

UNSAM

UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

**“MONITOREO DE ÁREA REMOTO BASADO EN UNA
RED DE SENSORES”**

PROYECTO FINAL INTEGRADOR

CARRERA

INGENIERÍA NUCLEAR CON ORIENTACIÓN EN APLICACIONES

INSTITUTO DE TECNOLOGÍA NUCLEAR DAN BENINSON

ALUMNO: ALEX MÜLLER YANE

TUTOR: MG. LUCIO JOSÉ MARTINEZ GARBINO

COTUTOR: ING. JUAN ALARCÓN

FECHA DE PRESENTACIÓN: 1 DE JULIO DE 2019

Dedicado a Elva Lucrecia y Pedro León, mis abuelos.

Índice general

Índice de figuras	v
Índice de cuadros	vii
Resumen	viii
1.	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Objetivo	2
2.	3
2.1. Gestión de Residuos	3
2.2. Radiación Ionizante y Radioprotección	4
2.3. Detección de Radiación	5
2.3.1. Detectores que funcionan en Modo Pulso	8
2.3.2. Detector Geiger-Müller	9
2.4. Enlace de Comunicación por RF mediante LoRa	10
2.4.1. Configuración	12
2.4.2. Modo A:	13
2.4.3. Modo B:	14
2.4.4. Modo C:	14
2.5. Módulos LoRa utilizados	15
2.5.1. Módulo UM402	15
2.5.2. Módulo LoRa1278	16
2.6. Arduino	17
3.	19
3.1. Desarrollo	19
3.1.1. Unidad de Detección	19
3.1.2. Unidad de Procesamiento	20
3.1.3. Costo de una unidad de procesamiento	28
3.1.4. Topología de Red	29
3.1.5. Parámetros de Comunicación en Radio Frecuencia	30
3.1.6. Protocolo de Comunicación	31
3.1.7. Firmware	35
3.1.8. Software de estación base	38

4.	41
4.1. Prueba del sistema en el AGE	41
4.1.1. Mediciones	41
Conclusiones	46
Referencias	47
Anexo	49
.1. Abreviaturas	49
.2. Cuadro	50

Índice de figuras

2.1. Residuos Nucleares en el país según su origen.	4
2.2. Imagen satelital del Área de Gestión Ezeiza.Fuente: Google Earth. . . .	4
2.3. Esquema de un detector gaseoso, a) y forma característica de un pulso, b).	6
2.4. Regímenes de operación de un detector gaseoso.	7
2.5. Polarización inversa de una juntura P-N.	8
2.6. Esquema de un detector centellador.	8
2.7. Tasa medida vs. Tasa real para detector paralizable con $\tau=500 \mu s$	9
2.8. Esquema de modulación DSSS. Fuente: Application Note 1200.22 LoRa Modulation Basics[15].	11
2.9. Potencia mínima de recepción en función de la tasa de datos. El eje x está en escala logarítmica.	13
2.10. Dispositivo UM402.	15
2.11. Dispositivo LoRa1278.	16
2.12. Dispositivos: Arduino Nano (izquierda) y Uno (derecha).	18
3.1. Esquema de una unidad de detección.	19
3.2. Fotografía de una unidad de procesamiento con sus partes demarcadas. . . .	20
3.3. Fotografía de las tres unidades de procesamiento desarrolladas.	20
3.4. Circuito esquemático de la fuente de alta tensión utilizada para polarizar el tubo Geiger-Müller.	21
3.5. Fotografía de la fuente de polarización con sus partes demarcadas. . . .	21
3.6. Tensión de la bobina en función del tiempo.	22
3.7. Setup de medición de fuente de polarización con sus partes demarcadas. . . .	23
3.8. Fotografía de los tubos detectores utilizados: LND-7224 (izquierda) y LND-713 (derecha).	23
3.9. Esquema del circuito conformador de pulsos y el detector LND: LND-713 o LND-7224.	24
3.10. Pulso de entrada (arriba) y salida (abajo) del Amplificador.	25
3.11. Pulso sin conformar.	26
3.12. Pulso conformado.	26
3.13. Señales de entrada al amplificador y a la fuente de polarización.	27
3.14. Discriminación de las oscilaciones de la fuente.	27
3.15. Topología de red estrella.	29
3.16. Topología de red estrella con repetidores.	29
3.17. Imagen satelital del predio con los puntos de muestreo: FAI, P18 y PM y sus respectivas distancias hasta la estación base LGS. En el punto R se ubicó un repetidor.	30

3.18. SNR promedio para 100 mensajes recibidos, para todas las combinaciones posibles de BW y SF.	31
3.19. Esquema de funcionamiento del conteo: EC simboliza EventCount y EC_L simboliza EventCount_Latch.	36
3.20. Captura de la señal generada por el generador de pulsos CNEA E023-A0.	36
3.21. Captura de pantalla de la interfaz del generador de pulsos.	37
3.22. Respuesta de la unidad de procesamiento a pulsos del generador.	37
3.23. Diagrama de flujo del bucle principal del firmware.	38
3.24. Captura de pantalla de la interfaz gráfica con sus partes principales demarcadas.	39
4.1. Disposición de las unidades: a)FAI, b)Punto 18, c)Playa de Maniobras y d)Repetidor.	42
4.2. Tasa de conteo en función del tiempo medida en la FAI.	43
4.3. Tasa de conteo en función del tiempo medida por el nodo 2 en el Punto 18.	44
4.4. Tasa de conteo en función del tiempo medida por el nodo 1 en la Playa de Maniobras.	45

Índice de cuadros

2.1. Parámetros que se desprenden de la hoja de datos del dispositivo UM402.	15
2.2. Modos de funcionamiento de un dispositivo UM402.	16
2.3. Parámetros que se desprenden de la hoja de datos del dispositivo LoRa1278.	16
3.1. Características de los tubos detectores utilizados.	24
3.2. Conexión entre el microcontrolador y la interfaz LoRa.	28
3.3. Costo de una unidad de procesamiento.	28
3.4. Pedidos de la estación base, Ped, y Respuestas de los nodos de detección, Res.	34
1. Relación señal ruido, con su incerteza asociada, en función del ancho de banda y el factor de propagación para antenas LoRa1278 separadas por 1 m.	50

Resumen

Toda instalación nuclear debe contar con un sistema de monitoreo de radiación ionizante, a fin de proteger al personal radiológicamente expuesto y poseer mecanismos de control y registro de radiación ionizante.

En el presente trabajo se describe el desarrollo de una red de sensores inalámbricos para monitoreo de radiación mediante unidades autónomas remotas equipadas con detectores de radiación ionizante. Fundamentalmente pensada para instalaciones de gran tamaño con poca disponibilidad de energía eléctrica, considerando la totalidad de su superficie, como por ejemplo el Área de Gestión Ezeiza de la Comisión Nacional de Energía Atómica.

Dichas unidades de detección están provistas de un mecanismo de comunicación en tiempo real que permite desde una estación base acceder a las lecturas de todos los detectores que componen la red. La estación base permitirá detectar cambios anómalos en las mediciones y poder actuar en consecuencia (alarmas, enclavamientos, mensajes, etc). Finalmente, la estación base permitirá mantener un registro histórico de las mediciones, posibilitando la detección de cambios en el fondo de radiación.

Capítulo 1

1.1. Introducción

En nuestro país las instalaciones nucleares funcionan bajo estrictas normas de seguridad radiológica, reguladas y verificadas periódicamente por la Autoridad Regulatoria Nuclear, ARN. Cada instalación debe contar con un plan de monitoreo de tasa de dosis que, de acuerdo a la clase y características propias de la misma, definirá puntos de interés para el monitoreo de dicha tasa. Esta tarea debe ser realizada de manera periódica por el personal de radioprotección de la instalación para finalmente informar los resultados de las mediciones a la ARN. En la instalación Área de Gestión Ezeiza estas mediciones son realizadas de manera manual, teniendo que trasladarse el agente al punto de medición con un radiómetro para tomar la lectura de tasa de dosis. Dependiendo de la tasa de dosis del punto en cuestión e intensificado debido a la periodicidad de la medición dicha tarea implica un costo de dosis para el operario. Sujetos al principio de optimización, el costo en dosis podría ser reducido colocando unidades de medición remotas en los puntos de medición, o para alcanzar una solución de compromiso, en los que presentan mayor tasa de dosis. En este tipo de instalaciones además es útil poseer lecturas continuas (en tiempo real) de los niveles de radiación de determinados puntos estratégicos como pueden ser puntos de acceso, almacenes y lugares con frecuente presencia de personal.

Se desarrolló e implementó una red de unidades de medición de radiación ionizante remotas provistas de un canal de comunicación basado en un enlace de Radio Frecuencia, RF, (con cobertura en toda el área) que permiten tener lectura de niveles de radiación en tiempo real desde una estación base.

La instalación seleccionada es el Área de Gestión Ezeiza, AGE, y el presente trabajo es el inicio de un proyecto a futuro que propone la automatización de 10 (los de mayor tasa de dosis) de los 50 puntos de muestreo del plan de monitoreo de la instalación y la colocación de otras 10 unidades distribuidas en el predio. El principal beneficio es conseguir disminuir el impacto del costo de dosis tanto para los operadores individualmente como para la instalación en su conjunto. Además se pretende tener un registro histórico e informatizado de los niveles de radiación en puntos característicos.

El trabajo se inscribe dentro del plan de mejoras continuas de automatización e informatización de los sistemas de medición del AGE, por lo que se plantea para ser integrado a otros sistemas desarrollados previamente[1,2,3,4].

1.2. Antecedentes

El principal antecedente de este trabajo es el proyecto Waste Bin Monitoring, W-MON[5], de la Organización Europea para la Investigación Nuclear, CERN. En dicho proyecto se estableció la medición de tasa de dosis en los cubos de basura convencional de todo el centro, aproximadamente 100 cubos distribuidos en 40 hectáreas. Convencionalmente se hace un muestreo de la décima parte de los cubos por parte de un operario dotado de un dosímetro basado en un detector de NaI. El proyecto consistió en dotar a alrededor de 15 cubos con 6 dosímetros basados en detectores semiconductores de silicio, distribuidos de manera tal de mapear la dosis del cubo, estos dosímetros se conectaron a microcontroladores Arduino para procesar la información del dosímetro y a antenas Wi-Fi para enviar la información a un dispositivo que a través de la tecnología LoRa, acrónimo de Long Range, se comunica con el servidor. El proyecto W-MON conforma un antecedente a un monitoreo de radiación remoto basado en una red de sensores donde para establecer la comunicación entre cada sensor y el servidor se utilizó la tecnología de LoRa.

A lo largo de mi carrera de grado realicé tres prácticas supervisadas, dos en el Laboratorio Gamma Escáner dentro del AGE y la restante en la Subgerencia de Instrumentación y Control de la Comisión Nacional de Energía Atómica, CNEA. En estas prácticas desarrollé un amplificador de pulsos[6], una sonda basada en detector Geiger-Müller con conexión Wi-Fi y servidor web[7,8] y finalmente un estudio sobre antenas LoRa[9]. Estos trabajos han sido la base del presente proyecto.

1.3. Objetivo

El objetivo del presente proyecto es el desarrollo de una red de sensores inalámbricos para monitoreo de radiación mediante unidades autónomas remotas equipadas con detectores de radiación ionizante.

Las unidades constan de un detector de tipo Geiger-Müller con toda la electrónica asociada para su funcionamiento (amplificador y fuente de polarización). Cada unidad está provista de una microcomputadora, que lleva a cabo las funciones de procesamiento de la señal del detector e interfaz de comunicación.

Debido a la escala de la instalación y a la disposición acotada de fondos y tiempo, se plantea como objetivo el desarrollo de la electrónica e implementación de tres prototipos funcionales de unidades remotas de medición, una primera versión del protocolo de comunicación y el concentrador de datos (estación base) desarrollado en PC.

Capítulo 2

2.1. Gestión de Residuos

La gestión de residuos radiactivos comprende las etapas de: recolección y transporte, caracterización, registro, tratamiento y acondicionamiento, almacenamiento y disposición final.

En nuestro país el ente encargado de la gestión de residuos radiactivos es el Programa Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos, PNGRR, de la CNEA. Dicho ente fue creado por una ley del Congreso Nacional, Ley 25.018, Régimen de Gestión de Residuos Radiactivos, del año 1998. Esta ley establece las potestades del PNGRR y le encomienda la responsabilidad de la gestión segura de los residuos radiactivos y los combustibles gastados provenientes de todas las actividades nucleares que se desarrollan en el país.

Los residuos radiactivos que el Programa gestiona provienen en mayor medida, un 80 %, de la actividad de las centrales nucleares y en menor medida de las actividades relacionadas a la producción de combustible para dichas centrales o reactores de investigación. También son significativos los aportes de las aplicaciones médicas e industriales de la tecnología nuclear que sumados a la investigación en temas nucleares alcanzan el 9 % del total de residuos sobre los cuales el Programa tiene injerencia, según puede apreciarse en la figura 2.1.

Bajo la órbita del PNGRR se encuentra el Área de Gestión Ezeiza, una instalación Clase I que comprende un predio de 8 hectáreas ubicado dentro del Centro Atómico Ezeiza, CAE, donde se realiza la disposición final de residuos de nivel bajo, el tratamiento y acondicionamiento de residuos de baja y media actividad, y el almacenamiento de: residuos acondicionados, fuentes selladas en desuso y combustibles gastados de reactores de investigación. Una vista satelital del predio se muestra en la figura 2.2. Anualmente ingresan al AGE: alrededor de 100 m³ de residuos de nivel bajo y 10 m³ de nivel medio, provenientes de las centrales nucleares y el proceso de fabricación de sus combustibles, 20 m³ de nivel bajo y 2 m³ de nivel medio provenientes de otras actividades nucleares y alrededor de 2000 fuentes selladas provenientes de uso médico o industrial[10].

La ARN exige conocer la tasa de dosis de alrededor de 50 puntos del AGE con una medición realizada de manera quincenal. Por el momento los oficiales de radioprotección

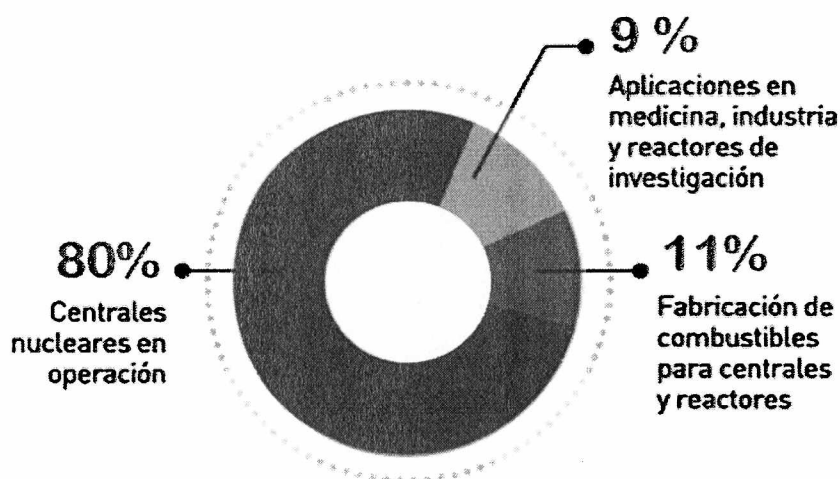


Figura 2.1: Residuos Nucleares en el país según su origen.



Figura 2.2: Imagen satelital del Área de Gestión Ezeiza. Fuente: Google Earth.

de la instalación, para llevar a cabo la tarea de medición de dosis, deben dirigirse personalmente hasta el punto marcado.

2.2. Radiación Ionizante y Radioprotección

La radiación ionizante interactúa con la materia que atraviesa transfiriéndole energía de manera directa o indirecta. Puede dividirse la radiación ionizante de acuerdo a la masa de las partículas involucradas. Dentro de las que no poseen masa, se encuentran la radiación gamma y rayos X (radiación electromagnética). La radiación ionizante proveniente de partículas con masa puede subdividirse entre cargadas (por ejemplo: alfa y beta) y no cargadas (neutrones). Las partículas no cargadas son más penetrantes que las cargadas. Este proyecto se centra en la detección de radiación gamma, porque es el

tipo de radiación presente en el medio considerado.

En prácticas rutinarias el uso de las radiaciones ionizantes debe estar justificado por un beneficio que sea superior al riesgo asumido al realizar la práctica. Se intenta prevenir la ocurrencia de efectos determinísticos, particularmente en la piel y el cristalino, y limitar la ocurrencia de efectos estocásticos tales como el cáncer y las enfermedades hereditarias. La magnitud que se usa para cuantificar la radiación recibida es la dosis. Se define como dosis absorbida a la energía media impartida por unidad de masa, siendo su unidad el Gray [Gy]. Multiplicando la dosis absorbida por un factor de ponderación propio del tipo de radiación, se obtiene la dosis equivalente, cuya unidad es el Sievert [Sv]. La suma ponderada por tipo de tejido de las dosis equivalentes en todos los tejidos y órganos especificados del cuerpo, es la dosis efectiva, cuya unidad es el Sv. La dosis efectiva es similar, en términos de riesgo general, a una exposición uniforme de cuerpo entero en la cual cada órgano recibe una dosis equivalente igual a la dosis efectiva, siendo por eso la más asociada a conceptos de protección radiológica[11].

Además del principio de justificación de prácticas existen dos principios fundamentales, el de limitación de dosis efectiva y el principio de optimización de las prácticas. El límite de dosis anual para el personal ocupacionalmente expuesto impuesto por la ARN es de 20 mSv,[12] en el año 2017 la dosis promedio del personal ocupacionalmente expuesto de la instalación fue de 0.1 mSv. Este nivel está muy por debajo del límite, entonces la posible instalación de dosímetros remotos en remplazo de los convencionales está motivada por el principio de optimización, mantener la dosis efectiva en el personal en niveles tan bajos como sea razonablemente posible.

2.3. Detección de Radiación

Para que se produzca la detección de un evento de radiación ésta debe llegar al volumen sensible del detector e interactuar allí de modo tal de ceder toda o parte de su energía. Esto dependerá de factores geométricos y del tipo de material, paredes del detector o medio circundante, que la radiación debe recorrer hasta alcanzar la zona sensible.

Existen tres tipos de detectores según los procesos principales de deposición de energía de las radiaciones ionizantes: ionización de un gas, ionización de una red cristalina y excitación de estados ópticos.

El proceso de ionización de un gas se esquematiza en la figura 2.3 a), donde A es un amperímetro. La partícula detectada genera pares iónicos, electrones y cationes, que circulan hacia las paredes del cátodo y el ánodo. La corriente que se establece a través del amperímetro se ilustra en figura 2.3 b), forma característica de un pulso, la forma del pulso está determinada por el hecho de que primero se colectan los electrones y luego los cationes. El tiempo que transcurre entre la colección de la primer carga y la última se conoce como tiempo de conteo, t_c . En algunos casos se puede correlacionar la altura del pulso con la energía de la partícula incidente, a mayor energía produce más ionizaciones dando como resultado una mayor altura.

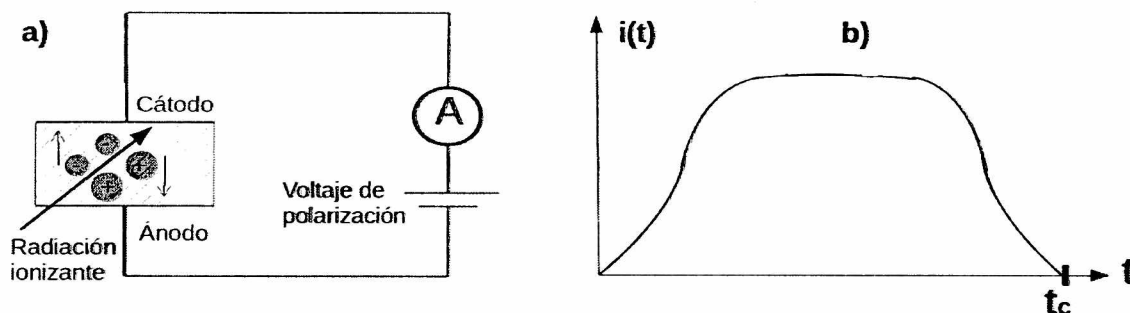


Figura 2.3: Esquema de un detector gaseoso, a) y forma característica de un pulso, b).

Los detectores gaseosos pueden funcionar en tres modos de operación: pulso, corriente y valor cuadrático medio[13]. Trabajando en modo pulso los eventos se detectan individualmente. Cuando los eventos dejan de ser distinguibles en forma individual y se detecta una corriente proporcional a la cantidad de eventos por unidad de tiempo se trabaja en modo corriente. En el modo valor cuadrático medio se utiliza la componente fluctuante de la corriente detectada. Hay detectores como los contadores de fisión que pueden ser utilizados tanto para modo pulso como para valor cuadrático medio cambiando el procesamiento de la señal dentro de la electrónica.

Existen distintos regímenes en los cuales un detector gaseoso puede operar dependiendo del voltaje de polarización utilizado para coleccionar la carga generada. La amplitud del pulso observado en el detector en función del voltaje de polarización junto con los regímenes de operación se muestra en la figura 2.4. A valores bajos de voltaje, el campo eléctrico es insuficiente para evitar la recombinación de algunos pares iónicos originales, producto de la movilidad térmica de las partículas del gas, y la carga coleccionada por el detector es menor que la representada por los pares primarios. Al aumentar el voltaje, se suprime la recombinación y se alcanza la región de saturación iónica, en esta región funciona la cámara de ionización. Si se continúa aumentando el voltaje los pares iónicos aceleran lo suficiente como para producir ionización secundaria, generando un total de pares iónicos que llegan a las paredes del detector proporcional al voltaje aplicado, este es el régimen de proporcionalidad. Con un sobreincremento del voltaje de polarización se da lugar a una región en donde no puede establecerse una relación entre la carga coleccionada y la energía de la partícula detectada, dando lugar al régimen Geiger-Müller. Superando el voltaje todavía más puede suceder que se produzcan pulsos en el detector aunque no llegue partícula alguna, región conocida como régimen de descarga. En conclusión la cámara de ionización y el contador proporcional pueden discriminar las partículas que detectan por su energía y el detector Geiger-Müller no tiene esa capacidad.

Los materiales semiconductores son aquellos que forman una red cristalina en la cual la energía necesaria para pasar de la banda de conducción a la banda de valencia se encuentra entre 0.5 y 2 eV. Polarizando un semiconductor a temperatura ambiente se produce una corriente térmica.

Se dopan semiconductores agregando átomos pentavalentes que donan un electrón

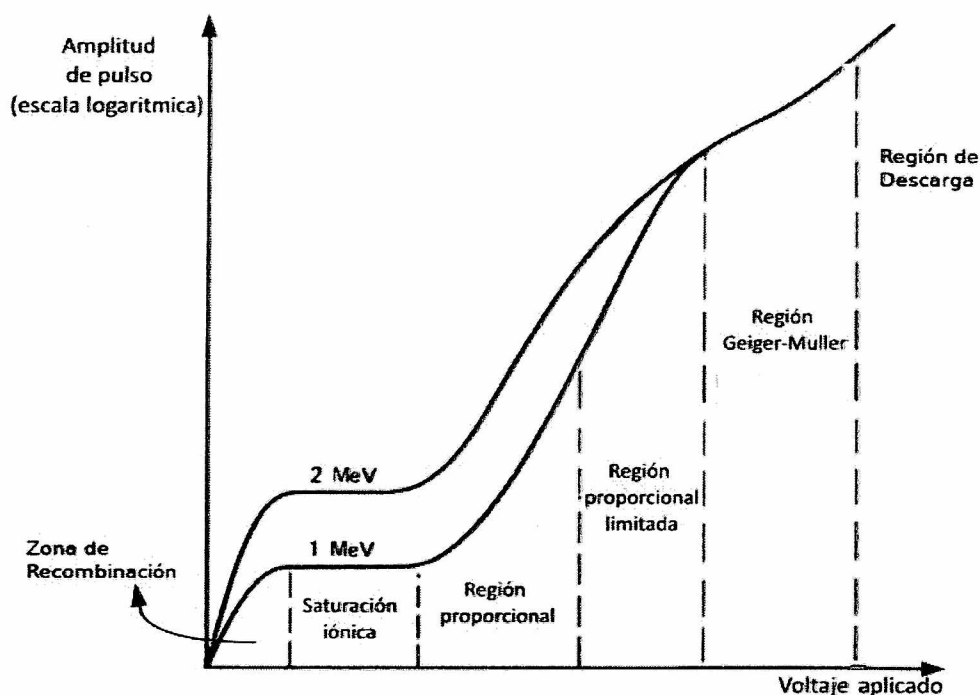


Figura 2.4: Régímenes de operación de un detector gaseoso.

a la banda de conducción, semiconductores tipo N. Se agregan átomos trivalentes que donan una laguna a la banda de valencia, semiconductores tipo P. Juntando semiconductores tipo N y P se genera una zona libre de portadores (juntura P-N). Tal como se indica en la figura 2.5 esta zona se ensancha cuando el semiconductor se polariza de manera inversa, el positivo de la batería conectado a la zona N y el negativo a la zona P. Cuando la radiación incide en la zona deplemada se generan pares electrón-hueco que van a ser arrastrados por la diferencia de potencial generando un pulso de corriente. Este tipo de detector se utiliza para partículas cargadas debido a la pequeña dimensión de la juntura, que generalmente es atravesada por la radiación gamma sin presentar interacción. Para detectar radiación gamma se utilizan cristales ultrapuros. Estos cristales necesitan de refrigeración para que la corriente térmica no enmascare la de ionización. Un caso típico de estos es el detector de Germanio, que al tener una energía de creación de pares del orden de los 3 eV genera una gran cantidad de electrones por interacción dando como resultado una buena resolución en la energía de las partículas detectadas.

La excitación de estados ópticos se produce en cristales de centelleo. Existen dos grandes ramas, los centelladores orgánicos y los inorgánicos. Estos últimos por su mayor peso atómico son recomendables para radiación gamma. En un centellador la interacción de radiación ionizante con el cristal produce luz visible que es colectada por un fotocátodo y por efecto fotoeléctrico genera fotoelectrones que se amplifican en cantidad en un tubo fotomultiplicador, proceso ilustrado en figura 2.6. El pulso a la salida del tubo fotomultiplicador luego de ser amplificado y conformado puede ser discriminado por su altura que es proporcional a la energía depositada por la partícula detectada,

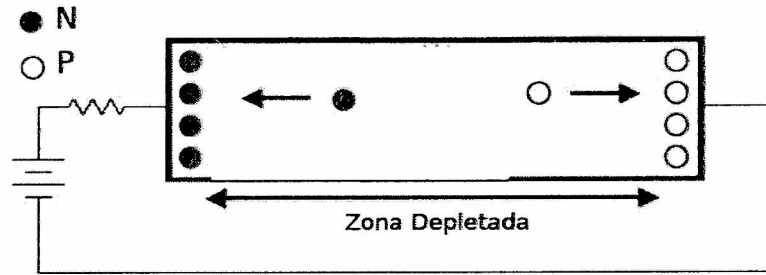


Figura 2.5: Polarización inversa de una juntura P-N.

de esta manera los centelladores son capaces de discriminar en energías.

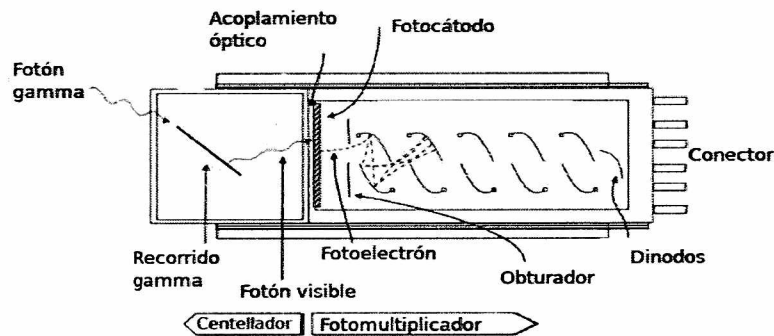


Figura 2.6: Esquema de un detector centellador.

2.3.1. Detectores que funcionan en Modo Pulso

El procesamiento de un pulso colectado a la salida del detector va a tomar un tiempo durante el cual el sistema no va a poder medir un nuevo pulso, a este tiempo se lo conoce como tiempo muerto, que es función de la duración del pulso a detectar. Existen dos modelos para estimar el tiempo muerto, el paralizable y el no paralizable. En el primer caso al aumentar la tasa real por sobre un determinado nivel, la tasa medida si bien sigue creciendo lo hace a un ritmo menor según ecuación:

$$n = \frac{m}{1 - m}$$

donde n es la tasa real y m es la tasa medida. En el segundo caso por sobre un determinado nivel de tasa real la tasa medida disminuye según la ecuación:

$$m = n \exp -n\tau$$

, donde τ representa el tiempo muerto del detector cada vez que este detecta un evento. En la figura 2.7 se aprecia la relación entre la tasa medida y la tasa real, para un detector paralizable.

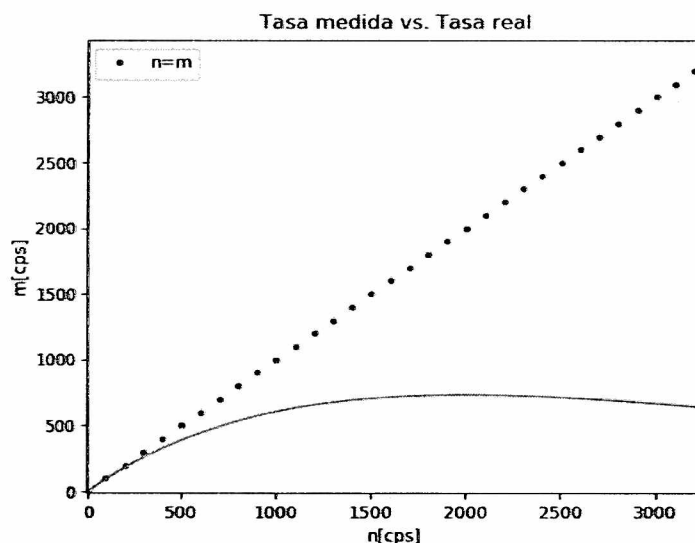


Figura 2.7: Tasa medida vs. Tasa real para detector paralizante con $\tau=500 \mu s$.

2.3.2. Detector Geiger-Müller

El detector Geiger-Müller, como se ha mencionado antes, funciona en modo pulso y no es capaz de discriminar en energía, es por esto que recibe el nombre de contador. Esto es porque si bien la primera ionización es proporcional a la energía, se generan avalanchas a lo largo de todo el tubo. La avalancha termina cuando una vez recolectados todos los electrones el cuerpo de detector se encuentra lleno de iones positivos. Para que se produzca el apagado los iones lentos deben recombinarse con los electrones del cátodo, existen dos métodos para ello, bajar la tensión aplicada luego de un pulso, lo que complica la electrónica, o utilizar un gas de apagado que se ioniza neutralizando el gas de relleno del detector, luego el gas de apagado debe recombinarse con los electrones del cátodo, el gas de apagado ronda una décima parte del gas total en el detector.

La información que brinda el detector es la cantidad de cuentas que percibe en una determinada ventana de tiempo, si esta ventana es de un segundo, entonces el detector mide la tasa de conteo por segundo.

Calibración

En muchos casos de detección de radiación, y fundamentalmente en tareas relacionadas con seguridad y radioprotección la magnitud de interés suele ser la tasa de dosis, la cual generalmente tiene unidades de Sv/h. Los dispositivos implementados miden cuentas por segundo, lo que implica que la magnitud que se mide realmente está relacionada con cantidad de interacciones de las partículas que llegan al detector en la unidad de tiempo considerada. Para poder convertir dicha medida en la variable tasa de dosis es necesario seguir un proceso de calibración, el cual no resulta trivial si se tiene en cuenta que la dosis además de estar relacionada con la cantidad de interac-

ciones contempla la energía que cada interacción deposita en el cuerpo de medición. En el caso de los tubos Geiger-Müller se utiliza un compensador de energía para lograr cierto grado de independencia respecto de la energía. En la práctica la forma de calibrar los instrumentos de campo que miden tasa de dosis consiste en el uso de una fuente radiactiva y una geometría de la cual se conoce con exactitud la tasa de dosis y tomando lectura de las cuentas por segundo medidas por el equipo en cuestión, se obtiene un factor de escala que permite el pasaje de una variable a la otra.

En ciertos casos no es necesario llevar a cabo la calibración del equipo, si lo que interesa son los cambios relativos en el nivel de radiación como por ejemplo el caso de un portal que debe detectar la presencia de sustancias radioactivas. En tal caso lo que se fija es un nivel umbral (el cual estará relacionado con el fondo) y superado dicho umbral el sistema indica la presencia de material radiactivo. En el presente trabajo no se realizaron calibraciones pero en caso de ser necesario para el uso futuro del sistema la CNEA cuenta con laboratorios para calibración.

2.4. Enlace de Comunicación por RF mediante LoRa

Considerando la arquitectura de red más simple, la estructura cliente-servidor, la comunicación se establecerá entre estos dos puntos. Considerando una red más compleja en la cual hay dos o más dispositivos que se comunican con el servidor, se denominan cada uno de estos dispositivos, nodos. La comunicación entre los nodos, o entre un nodo y el servidor, se denomina comunicación punto a punto.

La comunicación punto a punto se realiza mediante radiofrecuencia a través de la capa física LoRa. Esta tecnología es propiedad de la compañía Semtech y se promueve comercialmente para aplicarse en el desarrollo de LPWAN, Red de Área Amplia de Baja Potencia por sus siglas en inglés. La característica de bajo consumo es crucial para dispositivos autónomos.

El protocolo de comunicación que utilizan los dispositivos LoRa se denomina LoRaWAN y corresponde a los protocolos tipo MAC, Control de Acceso al Medio por sus siglas en inglés.

La capa física LoRa utiliza un tipo de técnica de modulación empleada en telecomunicaciones para la transmisión de datos denominada CSS, siglas de Chirp Spread Spectrum o Frecuencia Modulada Pulsada,[14] una técnica que fue desarrollada para radares en la década de 1940 y que ha ido incrementando su cantidad de aplicaciones en las últimas dos décadas debido a la baja potencia requerida para transmitir y a la robustez frente a mecanismos de degradación como el efecto Doppler. Técnica recomendada para comunicaciones a baja tasa de datos, menor a 1 Mbit/s. Los sistemas de Frecuencia Modulada Pulsada se ubican entre las técnicas de modulación de espectro ensanchado. Hay dispositivos que además de funcionar con LoRa lo hacen con un tipo de modulación digital denominada FSK, siglas de Frequency Shift Keying o Modu-

lación por Desplazamiento de Frecuencia, la diferencia práctica es que LoRa permite obtener mayores alcances de transmisión para la misma potencia transmisora[15].

Otra técnica de modulación de espectro ensanchado es la Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS, o Espectro Ensanchado por Secuencia Directa. En esta técnica la fase portadora del transmisor cambia en concordancia con una secuencia de código conocida como secuencia de chips. Como la secuencia de chips ocurre a una tasa mucho más rápida que la señal original ensancha el ancho de banda de la señal codificada sobre el de la señal original, dando como resultado la señal transmitida. Un esquema de la modulación se aprecia en la figura 2.8. En el receptor la señal original se recupera utilizando la misma secuencia de chips que en el transmisor. Para esta técnica de modulación el ensanchamiento del espectro se calcula como la relación entre la tasa de chips por segundo, R_c , y la tasa de bits por segundo o tasa de datos, DR por sus siglas en inglés, y se denomina ganancia de procesamiento, G_p , comúnmente expresada en decibeles según la ecuación 2.1. Esta técnica le permite al receptor recuperar la señal original incluso cuando es mayor la intensidad del ruido que la de la señal.

$$G_p = 10 \log \frac{R_c}{DR} \quad (2.1)$$

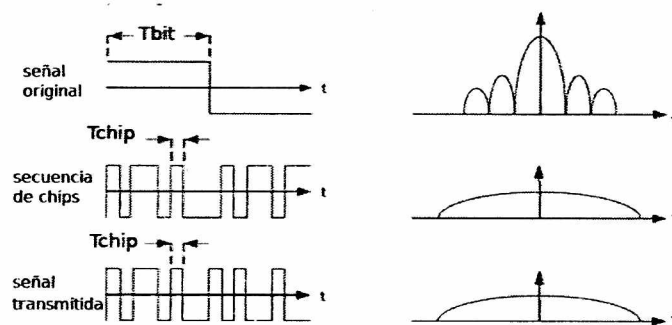


Figura 2.8: Esquema de modulación DSSS. Fuente: Application Note 1200.22 LoRa Modulation Basics[15].

La técnica de frecuencia modulada pulsada utiliza una señal chirp, esta barre todas las frecuencias del ancho de banda. Con esta técnica la señal pasa de bits a chips a una tasa de datos mayor que con la técnica de espectro ensanchado de secuencia directa. La señal original es modulada dentro de la señal chirp. La tasa de chips por segundo está determinada por el ancho de banda. En comparación con la técnica DSSS requiere un dispositivo receptor de menor complejidad debido a que los offsett en tiempo y frecuencia del transmisor y receptor son equivalentes.

La comunicación en LoRa se establece en la banda de frecuencias ISM, siglas de: Industrial, Scientific and Medical, dentro de 4 posibles valores que están establecidos entre, alrededor de, 400 y 900 MHz; frecuencias que pueden ser utilizadas sin la necesidad de solicitar licencia alguna. En este proyecto se ha utilizado únicamente la

frecuencia 433 MHz; si bien se denomina a las antenas utilizando una frecuencia, por ejemplo 433 MHz o 470 MHz, este valor es representativo de un rango de valores. Para las antenas utilizadas el rango de operación en frecuencias es:

Frecuencia mínima: 403 MHz

Frecuencia máxima: 463 MHz

2.4.1. Configuración

Dentro del rango de frecuencias de trabajo se pueden establecer distintos canales, cada uno se determina por tres magnitudes. La primera es la Frecuencia Portadora, o frecuencia central del canal, denominada CF, por sus siglas en inglés. La segunda es el Factor de Propagación, SF, siglas de Spreading Factor. Los valores posibles de SF van del 6 al 12 para todas las antenas LoRa de 433 MHz, SF=6 es un caso especial que no se ha considerado en este proyecto. La escala de SF es logarítmica de base 2, entonces SF=7 significa 2 elevado a la 7, 128 chips/símbolo. Un incremento unitario del SF implica la duplicación del tiempo de transmisión, repercutiendo en el consumo. La tercera es el Ancho de Banda, BW, esta magnitud puede tomar los siguientes posibles valores: 7.8, 10.4, 15.6, 20.8, 31.25, 41.7, 62.5, 125, 250 y 500 kHz en los dispositivos LoRa de 433 MHz.

A un dispositivo LoRa se le puede configurar un cuarto parámetro, la Relación de Código, abreviada CR, sin que esto conlleve a la división de canales. Esto significa que dos dispositivos pueden comunicarse entre sí teniendo distintos CR, siempre que sus respectivos valores de CF, SF y BW sean iguales. La CR está relacionada con la Corrección de Errores Hacia Adelante, FEC por sus siglas en inglés, que ofrece protección contra interferencias con la desventaja de aumentar el tiempo en aire de un mensaje. Para un determinado canal el mínimo valor de CR, 4/8, es el que determina la menor tasa de datos transmitidos por un antena. Para este mismo canal el valor máximo de CR, 4/5, es el que determina el menor tiempo de vuelo. Los valores intermedios de CR son 4/6 y 4/7.

Por ejemplo para un ancho de banda de 125 kHz, una relación de código de 4/6 y un factor de propagación de 12 resulta una tasa de datos de 250 bits/s, manteniendo los valores de BW y CR, y llevando SF a 7 se obtiene una tasa de datos de 5470 bits/s. La tasa de datos está ligada al SF según se muestra en la ecuación 2.2.

$$DR = \frac{SF}{2^{SF}} BW CR \quad (2.2)$$

Disminuir el tiempo de transmisión de los mensajes repercute directamente en el consumo, el estado de las antenas utilizadas que más corriente consume es el de transmisión.[16] Un incremento de la tasa de datos genera una disminución en la duración de la transmisión pero implica una disminución de la potencia mínima de recepción según se aprecia en la figura 2.9, valores tomados de la hoja de datos del dispositivo

UM402[17].

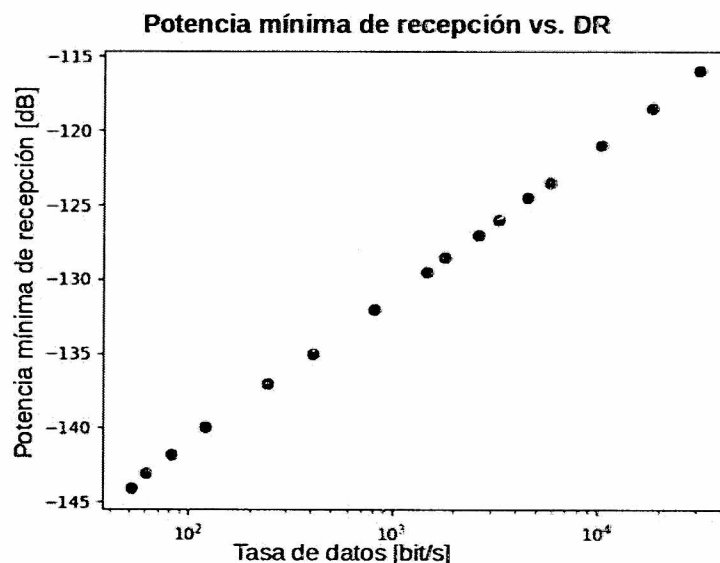


Figura 2.9: Potencia mínima de recepción en función de la tasa de datos. El eje x está en escala logarítmica.

Existen tres modos de configuración de una red LoRa llamados A, B y C. Considerando la arquitectura de red más simple, compuesta por un cliente y un servidor, se interpreta que el cliente se ubica debajo del servidor, entonces una comunicación ascendente es desde el cliente hacia el servidor y, a la inversa, una descendente es desde el servidor al cliente.

2.4.2. Modo A:

En este modo cada transmisión desde el cliente al servidor es seguida por dos cortas ventanas de recepción. Las transmisiones ascendentes se producen basadas en las necesidades del cliente, con la limitación de que no puede producirse una transmisión nueva sin haberse completado el tiempo de ambas ventanas de recepción. Cabe destacar que aunque los instantes de transmisión sean programados cada una cantidad invariable de tiempo existirá siempre una pequeña variación aleatoria, basada en el protocolo ALOHA, que busca evitar colisiones. Una colisión se produce cuando dos mensajes, provenientes de clientes distintos llegan al servidor en el mismo momento. Las transmisiones descendentes servirían para que el servidor informe al cliente el estado de recepción del mensaje emitido por este último.

La primera ventana de recepción del cliente, RX1, se abre al segundo de terminada la transmisión. La comunicación se establece en la misma frecuencia y, por defecto, el mismo DR que la comunicación ascendente. La segunda ventana de recepción del cliente, RX2, se abre a los 2 segundos de terminada la transmisión pero en este caso la

comunicación se establece a frecuencia y DR que, así como en el caso de la comunicación ascendente, pueden configurarse libremente.

2.4.3. Modo B:

En adición al modo A, en el modo B, existen ventanas de recepción a tiempos programados. Esto permite que el servidor envíe al cliente una baliza cada 128 segundos, mediante la cual el cliente puede sincronizarse con el servidor, hacer esto elimina el uso del reloj interno del cliente.

2.4.4. Modo C:

En el modo C, el cliente cierra la ventana de recepción solamente cuando está transmitiendo. Esto permite disminuir la latencia (término con el que se conoce en la jerga de redes de comunicación a los retardos) a expensas de un consumo energético mucho mayor que en los modos A y B[14].

Considerando una arquitectura de red más compleja, en la que existe un servidor y dos nodos. La capa física de LoRa permite implementar una red de mayor complejidad como la que se describe a continuación. El documento “LoRaWAN Specification”[18] considera implementar una identificación distintiva entre nodos de la misma red, una identificación distintiva entre redes y la encriptación de los mensajes. La identificación de un nodo está compuesta por 32 bits, 7 que diferencian a la red de otras para evitar superposiciones y 25 restantes que diferencian a distintos nodos de la misma red. Además cada nodo tiene una clave que se utiliza, tanto por el nodo como por el servidor, para calcular y verificar el Código de Autenticación de Mensajes, CAM. Esta clave se utiliza tanto para encriptar como para desencriptar, lo que se conoce como criptografía simétrica. El esquema de encriptado se basa en un algoritmo genérico descrito en IEEE 802.15.4/2006 Anexo B [IEEE802154] que utiliza Advanced Encryption Standard, AES, un esquema de cifrado por bloques lanzado por el National Institute of Standards and Technology, NIST por sus siglas en inglés, que es uno de los algoritmos más populares utilizados en criptografía simétrica. El esquema AES permite utilizar claves de largo 128, 192 y 256 bits, LoRa utiliza la de 128 bits. Para el presente proyecto se consideró necesaria la identificación de los nodos y de la red, pero no se ha considerado encriptar la información.

Utilizando el Modo B, la baliza puede ser multidifusión, esto significa que el servidor puede enviar una sola baliza para que esta llegue a los dos nodos. La baliza, a diferencia de los mensajes convencionales no lleva encabezamiento ni ningún CRC, solamente se compone de un preámbulo de 10 símbolos y la carga útil.

La fragmentación de un mensaje se va a utilizar cuando el tamaño de este supere el kbyte, en la implementación de este proyecto no se contemplan mensajes que necesiten ser fragmentados[19].

Alimentación [V]	Potencia [dB]		Consumo [mA]	
	Transmisión	Recepción	Transmisión	Recepción
(2.6,3.6)	20	-144.1	120	13

Cuadro 2.1: Parámetros que se desprenden de la hoja de datos del dispositivo UM402.

2.5. Módulos LoRa utilizados

2.5.1. Módulo UM402

Es un dispositivo con interfaz asincrónica, UART, siglas en inglés de Transmisor-Receptor Asíncrono Universal. El mismo trae la antena incorporada. La figura 2.10 muestra una imagen del módulo. Según la hoja de datos del fabricante, ManThink, su rango de frecuencias va de los 410 a los 510 MHz[17]. El dispositivo cuenta con una aplicación de PC para su configuración llamada "RF Module Manager Setup", se puede elegir entre 16 distintas DR, estas son: 50.78, 61.04, 81.45, 122.07, 244.14, 406.9, 813.8, 1464.84, 1790.36, 2604.17, 3255.21, 4557.29, 5859.38, 10416.67, 18229.17 y 31250 bps. La tasa de datos es el único parámetro configurable de este dispositivo además de la frecuencia portadora.

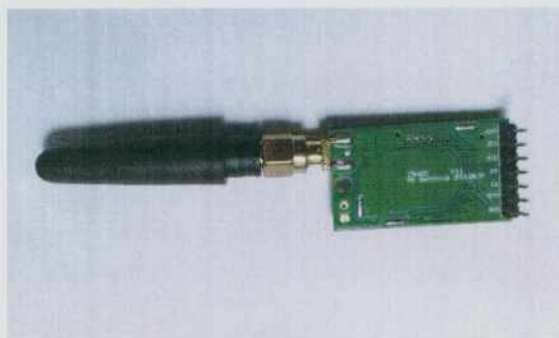


Figura 2.10: Dispositivo UM402.

En el cuadro 2.1 se enlistan diversos parámetros que se desprenden de la hoja de datos del dispositivo.

Este dispositivo cuenta con 7 pines: alimentación (VCC), tierra (GND), transmisión (TX), recepción (RX), auxiliar y dos pines de configuración denominados SETA y SETB. Los pines RX y TX deben conectarse a un puerto serie. Los pines de configuración son digitales, pueden tomar como valor 0 o 1. Entonces hay cuatro posibilidades de configuración de una antena UM402, Modo A, Modo B y Modo C y finalmente una cuarta posibilidad que permite la configuración del DR del dispositivo utilizando el programa Module Manager Setup. Los resultados de las combinaciones de SETA y SETB se muestran en el cuadro 2.2.

SETA	SETB	Modo
0	0	Modo C
0	1	Modo B
1	0	Modo A
1	1	Configuración

Cuadro 2.2: Modos de funcionamiento de un dispositivo UM402.

2.5.2. Módulo LoRa1278

Otro dispositivo utilizado es el módulo LoRa1278, con interfaz SPI, siglas en inglés de Serial Peripheral Interface. La figura 2.11 muestra el módulo. El dispositivo incluye su respectiva antena. La misma es de cobre helicoidal modelo SW433-TH32 de $50\ \Omega$, tanto el dispositivo como la antena son fabricados por la compañía NiceRF. Según la hoja de datos la frecuencia del dispositivo va desde los 403 hasta los 463 MHz[16]. Este módulo puede funcionar tanto con FSK como con LoRa. Para este dispositivo son configurables además de la frecuencia portadora: el factor de propagación, el ancho de banda y la relación de código, combinando distintos valores de estos parámetros se pueden obtener diversos valores de tasa de datos. El SF puede variar entre 7, 8, 9, 10, 11 y 12. El BW puede tomar los valores 62.5, 125, 250 y 500 MHz. Finalmente la CR puede ser 4/5, 4/6, 4/7 o 4/8.

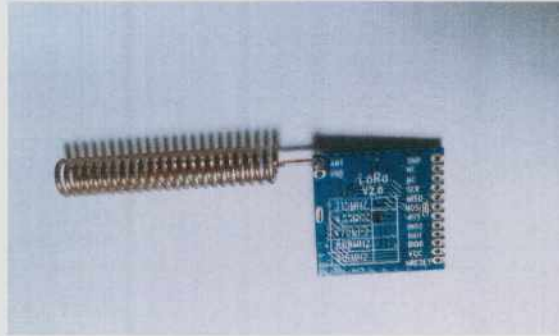


Figura 2.11: Dispositivo LoRa1278.

En el cuadro 2.3 se enlistan diversos parámetros que se desprenden de la hoja de datos del dispositivo.

Alimentación [V]	Potencia [dB]		Consumo [mA]	
	Transmisión	Recepción	Transmisión	Recepción
(1.8,3.7)	20	-139	120	10.8

Cuadro 2.3: Parámetros que se desprenden de la hoja de datos del dispositivo LoRa1278.

El módulo para su conexión cuenta con una interfaz de 10 pines: alimentación (VCC), tierra (GND), tres pines entrada-salida digital (GPIO), un pin reloj (SCK), un

pin de habilitación (NSS), un pin de reinicio (NRESET) y finalmente los pines MISO, Salida de datos del Esclavo y Entrada de datos al Amo, y MOSI, Salida de datos del Amo y Entrada de datos al Esclavo.

2.6. Arduino

Arduino es una plataforma de código abierto de electrónica pensada para el prototipado rápido. Esta plataforma mantiene en su web, con acceso libre, tanto los planos de sus dispositivos, en formato de diseño electrónico automático; como un compilador de lenguaje C, linker y programador, todo integrado en una herramienta llamada Arduino IDE, siglas de Integrated Development Environment. En este proyecto se utiliza dicha herramienta para la programación del microcontrolador. Una vez escrito un código en Arduino IDE se lo sube al dispositivo Arduino conectado a la PC mediante un cable USB. Este compilador cuenta con un Serial Monitor, a través del mismo es posible leer la información recibida en el puerto RX del dispositivo Arduino; y escribir y enviar información a través de TX del dispositivo Arduino.

Los dispositivos Arduino utilizados son 2: Arduino Nano y Arduino Uno. Ambos utilizan la misma unidad del microcontrolador, o MCU por sus siglas en inglés, ATmega328P que tiene una memoria estática de 2 kbyte, esta memoria se sostiene con la alimentación, a los fines de este proyecto la capacidad de memoria es más que suficiente.

Estos dispositivos cuentan con pines analógicos y pines digitales. Ambas placas Arduino, a pesar de su diferencia de tamaño, tienen en común que cuentan con 14 pines de entrada-salida digital, pines I/O. Sus pines de entrada-salida son tipo Transistor-Transistor Logic, TTL. De los cuales 6 se pueden modular en su ancho de pulso, los pines "3", "5", "6", "9", "10" y "11". De estos pines 4 se modulan con una frecuencia de 490 Hz y los restantes con una frecuencia de 980 Hz, estos pines son conocidos como PWM por sus siglas en inglés de Pulse Width Modulation. Dos pines funcionan como puerto serie, los pines "0" y "1".

Se puede alimentar mediante un cable USB o mediante una fuente externa de entre 7 V y 12 V. La corriente para los pines I/O es de 40 mA para el Nano y 20 mA para el Uno. La figura 2.12 muestra una imagen de las placas.

Debido a que en el Laboratorio Gamma Escáner, lugar de realización del trabajo, había disponibles ambos dispositivos, tanto Arduino Nano como Uno, y que para este proyecto pueden utilizarse indistintamente, sin que por esto sea necesario realizar un cambio de código en Arduino IDE ni un cambio en a nivel circuito del detector, se han utilizado ambos.

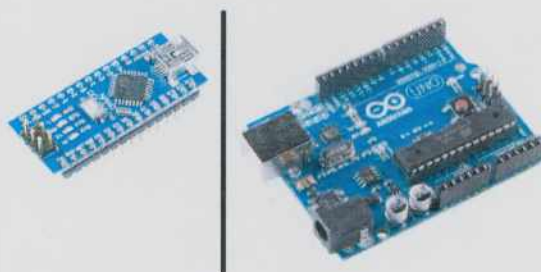


Figura 2.12: Dispositivos: Arduino Nano (izquierda) y Uno (derecha).

Capítulo 3

3.1. Desarrollo

3.1.1. Unidad de Detección

Compuesta por una unidad de procesamiento, una batería, un detector y un gabinete. La unidad fue concebida de esta manera para dotarla de flexibilidad pensando en usos futuros como podría ser el uso de otro tipo de detector, como el de cristal de centelleo de NaI con tubo fotomultiplicador. Además se buscó el uso de componentes estándar. Se esquematiza una unidad de detección en la figura 3.1.

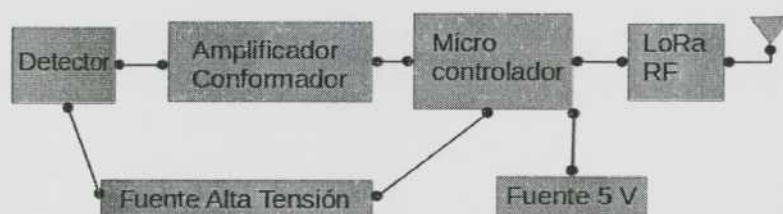


Figura 3.1: Esquema de una unidad de detección.

Batería: Se optó por usar baterías que se venden para carga de celulares conocidas como Power Bank ya que las mismas son económicas y se consiguen fácilmente en el mercado, su tensión de salida es de 5 V. Estos dispositivos tienen un conector USB para su carga y otro conector USB para brindar alimentación. Esto es una característica favorable ya que la conexión con la placa es mediante un cable USB, lo cual facilita su conexión en un eventual reemplazo de baterías. En caso de tener disponibilidad de energía eléctrica se utilizaría una fuente de alimentación de 220 V Corriente Alterna a 7 V de Corriente Continua. Finalmente el Power Bank puede ser utilizado como UPS, ya que puede estar conectado a la red eléctrica en carga continua y alimentando simultáneamente el nodo y ante un eventual corte del suministro eléctrico, el nodo puede seguir siendo alimentado por la batería.

Detector: En este trabajo se utilizó detectores Geiger-Müller.

Unidad de procesamiento: Es la placa desarrollada en este proyecto, descripta más adelante.

Gabinete: Se utilizó un gabinete de PVC estanco, modelo IPC65, que se comercializa para su uso en instalaciones eléctricas.

3.1.2. Unidad de Procesamiento

La unidad de procesamiento consta de un microcontrolador, una fuente de alta tensión, un amplificador conformador de pulsos y una interfaz LoRa. En la figura 3.2 se aprecia una fotografía de una unidad de procesamiento con sus partes componentes demarcadas. Las tres unidades de procesamiento desarrolladas se muestran en 3.3.

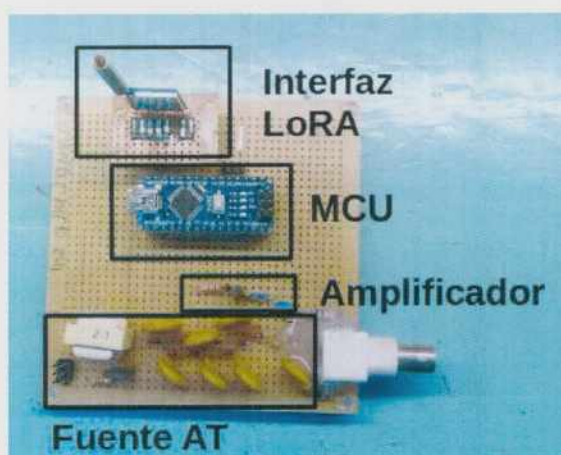


Figura 3.2: Fotografía de una unidad de procesamiento con sus partes demarcadas.

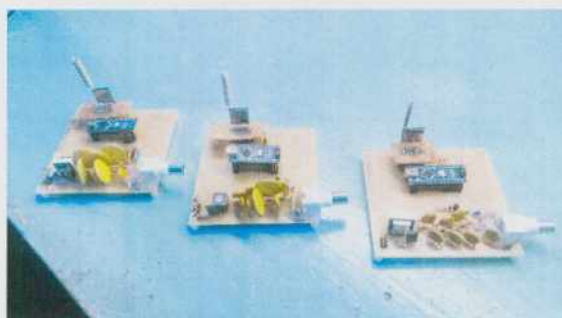


Figura 3.3: Fotografía de las tres unidades de procesamiento desarrolladas.

Microcontrolador

Se utilizó el microcontrolador de una placa Arduino Nano. Esta placa fue conectada mediante cable USB a la batería y controla toda la unidad de detección como se verá más adelante. Tanto para la fuente de polarización, como para el amplificador conformador de pulsos y la interfaz LoRa, VCC provino del pin de salida de 5 V del microcontrolador.

Fuente de Polarización

Los detectores utilizados necesitan polarización de Alta Tensión, AT, típicamente en el rango de 500 V a 1000 V. En el caso del presente trabajo dicha fuente fue desarrollada desde cero usando componentes de muy bajo costo y disponibles en el mercado local. Esto se debe fundamentalmente a un problema de presupuesto ya que un módulo comercial de alta tensión que cubra dicho rango de tensiones cuesta alrededor de US\$ 500.

El circuito de fuente de polarización desarrollado está compuesto de dos etapas. La primera es una fuente conmutada que mediante una señal de PWM de 490 Hz, señal proveniente del pin 3 del microcontrolador, y ciclo de actividad de aproximadamente 5 % genera una tensión en torno a los 100 V. Luego dicha tensión es amplificada en la segunda etapa compuesta de una serie de multiplicadores de tensión a diodo y capacitor de tipo Cockcroft-Walton alcanzando 500 V a la salida. La fuente utiliza alimentación de 5 V provenientes del microcontrolador. La figura 3.4 muestra el circuito esquemático de dicha fuente. En la figura 3.5 se aprecia una fotografía de la fuente de polarización con sus partes componentes demarcadas.

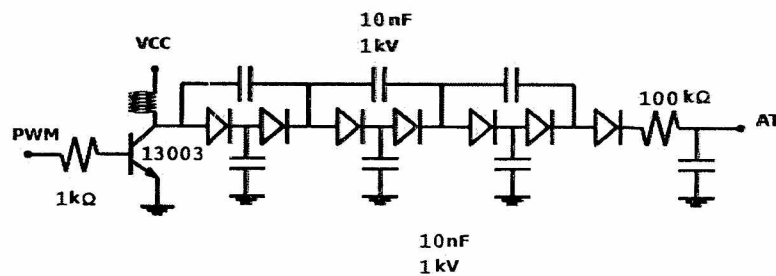


Figura 3.4: Circuito esquemático de la fuente de alta tensión utilizada para polarizar el tubo Geiger-Müller.

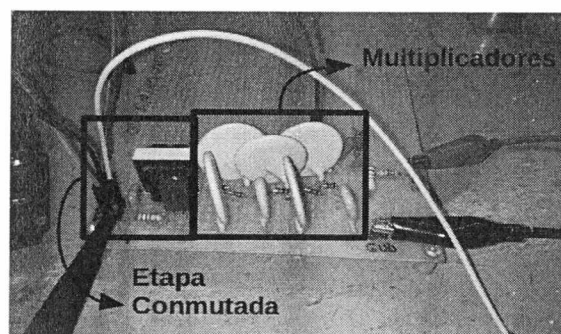


Figura 3.5: Fotografía de la fuente de polarización con sus partes demarcadas.

La etapa conmutada funciona generando cambios abruptos en la corriente que circula por la bobina [20]. La tensión en bornes de la misma es proporcional a la derivada respecto al tiempo de la corriente y así generando cambios abruptos en dicha variable se obtiene una tensión elevada. Estos cambios son producidos abriendo y cerrado el transistor 13003 mediante una señal de PWM. Es decir, que el transistor se utiliza

como llave que se abre y cierra al ritmo impuesto por la señal de PWM. Cuando el transistor está cerrado fluye corriente por la bobina debido a la diferencia de potencial impuesta por la alimentación, cuando el transistor se abre, interrumpiendo el camino de la corriente, debido a las condiciones de continuidad (de la corriente en un inductor) la bobina eleva su tensión para mantener el valor de la corriente y debido a que no encuentra camino por el transistor (está abierto), la corriente fluirá hacia el capacitor. La bobina alcanza una tensión de 130 V aproximadamente. La figura 3.6 muestra la tensión de la bobina en función del tiempo.

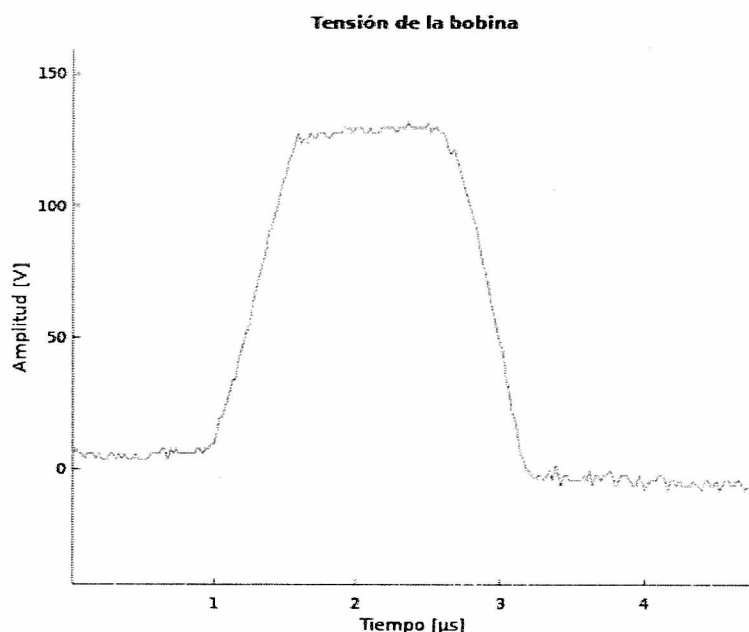


Figura 3.6: Tensión de la bobina en función del tiempo.

Luego esta tensión es rectificada y duplicada sucesivamente por tres etapas consecutivas de multiplicadores a diodo y capacitor. Cada una de estas etapas duplica la tensión de entrada a la misma, por lo que la tensión alcanzada por la fuente partiendo de 130 V en la bobina debería ser de $130 \text{ V} \times 2 \times 2 \times 2 = 1040 \text{ V}$. En la práctica debido a las pérdidas de los componentes (fundamentalmente de los diodos) y la tensión alcanzada es de 550 V.

Para verificar el funcionamiento de la fuente de AT, se midió con un voltímetro. Sin embargo, debido a la relativamente baja resistencia de entrada del voltímetro ($10 \text{ M}\Omega$) y la baja capacidad de corriente de la fuente, esta medición directa produjo que la fuente alcanzara menos tensión ya que el voltímetro cargaba la fuente. Detectada dicha condición, se realizó una placa con un divisor resistivo con una resistencia de $1 \text{ G}\Omega$ que en serie con los $10 \text{ M}\Omega$ del voltímetro genera un factor de atenuación de $1/100$ y presenta una alta resistencia de entrada para la fuente, de esta manera fue posible medir correctamente la tensión entregada por el circuito. La figura 3.7 muestra el setup de medición de la fuente de polarización. En la figura se observa la conexión desde la salida de la fuente al divisor resistivo y de ahí al voltímetro. La escala de mismo está

en Volts, para conocer el valor medido hay que multiplicar por la inversa del factor de atenuación del divisor. Como se ve en la figura la lectura del voltímetro es de 5.28 V, lo que indica una tensión de fuente de 528 V.

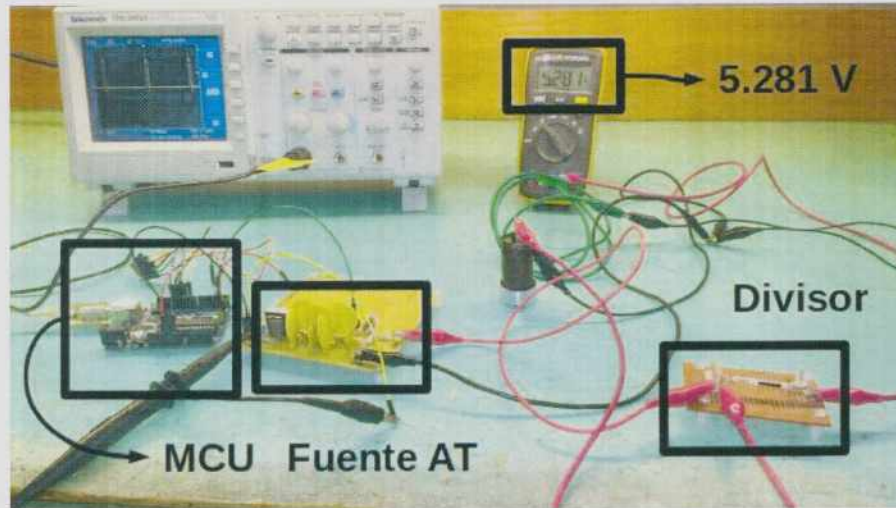


Figura 3.7: Setup de medición de fuente de polarización con sus partes demarcadas.

Detector de Radiación

Los detectores utilizados son tipo Geiger-Müller debido fundamentalmente a que estaban disponibles en el Laboratorio Gamma Escáner. Se utilizaron dos modelos distintos de la marca Ludlum: LND-713 y LND-7224 [21,22]. Los dos detectores pueden utilizar la misma tensión de trabajo: 500 V. La figura 3.8 muestra ambos detectores y en el cuadro 3.1 se describen las principales características de los mismos.



Figura 3.8: Fotografía de los tubos detectores utilizados: LND-7224 (izquierda) y LND-713 (derecha).

Característica	LND-713	LND-7224
Largo efectivo [mm]	27.9	37.1
Diámetro efectivo [mm]	7.9	19.9
Material	Acero Inoxidable	Acero Inoxidable
Gas+Gas de Apagado	Ne+Halógeno	Ne+Halógeno
Ventana	No	Mica
Voltaje de Operación [V]	(450,650)	(450,700)
Tiempo muerto mínimo [μ s]	45	160
Sensibilidad ^{60}Co [cps/(mGy/h)]	750	3200

Cuadro 3.1: Características de los tubos detectores utilizados.

Conformador de Pulsos

Los pulsos de tensión generados en el detector no son aptos para ser procesados por el microcontrolador, por lo que es necesario contar con un amplificador conformador de pulsos. Dicho circuito tiene la misión de adaptar la forma, polaridad y amplitud de los pulsos provenientes del detector y acomodar dichos parámetros para ser compatibles con una entrada digital[23] del microcontrolador, se utilizó el pin 2 como entrada digital. La figura 3.9 muestra el circuito esquemático del amplificador conformador de pulsos y del detector, BC327 es el transistor utilizado. Entre la salida del detector y la entrada del amplificador se coloca un capacitor en serie para aislar la alta tensión de la fuente de polarización de la entrada digital del microcontrolador.

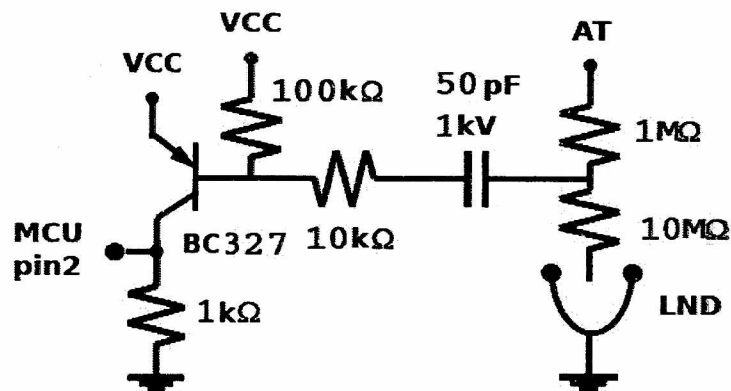


Figura 3.9: Esquema del circuito conformador de pulsos y el detector LND: LND-713 o LND-7224.

La figura 3.10 muestra en el gráfico superior la señal de salida del detector y en el gráfico inferior la salida del amplificador conformador en la misma escala de tiempo. Como se ve en la misma, el circuito conformador invierte la polaridad de la señal, la amplifica y acorta la duración del pulso. La señal de la parte inferior es la que finalmente entra al microcontrolador. Además puede verse que la amplitud del pulso es de 3.3 V

siendo dicho nivel superior al umbral de “1 lógico” para el estándar TTL que es de 2.4 V.

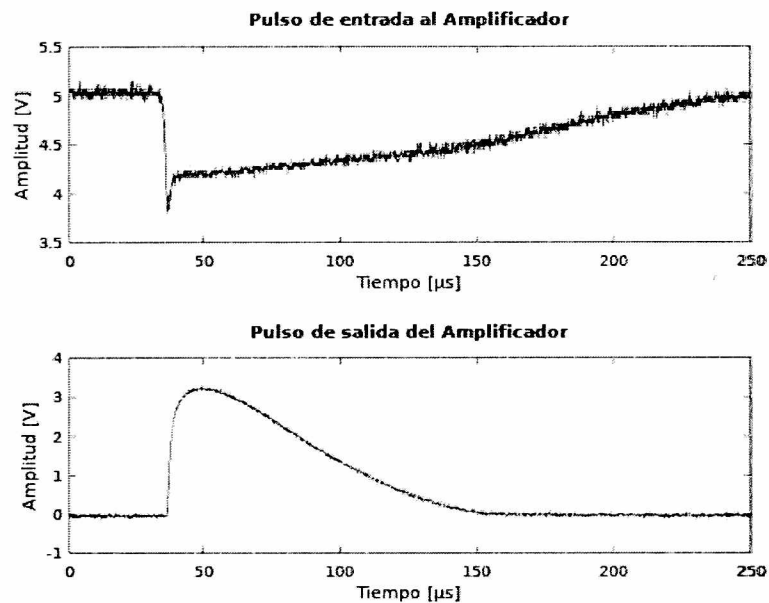


Figura 3.10: Pulso de entrada (arriba) y salida (abajo) del Amplificador.

En la figura 3.11 se muestra un pulso de salida del detector, para su mejor interpretación, el mismo se muestra invertido y sin el nivel de tensión continua. Como se aprecia la duración del pulso es de aproximadamente 1 ms. Esta larga duración es debida al circuito de entrada RC del amplificador (donde está adquirido el pulso) produciendo una constante de tiempo larga, que en el gráfico está representada en la parte negativa del pulso. Este pulso es acortado en duración por el amplificador, como se ve en la figura 3.12 resultando una duración de 100 μ s aproximadamente. Además se observa como el pulso es amplificado de 0.7 V a 3 V.

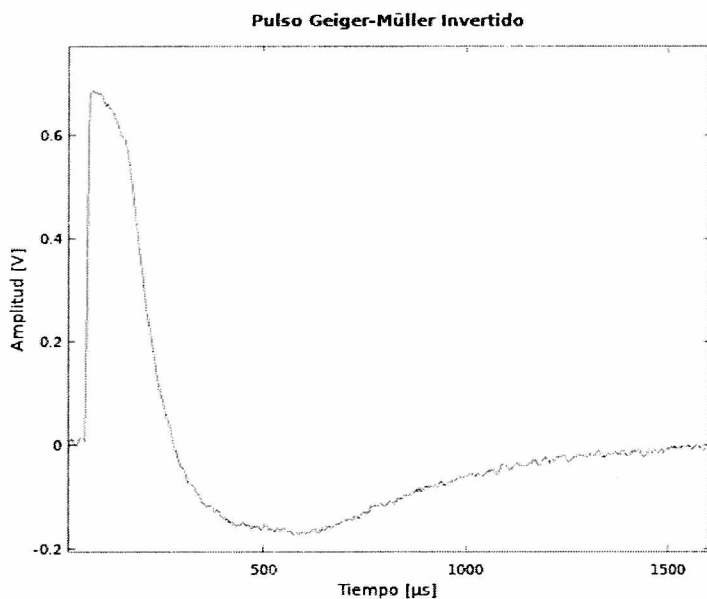


Figura 3.11: Pulso sin conformar.

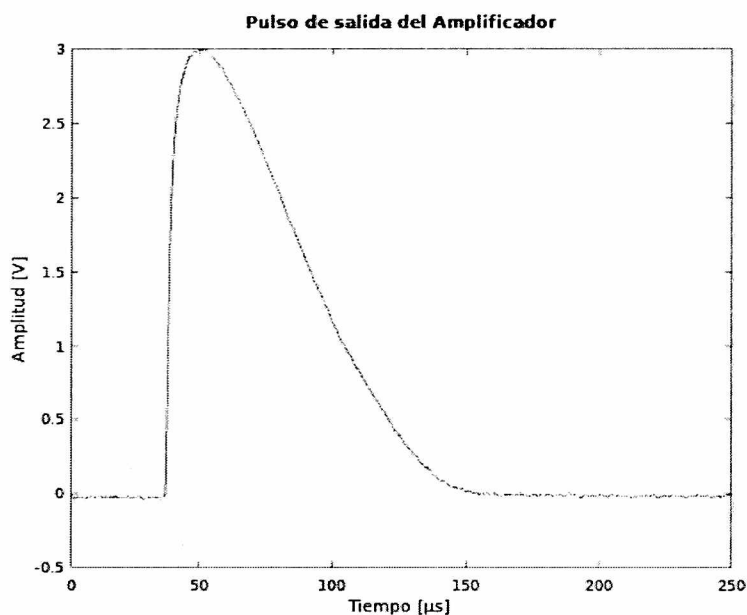


Figura 3.12: Pulso conformado.

El circuito amplificador conformador además filtra las fluctuaciones de la fuente de alta tensión. Estas fluctuaciones son debidas a que la fuente es conmutada y las variaciones de su señal de control, PWM, pasan a la salida. El gráfico inferior de la figura 3.13 muestra como se ven dichas variaciones en la entrada del amplificador, al comparar con la señal del gráfico superior de dicha figura se observa el sincronismo de ambas señales.

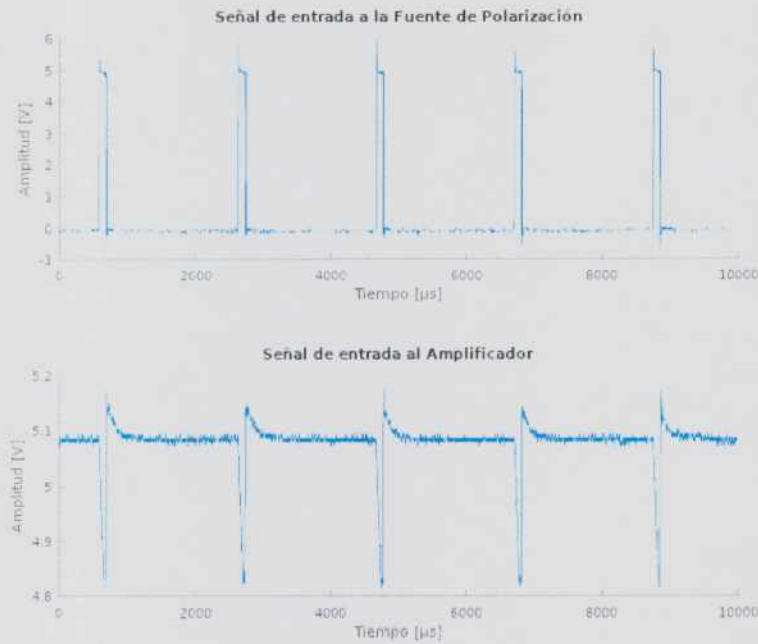


Figura 3.13: Señales de entrada al amplificador y a la fuente de polarización.

Sin embargo estos pulsos de variación en la tensión de fuente, no pasan a la entrada de conteo del microcontrolador ya que son discriminados por altura por el amplificador como se ve en la figura 3.14, captura de pantalla del osciloscopio cuyo canal 1, CH1 está conectado a la salida del amplificador, y cuyo canal 2, CH2 está conectado a la salida del detector. La señal del CH2 se muestra en verde y la del CH1 en naranja. La señal del detector tiene pulsos detectados (en este caso 2) y pulsos de variación de fuente (5 pulsos periódicos), sin embargo en la señal del amplificador solo se observan los producidos por la detección de partículas y no se observan los debidos a la fluctuación de la fuente de polarización.

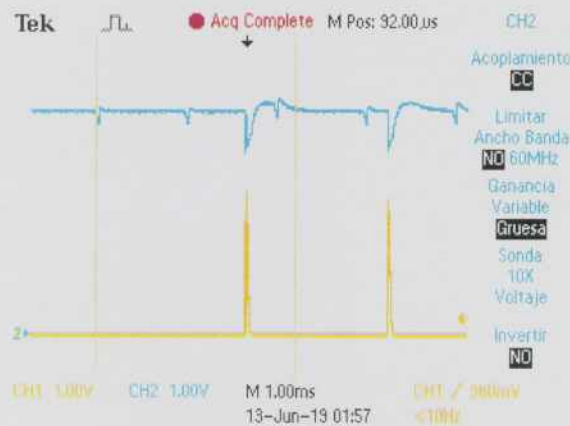


Figura 3.14: Discriminación de las oscilaciones de la fuente.

Interfaz LoRa

El módulo LoRa utilizado para las unidades de procesamiento fue LoRa1278 debido a que sus parámetros son más fácilmente configurables que para el caso del UM402. Los pines utilizados fueron VCC, GND, SCK, NSS, NRESET, MISO y MOSI, conectados al microcontrolador tal como se aprecia en el cuadro 3.2.

Pin Microcontrolador	Pin LoRa1278
9	NRESET
10	NSS
11	MOSI
12	MISO
13	SCK
5 V	VCC
GND	GND

Cuadro 3.2: Conexión entre el microcontrolador y la interfaz LoRa.

3.1.3. Costo de una unidad de procesamiento

Una variable importante en el diseño es el costo, los módulos fueron contruidos usando componentes de bajo costo, con amplia disponibilidad en el mercado local y de fácil montaje (inserción) para facilitar el armado de los prototipos. El cuadro 3.3 muestra los costos de los componentes dando un total por unidad de \$2900, el cual resulta bajo para el tipo de desarrollo. Además dichos costos podrían ser disminuidos considerablemente en el caso de fabricar series de decenas de unidades. Es importante destacar que estos costos no contemplan el armado de las unidades (placas experimentales, cables) ni el detector. Un precio aproximado de un detector tipo Geiger-Müller ronda los U\$S 100.

Componente	Cantidad	Costo unitario [\$]	Costo[\$]
Módulo de RF Lora1278	1	700	700
Procesador ATmega328P	1	300	300
Conector BNC	1	100	100
Capacitores de alta tensión	10	100	1000
Placa Experimental	1	200	200
Inductor	1	200	200
Transistor de alta tensión	1	150	150
Componentes varios*	1	250	250
Total			2900

Cuadro 3.3: Costo de una unidad de procesamiento.

*Componentes varios: transistores, resistencias y diodos de propósito general.

3.1.4. Topología de Red

La topología de la red implementada es en estrella, donde hay una estación base que tiene comunicaciones punto a punto con los nodos de la red. Para aumentar el alcance, a su vez cada nodo de la red a puede formar otra red estrella con el mismo haciendo de repetidor. Este mecanismo está soportado mediante un comando de retransmisión que es descrito más adelante. La figura 3.15 muestra la topología estrella simple y la figura 3.16 muestra como sería la topología cuando se usan nodos como repetidores.

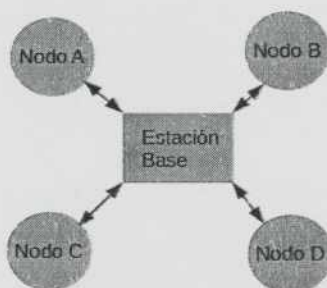


Figura 3.15: Topología de red estrella.

En caso de grandes áreas mediante los comandos de repetición, desde cada nodo se puede montar una red estrella y así aumentar la cobertura.

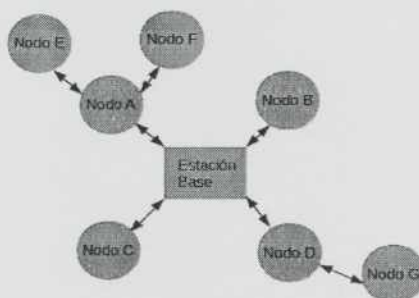


Figura 3.16: Topología de red estrella con repetidores.

En el caso del AGE y para los puntos de muestreo seleccionados solo se necesitó un repetidor. La figura 3.17 muestra la disposición de las unidades en el AGE, donde R es el punto de ubicación del repetidor.

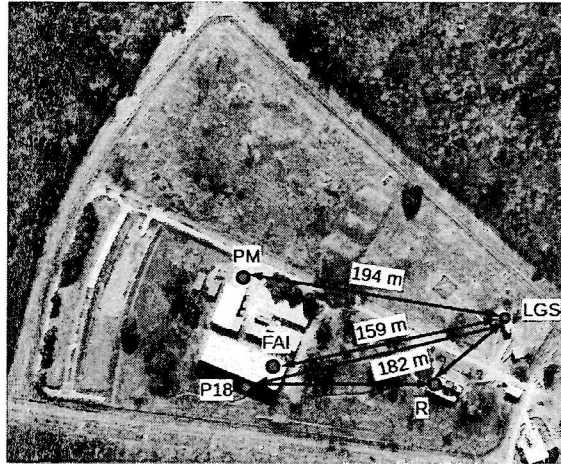


Figura 3.17: Imagen satelital del predio con los puntos de muestreo: FAI, P18 y PM y sus respectivas distancias hasta la estación base LGS. En el punto R se ubicó un repetidor.

3.1.5. Parámetros de Comunicación en Radio Frecuencia

Se conectó mediante cables jumper las antenas LoRa1278 a los módulos Arduino Uno. A su vez se conectó cada módulo a la PC, mediante cables USB, para configurar los. Para los experimentos que siguieron se configuró un dispositivo como transmisor, que luego de ser configurado se conectó mediante cables USB a un Power Bank, y otro como receptor, que permaneció siempre conectado a la PC. La configuración de ambos dispositivos y la lectura de los mensajes recibidos por el receptor se realizó a través de Arduino IDE. La frecuencia utilizada para todos los experimentos es de 433.175 MHz. El CR para todos los experimentos, tanto para transmisor como receptor, se mantuvo fijo en 4/5 para maximizar la tasa de datos. La potencia de la antena transmisora se mantuvo en su valor por defecto (17 dB).

La bibliografía consultada[14] señala que al aumentar el SF mejoraría la relación señal ruido. Para analizar la relación entre SNR y SF se realizó la medición de la SNR de 100 mensajes recibidos. Se midió la SNR utilizando una función de la librería LoRa de Sandeep Mistry, disponible en la plataforma de desarrollo de código GitHub. Dicha función es “packetSnr”, que devuelve la Relación Señal Ruido de cada mensaje recibido. Todos estos mensajes fueron idénticos de valor “1” transmitidos separados por un período de 0.1 s. Las antenas se separaron una distancia de 1 m. Los parámetros configurables de ambos dispositivos, SF y BW, fueron tomando todos los valores posibles y se muestran junto con el resultado de la SNR promedio para cada una de las 100 mediciones en el cuadro del anexo. En la figura 3.18 se graficaron los distintos valores de la Relación Señal Ruido promedio del mensaje recibido, con su incerteza asociada, en función del Factor de Propagación.

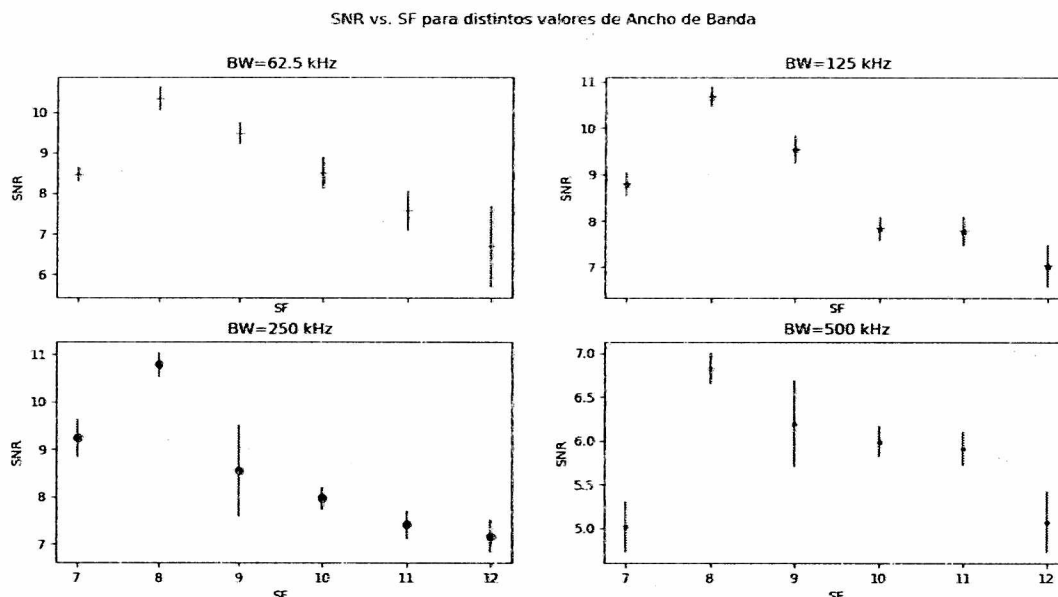


Figura 3.18: SNR promedio para 100 mensajes recibidos, para todas las combinaciones posibles de BW y SF.

3.1.6. Protocolo de Comunicación

El protocolo de comunicación está implementado mediante tramas de datos de largo fijo. Se eligió esto debido a que facilita la implementación. Todas las tramas tienen la misma forma. Una marca de inicio, `StartOfFrame`, (SOF, 1 byte), un campo de dirección de origen (1 byte), un campo de dirección de destino (1 byte), seguida de los datos y una marca de finalización, `EndOfFrame`, (EOF, 1 byte). Los campos de datos son 5 bytes, donde el primero es el comando, `CMD`, y los cuatro restantes los parámetros del comando en cuestión.

Un byte es una unidad de memoria que puede tomar cualquier número entero comprendido entre 0 y 255. Una manera de representar un byte, aceptada por el compilador Arduino IDE, es la del sistema hexadecimal. En este sistema los números se representan con los siguientes símbolos: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E y F. Así el byte 0 se representa como `0x00`, el byte 255 como `0xFF` y el byte 179 como `0xB3`.

La dirección de origen es la dirección de quien envía la trama, y la dirección de destino es a quien se envían los datos. Los paquetes LoRa llegarán a todos los dispositivos que se encuentren dentro del alcance de la estación base, es decir, varias unidades de procesamiento podrían recibir el paquete de datos, por lo que cada unidad debe chequear el campo dirección de destino para detectar si el paquete está dirigido a la unidad en cuestión. El campo de dirección de origen es para saber hacia quién debe estar dirigida la respuesta.

Cuando una unidad recibe un paquete dirigido a ésta, validará la consistencia de la trama y en caso de ser correcta ejecutará el comando solicitado, respondiendo a la

dirección desde la cual fue solicitado. Los comandos implementados son: prender la fuente, apagar la fuente, configurar la tensión de polarización, configurar la amplitud de la ventana de conteo, pedir la tasa de conteo y retransmitir el paquete. A continuación se describen las tramas para estos comandos para unidades con direcciones 0x01, estación base, y 0x02, nodo de detección.

Pedido de Cuentas

En el cuadro 3.4 1) se muestra un pedido de cuentas y su respuesta. La respuesta FLAG_NEW, es para indicar si el dato fue enviado con anterioridad. Esta situación se puede dar dado que la ventana de conteo puede ser más larga que el tiempo entre pedidos de la estación base a la unidad de detección, por lo que se leería más de una vez el mismo dato. Si FLAG_NEW es 1, significa que ese dato nunca fue enviado, por lo que es un dato válido, sin embargo si FLAG_NEW es 0 significa que al pedido de tasa de conteo original ya se respondió y hubo un nuevo pedido de cuentas siendo que aún la unidad de detección no tiene un dato nuevo (porque aún no terminó la ventana de conteo).

Configuración de Alta Tensión

En el cuadro 3.4 2) se muestra un pedido de configuración de Alta Tensión, AT, y su respuesta. Lo que se envía es el ciclo de actividad de PWM. La respuesta al comando configuración de alta tensión es un eco del comando enviado con las direcciones cruzadas.

Los comandos Prender AT y Apagar AT, son un caso especial del comando anterior, donde en el caso de Apagar AT configura el ciclo de actividad con el valor 0, y en el caso de Prender AT, se configura el ciclo de actividad por defecto de la unidad de procesamiento, o bien el ultimo valor configurado. Las respuestas en ambos casos con un eco del comando enviado con las direcciones intercambiadas.

Configuración de Ventana de Conteo

En el cuadro 3.4 3) se muestra un pedido de configuración de ventana de conteo y su respuesta. En este caso se envía el valor de tiempo en unidades de 100 ms, este es el tiempo durante el cual la unidad de conteo acumula cuentas. La respuesta es un eco del comando con las direcciones intercambiadas.

Retransmisión

En el cuadro 3.4 4) se muestra un pedido de retransmisión y su respuesta. Este comando permite aumentar el alcance (área de cobertura) de la red de sensores. La idea es que las unidades de procesamiento, en caso de recibir este comando, se comportan como repetidores direccionados, ya que en el campo de datos tiene la dirección de a qué nodo le debe retransmitir el paquete. Cuando una unidad recibe este comando, reenvía el comando solicitado a la dirección final, espera la respuesta y una vez que recibe la respuesta la retransmite a la estación base.

Es importante aclarar que varias características de la capa física LoRa, no son utilizadas, esto se debe a que en un futuro las unidades, no solo usarán esa capa física sino que además podrían usarse: RS232, RS485, Ethernet, Wi-Fi y Bluetooth. Dependiendo

de las necesidades y características de los distintos puntos de muestreo. Es por esto que se utiliza lo básico de este medio de comunicación, la idea es que el protocolo sea lo menos dependiente posible del medio de enlace utilizado.

Finalmente es importante indicar que el protocolo permite direccionar 253 nodos, ya que los campos de dirección son de 1 byte, pero las direcciones "0" y "255", se dejan para usos especiales no implementados aún y la estación base consume una dirección, quedando 253 de las 256 posibles combinaciones de un byte.

SOF		DIR	O	DIR	D	DATOS		EOF	
		CMD		Param#1	Param#2	Param#3	Param#4		
1)Ped	0xA5	0x01	0x02	0x30	No Aplica	No Aplica	No Aplica	No Aplica	0x5A
1)Res	0xA5	0x02	0x01	0x30	FLAG_NEW	EVENT_COUNT	No Aplica	No Aplica	0x5A
2)Ped	0xA5	0x01	0x02	0x31	SET_POINT	No Aplica	No Aplica	No Aplica	0x5A
2)Res	0xA5	0x02	0x01	0x31	SET_POINT	No Aplica	No Aplica	No Aplica	0x5A
3)Ped	0xA5	0x01	0x02	0x32	TIME	No Aplica	No Aplica	No Aplica	0x5A
3)Res	0xA5	0x02	0x01	0x32	TIME	No Aplica	No Aplica	No Aplica	0x5A
4)Ped	0xA5	0x01	0x02	0x33	DIR_FINAL	Param#1	Param#2	Param#3	0x5A
4)Res	0xA5	0x02	0x01	0x33	DIR_FINAL	Param#1	Param#2	Param#3	0x5A

Cuadro 3.4: Pedidos de la estación base, Ped, y Respuestas de los nodos de detección, Res.

3.1.7. Firmware

El programa que corre en el microcontrolador, firmware, fue programado utilizando la herramienta Arduino IDE. El firmware tiene tres tareas: controla la fuente de alta tensión, procesa la señal de pulsos estimando su tasa y atiende los pedidos de comandos, los procesa y responde. Las tareas son independientes y están sujetas a distintos condicionamientos de tiempo y de carga del procesador.

Generación de la señal de control de la fuente de alta tensión

El microcontrolador genera la señal de PWM para la fuente de alta tensión, esta señal es de 490 Hz con un ciclo de actividad de 5 %. Si bien esta es la configuración por defecto (para lograr 500 V), el ciclo de actividad es configurable mediante comandos, los que permiten tanto apagar y prender la fuente y como modificar el valor de tensión alcanzado por la misma.

Contador de pulsos

Esta es la tarea mas crítica, está implementada mediante interrupciones ya que necesita tener precisión en el período de conteo y no debe ser interferida por la tarea de comunicación. El conteo de pulsos se realiza mediante interrupciones tanto para detectar un evento como para medir el tiempo de conteo sin tener variaciones debido a la carga de tareas del procesador. De manera periódica el sistema arranca una ventana de tiempo de 1 segundo (valor configurable por el usuario desde la estación base), cuando esta ventana se inicia se pone en cero la variable EventCount. Además se configura un pin como entrada de interrupción al microcontrolador, se ha utilizado el pin 2. Cada vez que en dicha entrada se produzca un pulso se llamara a una función de C que incrementará la variable en una unidad. Esta entrada estará conectada a la salida del conformador de pulsos, haciendo que cada detección de un evento gamma produzca el incremento de la variable de conteo. Cuando se vence el plazo de la ventana de tiempo, se copia la variable EventCount en EventCount_Latch, se vuelve a poner en cero y se inicia una nueva ventana de conteo, por lo tanto, en caso de que haya un pedido de cuentas el sistema responderá con el valor de la variable EventCount_Latch, que tiene guardada la medición de la última ventana de tiempo.

Dichas acciones se ejecutan en el dominio de las interrupciones y por lo tanto tienen prioridad por sobre el resto del código que corre en el microcontrolador, como la tarea que mantiene el protocolo de comunicación, el cual corre en el bucle principal de código y es una tarea que implica mucha carga de procesamiento. La figura 3.19 muestra un esquema de funcionamiento del conteo.

Para probar la capacidad de conteo del contador de pulsos, se utilizó un generador desarrollado en CNEA[24], el mismo permite generar una señal de pulsos aleatoria con tiempo entre eventos siguiendo una distribución exponencial, lo que da una distribución en el conteo tipo Poisson (distribución típica en los experimentos de conteo de detección nuclear salvo algunas excepciones). Dicho equipo permite configurar la tasa deseada y la duración del pulso. Las pruebas realizadas arrojaron como resultado que la capacidad de conteo excede ampliamente el régimen de cuentas por segundo a procesar

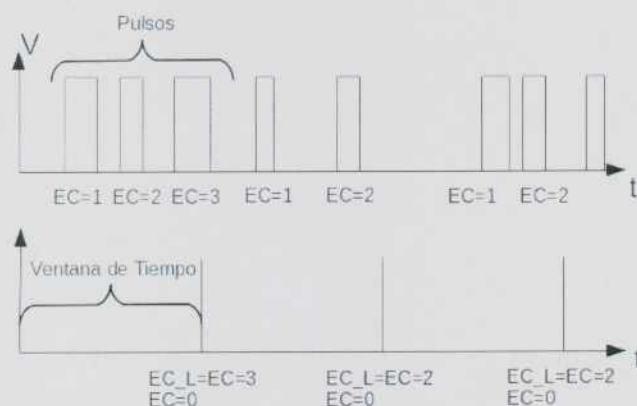


Figura 3.19: Esquema de funcionamiento del conteo: EC simboliza EventCount y EC.L simboliza EventCount_Latch.

para los detectores utilizados (para el detector LND-713 es inferior a 10^4 cps y para el detector LND-7224 es inferior a 10^3 cps [21,22]); sin embargo este resultado es interesante ya que en un futuro dicha unidad contadora puede ser utilizada con detectores más rápidos, como por ejemplo centelladores.

La figura 3.20 muestra una captura de la señal generada, donde se puede ver su aleatoriedad, en este caso el generador fue configurado en 55 keps y la duración del pulso en $2.5 \mu\text{s}$.



Figura 3.20: Captura de la señal generada por el generador de pulsos CNEA E023-A0.

La figura 3.21 muestra la interfaz de configuración del generador de pulsos, donde se aprecia que el mismo se configuró con un perfil de cuentas en escalera que va de 5000 a 60000 cps con incrementos de 5000 cps. La figura 3.22 muestra la tasa medida por la unidad de procesamiento, con su incerteza asociada, para la medición de los pulsos que salen del generador. Se observa como la unidad responde a cada incremento de

frecuencia.

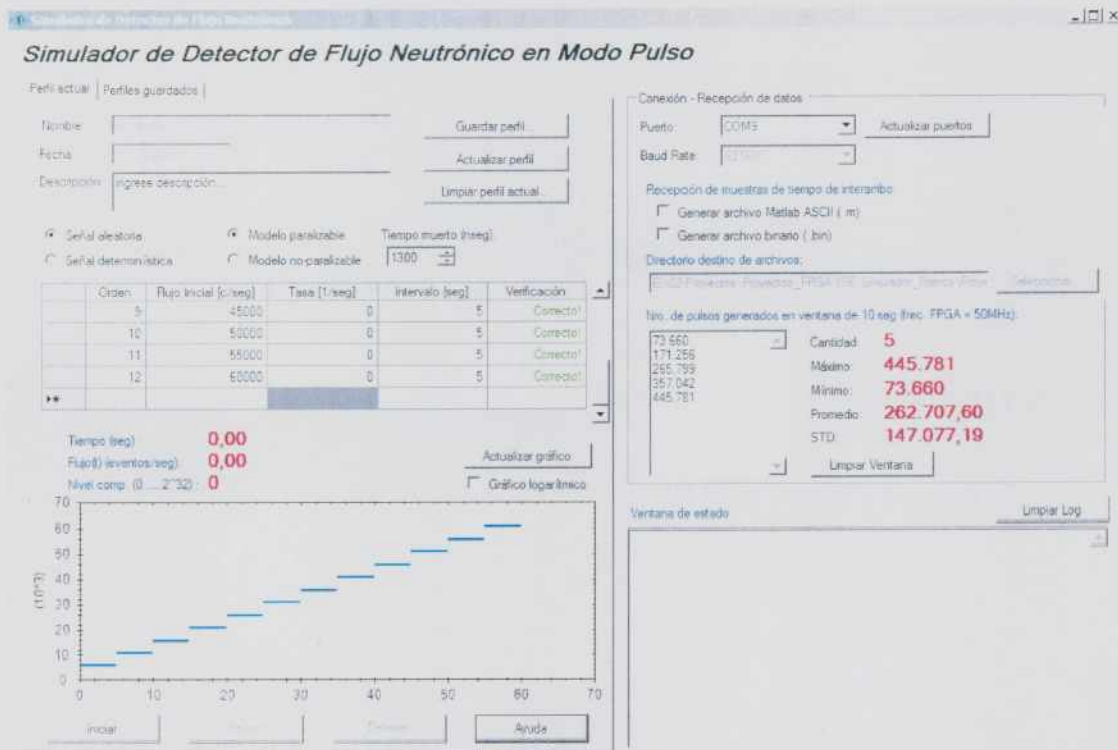


Figura 3.21: Captura de pantalla de la interfaz del generador de pulsos.

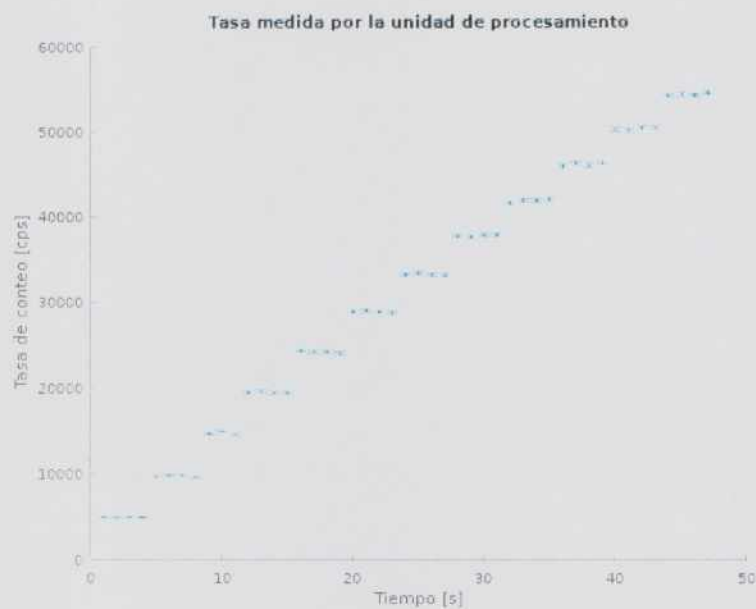


Figura 3.22: Respuesta de la unidad de procesamiento a pulsos del generador.

Interfaz y protocolo de comunicación

La parte encargada de mantener la comunicación se ejecuta en el bucle principal del código. En todo momento está preguntando si hay nuevos datos, esto significa que la antena LoRa está configurada en Modo C. Cada vez que llegan datos por la interfaz LoRa se chequea si se tiene una trama completa. Una vez completada la trama se verifica su validez (consistencia del comando con los parámetros, integridad de los datos). Si la trama es válida se procede a su procesamiento, por ejemplo podría ser un pedido de tasa, en ese caso el sistema responde con el último valor de tasa medido. La figura 3.23 muestra el diagrama de flujo de la tarea que atiende el protocolo y como fue dicho se ejecuta en el bucle principal del programa.

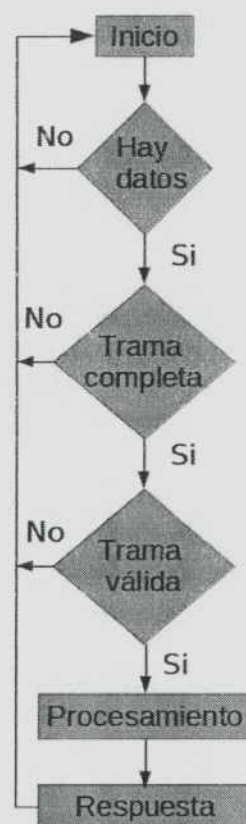


Figura 3.23: Diagrama de flujo del bucle principal del firmware.

3.1.8. Software de estación base

La estación base es el software de PC encargado de comunicarse con los nodos de la red, permitiendo la visualización, almacenamiento de datos y configuración de los parámetros de los distintos nodos de la red. Mediante un puerto se comunica con un transceiver de interfaz USB a LoRa. Está desarrollado en lenguaje C# utilizando la herramienta VisualStudio de Microsoft. En el desarrollo se utilizaron librerías desarrolladas previamente en el Laboratorio Gamma Escáner. Como ha sido mencionado

con anterioridad, este sistema será integrado a otros previamente desarrollados para el AGE, por lo que se trató que la interfaz gráfica sea similar tanto visualmente como funcionalmente, a la de otras aplicaciones de control de dicha instalación.

Si bien el sistema diseñado permite manejar una red de hasta 253 nodos, la interfaz gráfica se implementó para una red de dos nodos solamente dado que se fabricaron 3 prototipos pero se dispuso de 2 detectores. Por lo que de las tres unidades: una se utilizó como repetidor y las dos restantes como nodos de detección.

El sistema permite enviar comandos individuales a cada nodo. Esto se utiliza para la configuración de los mismos. Para monitoreo en línea, se define el período con el que la aplicación pide a los nodos las cuentas y la aplicación genera de manera periódica dicho pedido a todas las unidades seleccionadas. Además el software guarda los datos de las mediciones con información temporal (fecha y hora) de cada medición en un archivo de texto para procesarlos posteriormente. El programa también muestra el histograma de tasa para cada nodo, dicha característica será útil en un futuro para definir niveles de alarma. La red implementada cuenta con dos nodos de detección. En la figura 3.24 se muestra una captura de pantalla de la interfaz gráfica de usuario y a continuación de dicha figura se describen las principales opciones de la aplicación.

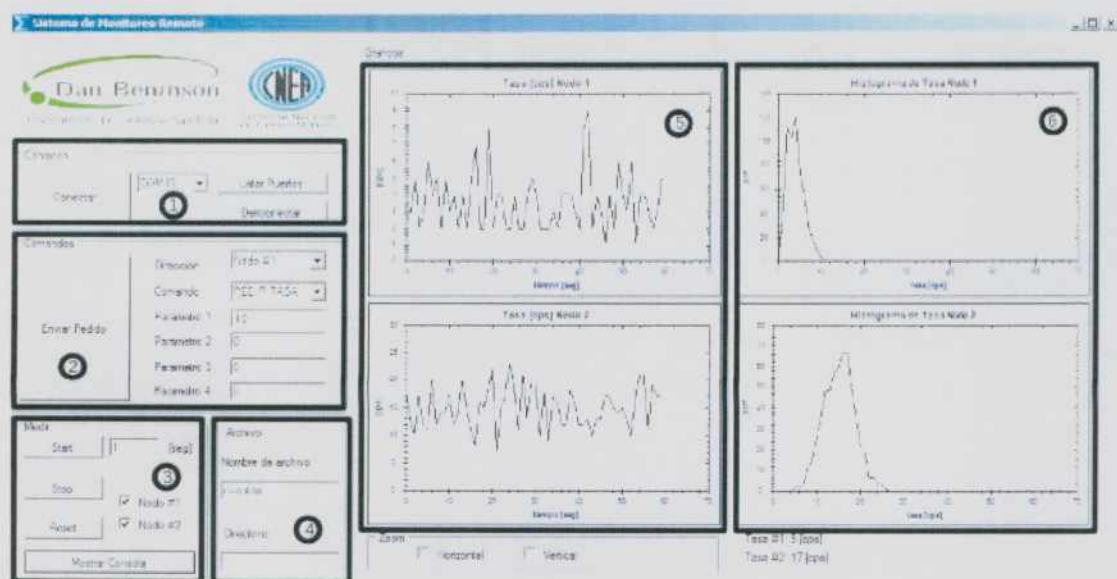


Figura 3.24: Captura de pantalla de la interfaz gráfica con sus partes principales marcadas.

- 1) Conexión con el transeiver LoRa mediante puerto USB.
- 2) Envío de comando individual a un nodo: nodo 1 o nodo 2.
- 3) Envío de pedidos de tasa de conteo, de manera continua con el período configurable, a ambos nodos.

- 4) Exportación de archivos de texto con los valores de tasa de conteo.
- 5) Gráfica de tasa de conteo en función del tiempo que se actualiza con el período configurado, para ambos nodos.
- 6) Histograma de tasa de conteo que se actualiza con el período configurado, para ambos nodos.

Capítulo 4

4.1. Prueba del sistema en el AGE

Finalmente con el sistema desarrollado y testeado en laboratorio, se realizaron mediciones en campo. Para esto se seleccionaron dos puntos reales del plan de monitoreo, Punto 18 que se encuentra en un lateral de la Facilidad de Almacenamiento Interino, FAI, y el punto de la Playa de Maniobras, PM. Además se realizó una medición con ambos nodos dentro de FAI. La estación base se ubicó dentro del Laboratorio Gamma Escáner, LGS.

4.1.1. Mediciones

La primera red implementada se compone de la estación base y dos nodos de detección ubicados en la misma posición de la FAI que se muestra en la figura 3.17, esto se hizo para probar la red y por otro lado para comparar la eficiencia de los detectores. Los parámetros establecidos para las antenas LoRa son los siguientes:

$$DR = 6250 \text{ bps} \left\{ \begin{array}{l} CF = 433,175 \text{ MHz} \\ SF = 8 \\ BW = 250 \text{ kHz} \\ CR = 4/5 \\ \text{Potencia Tx} = 20 \text{ dB} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Se eligió la máxima potencia transmisora, la frecuencia portadora se mantuvo en el mismo valor que en el experimento de comunicación anterior al igual que la CR, y los valores de BW y SF son los que optimizan la SNR según la observación de los gráficos de figura 3.18. Si bien para SF=8 son similares los valores de SNR obtenidos con BW=125 kHz y BW=250 kHz, se eligió la segunda opción porque representa un menor tiempo de transmisión. La disposición de los nodos dentro de la FAI se aprecia en la figura 4.1 a). Se configuró la ventana de medición en un segundo y se midió la tasa de conteo por segundo durante 500 s en simultáneo para ambos nodos, se exportaron las mediciones para luego ser procesadas mediante la plataforma Octave. El promedio de la tasa de conteo medida por el nodo 1 es 4.6 ± 1.8 cps y para el nodo 2 es 11.1 ± 3.5 cps. Esto es coherente con el hecho de que el tubo de Geiger-Müller del nodo 2, LND-7224, es de volumen activo superior al del nodo 1, LND-713. Se aprecia la tasa de conteo medida por el nodo de detección 1 y por el nodo detección 2 en función del tiempo en

la figura 4.2.

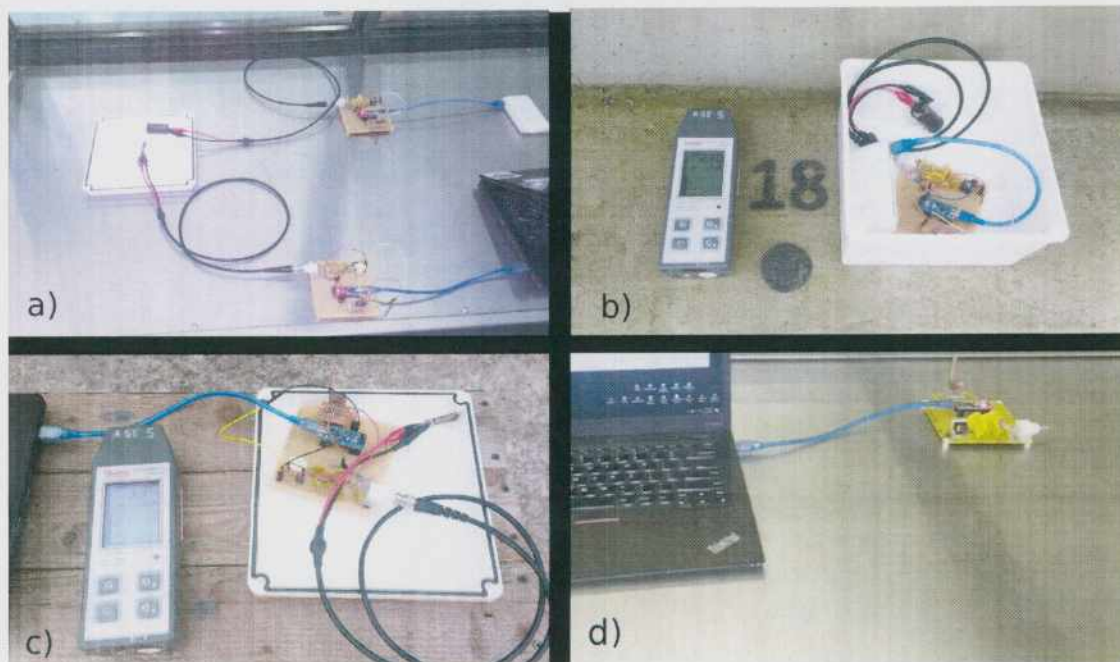


Figura 4.1: Disposición de las unidades: a)FAI, b)Punto 18, c)Playa de Maniobras y d)Repetidor.

Luego se distribuyeron los nodos de detección en puntos de medición de tasa de dosis distintos, primero se ubicó el nodo 2 en el Punto de Monitoreo 18, P18, tal como se aprecia en figura 4.1 b). Para lograr establecer la comunicación entre la estación base y el nodo 2 se ubicó un nodo repetidor, R, subfigura d) en la figura 4.1. Si bien, la distancia entre la estación base y el Punto de Monitoreo 18 es menor que la distancia establecida entre la estación base y la Playa de Maniobras, entre el nodo 2 y la estación base se interponen dos paredes de hormigón que imposibilitan la comunicación.

Se midió la tasa de conteo por segundo para el nodo 2 durante casi 1000 segundos y el resultado se muestra en la figura 4.3. La tasa de pulsos medida por el nodo 2 es 8.4 ± 2.8 cps.

Simultáneamente con el nodo 2 midiendo el punto 18, se posicionó en el nodo 1 en la Playa de Maniobras tal como se muestra en la figura 4.1 c). Se midió la tasa de conteo por segundo para el nodo 1 durante alrededor de 2 minutos, y el resultado se muestra en la figura 4.4. La tasa de pulsos medida por el nodo 2 es de 3.2 ± 2.1 cps.

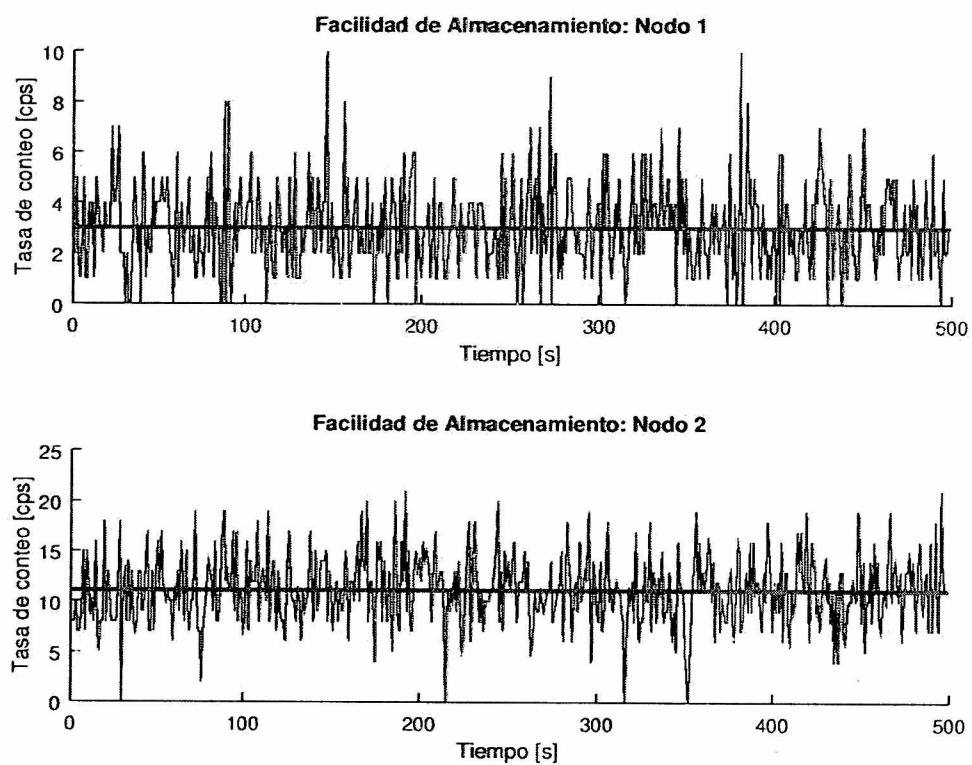


Figura 4.2: Tasa de conteo en función del tiempo medida en la FAI.

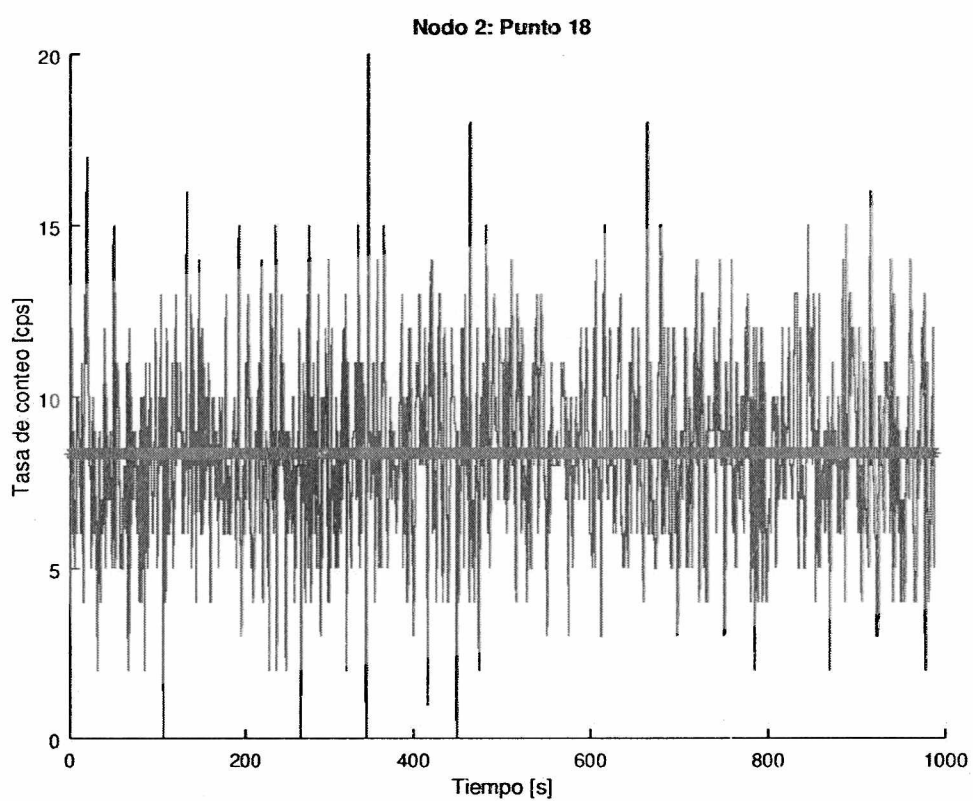


Figura 4.3: Tasa de conteo en función del tiempo medida por el nodo 2 en el Punto 18.

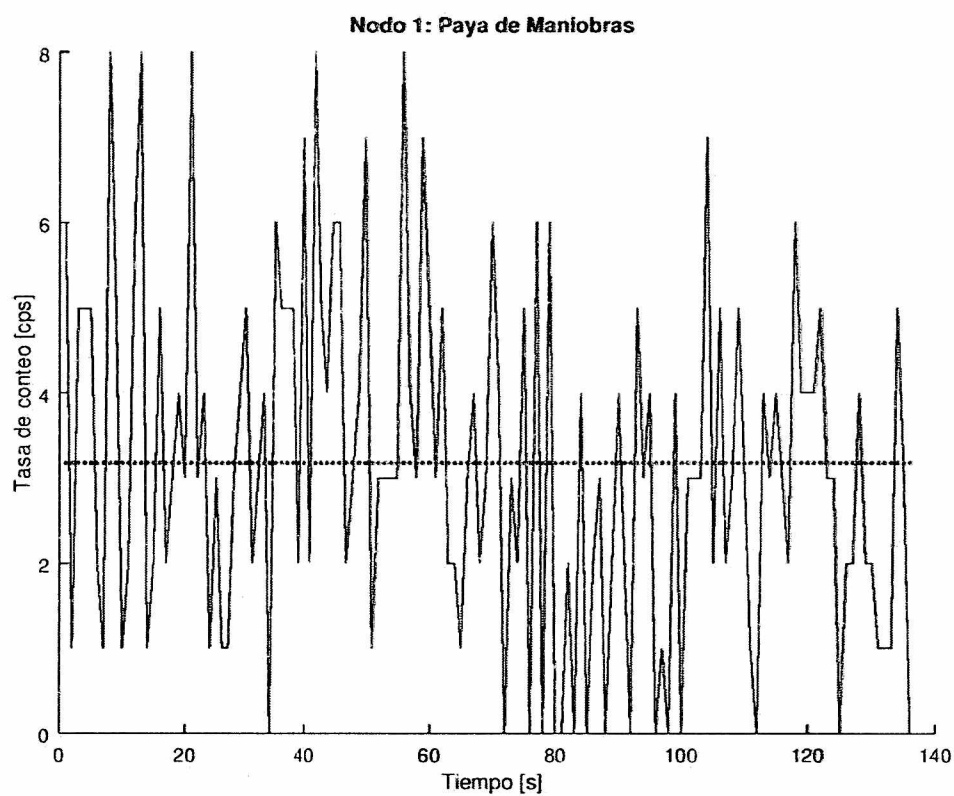


Figura 4.4: Tasa de conteo en función del tiempo medida por el nodo 1 en la Playa de Maniobras.

Conclusiones

El sistema desarrollado cumple con los objetivos planteados. Se pudieron construir las tres unidades de procesamiento propuestas. Si bien solo dos se utilizaron para detección ya que se contaba solamente con dos tubos Geiger-Müller la restante se utilizó como retransmisor. El desarrollo se basó completamente en componentes y elementos de muy bajo costo, mas aún teniendo en cuenta que es para una aplicación del ámbito nuclear. En cuanto al protocolo desarrollado, si bien es sencillo y limitado (en cuanto al uso de la capa física del medio de comunicación utilizado) cumple con las necesidades del sistema y permite cubrir el área de interés con holgura mediante la técnica de retransmisión. Las mediciones realizadas tanto de laboratorio como de campo dieron resultados satisfactorios en cuanto a lo que se esperaba. El software desarrollado si bien está limitado al uso de dos unidades de detección puede ser fácilmente ampliado para el control de más unidades para su futura aplicación.

Referencias

- [1] Aranda, G. D., Martínez Garbino, L. J. "Implementación de un sistema de control dosimétrico basado en EPD para el Área de Gestión de Ezeiza". XLIV Reunión Anual de la AATN, Buenos Aires, Argentina, 23 al 27 de octubre de 2017.
- [2] Aranda, G. D., Fabbro, M., Martínez Garbino, L. J. "Sistema de Adquisición y Control de Información Dosimétrica". XLIII Reunión Anual de la AATN, Buenos Aires, Argentina, 21 al 25 de noviembre de 2016.
- [3] Portal Vehicular para el Ingreso al Área de Gestión Ezeiza, Documento interno Laboratorio Gamma Escáner.
- [4] Sistema informático con geolocalización para el "Plan de Monitoreo de Área" del Área de Gestión Ezeiza. Documento interno laboratorio Gamma Escáner.
- [5] Romano S., Silari M., Curioni A., Murtas F. "A distributed network of sensors for real-time remote control of radioactivity and radiation". ESC-2017, Strasbourg. Año 2017.
- [6] Müller Yane A., Liendo H. Director: Martínez Garbino, L. J. "Diseño e Implementación de un amplificador de pulsos". Año 2017.
- [7] Müller Yane A. Director: Alarcón, J. E. Co-Director: Martínez Garbino, L. J. "Implementación de un Contador Geiger-Müller portátil con conectividad vía Wi-Fi". Año 2018.
- [8] Carrillo M. A., Rodrigues D., Id Betan R., Orso J., Ugo F., Ruarte R., Villavicencio F., Straube B., Müller Yane A. "Experiencias interactivas para la divulgación de aplicaciones de la Física Nuclear". Reunión Anual AFA 2018.
- [9] Müller Yane A. Director: Martínez Garbino, L. J. Co-Director: Alarcón, J. E. Estudio de Antenas LoRa. Año 2018.
- [10] E. Maset. "Gestión de Residuos Radiactivos: desafíos actuales". Jornadas Nacionales de Protección Radiológica. Año 2012.
- [11] "Publicación 103. Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica". Año 2007.
- [12] "ARN 10.1.1. Norma Básica de Seguridad Radiológica". Año 2016.
- [13] Knoll, G. F. "Radiation Detection and Measurement", 3ra edición.
- [14] M. Bor, J. Vidler, U. Roedig. "LoRa for the Internet of Things. International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks". Año 2016.
- [15] Semtech Corporation. "Application Note 1200.22 LoRa Modulation Basics". Mayo, 2015.
- [16] NiceRF Wireless Technology Co. Hoja de datos de Lora1278. Edición 2.2.
- [17] Manthink. Hoja de datos: UM402. Introduction, 1.65.
- [18] N. Sornin, M. Luis, T. Eirich, T. Kramp, O. Hersent. "LoRaWAN Specification". Edición 1.0. Año 2015.

- [19] FUOTA Working Group of the LoRa Alliance Technical Committee. "LoRaWAN Fragmented Data Block Transport Specification."
- [20] M. Rashid. "Electrónica de Potencia", 4ta edición, Pearson Education. ISBN 9786073233255. Año 2013.
- [21] Nuclear Radiation Detectors. Hoja de datos: LND-713. 13 de mayo de 2019.
- [22] Nuclear Radiation Detectors. Hoja de datos: LND-7224. 13 de mayo de 2019.
- [23] R. Tocci. "Sistemas Digitales: Principios y Aplicaciones". Prentice Hall.
- [24] Memoria descriptiva del Software U089-1.0 para comandar el equipo Generador de Pulsos Aleatorios para Emulación de Cadena de Medición Neutrónica (E023-A0)

Anexo

.1. Abreviaturas

AES Advanced Encryption Standard (Estándar de Encriptado Avanzado)
AGE Área Gestión de Ezeiza
ARN Autoridad Regulatoria Nuclear
AT Alta Tensión
BW Band Width (Ancho de Banda)
CAE Centro Atómico Ezeiza
CAM Código de Autenticación de Mensajes
CERN European Organization for Nuclear Research (Organización Europea para la Investigación Nuclear)
CF Carrier Frequency (Frecuencia Portadora)
CNEA Comisión Nacional de Energía Atómica
CR Code Rate (Relación de Código)
CRC Chequeo de Redundancia Cíclica
CSS Chirp Spread Spectrum (Sistemas de Frecuencia Modulada Pulsada)
DR Data Rate (Tasa de Datos)
DSSS
Direct Secuency Spread Spectrum (Espectro Ensanchado por Secuencia Directa)
EOF End Of Frame (Fin de Trama)
FAI Facilidad de Almacenamiento Interino
FEC Forward Error Correction (Corrección de Errores Hacia Adelante)
FSK Frequency Shift Keying (Modulación por Desplazamiento de Frecuencia)
GND GrouND (Tierra)
GPIO General Purpose Input Output (Entrada/Salida de Propósito General)
IDE Integrated Development Environment (Entorno de Desarrollo Interactivo)
I/O Input /Output (Entrada/Salida)
ISM Industrial, Scientific and Medical (Industrial, Científico y Médico)
LGS Laboratorio Gamma Escáner
LoRa Long Range (Largo Alcance)
LPWAN Low Power Wide Area Network (Red de Área Amplia de Baja Potencia)
MAC Media Access Control (Control de Acceso al Medio)
MCU Microcontroller Unit (Unidad de Microcontrolador)
MISO Master Input Slave Output (Salida de datos del Esclavo y entrada de datos al Amo)
MOSI Master Output Slave Input (Salida de datos del Amo y entrada de datos al

Esclavo)
NIST National Institute of Standards and Technology
NSS Network Switching Subsystem (Subsistema de Conmutación de Red)
PNGRR Programa Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos
PM Playa de Maniobras
PWM Pulse Width Modulation (Modulación de Ancho de Pulso)
RF Radio Frecuencia
Rx Recepción
SCK Serial ClocK (Reloj Serie)
SF Spreading Factor (Factor de Propagación)
SNR Signal to Noise Ratio (Relación Señal a Ruido)
SOF Start Of Frame (Inicio de Trama)
SPI Serial Peripheral Interface (Interfaz de Periféricos Serie)
TTL Transistor Transistor Logic (Lógica Transistor-Transistor)
Tx Transmisión
UART Universal Asynchronous Receiver Transmitter (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal)
UNSAM Universidad Nacional de San Martín
VCC Voltaje de Corriente Continua
WAN Wide Area Network (Red de Área Amplia)
W-MON Waste Bin MONitoring (Monitoreo de Cubos de Basura)

.2. Cuadro

BW [kHz]	7	8	9
62.5	8.47(0.18)	10.33(0.30)	9.48(0.28)
125	8.79(0.26)	10.67(0.22)	9.54(0.30)
250	9.24(0.40)	10.79(0.27)	8.56(0.97)
500	5.01(0.30)	6.83(0.18)	6.19(0.49)
	10	11	12
62.5	8.52(0.39)	7.58(0.50)	6.7(1.0)
125	7.84(0.26)	7.78(0.32)	7.03(0.47)
250	7.97(0.25)	7.41(0.31)	7.17(0.35)
500	5.99(0.18)	5.91(0.20)	5.07(0.36)

Cuadro 1: Relación señal ruido, con su incerteza asociada, en función del ancho de banda y el factor de propagación para antenas LoRa1278 separadas por 1 m.