A5,LOW);
        delay (5000);
        DosisTot=0;
        Act = 0;
        k=0;
        FactGam = 0;
    }

    lcd.setCursor(0, 0);// Lo que muestra el
display cuando no esta leyendo datos del IR
    lcd.println("APUNTE HACIA LA ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.println("FUENTE SIMULADA ");
    digitalWrite(A0,LOW);
    digitalWrite(A1,LOW);
    digitalWrite(A2,LOW);
    digitalWrite(A3,LOW);
    digitalWrite(A4,LOW);
    digitalWrite(A5,LOW);
}

}

void IREvent(uint8_t protocol, uint16_t address,
uint32_t command)
{
    uint8_t sreg = SREG;
    tecla=command;
    protocolo=protocol;
    SREG = sreg;
    Tinterrup=millis();}

```

12.2 DATASHEETS DEL HARDWARE UTILIZADO

- Arduino Uno R3:
<http://www.wecl.com.hk/distribution/catalogs/058-31-0328.pdf>
- Sensor Ultrasónico HCSR04:
<http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf>
- Sensor Infrarrojo VS-1808B:
<https://arduino-info.wikispaces.com/file/view/IR-Receiver-AX-1838HS.pdf>
- Display 16x2:
<https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/ADM1602K-NSW-FBS-3.3v.pdf>