



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

AUTOR: PAVÓN VALLEJOS, WILSON DAVID

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN
Y MONITOREO DE RADIACIÓN GAMMA PARA EL MINISTERIO DE
ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE**

DIRECTOR: ING. OROZCO, LUIS

CODIRECTOR: ING. PINEDA, FLAVIO

SANGOLQUÍ, FEBRERO 2014

CERTIFICADO

Ing. Luis Orozco

Ing. Flavio Pineda

CERTIFICAN

Que el trabajo titulado “Diseño e implementación de un Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma para el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable”, realizado por Wilson David Pavón Vallejos, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Debido a que se trata de un trabajo de investigación recomiendan su publicación.

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato de documento portátil (pdf). Autorizan a Wilson David Pavón Vallejos que lo entregue al Ingeniero Luis Orozco, en su calidad de Director de la Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control.

Sangolquí, 14 de febrero del 2014

Ing. Luis Orozco
DIRECTOR

Ing. Flavio Pineda
CODIRECTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

WILSON DAVID PAVÓN VALLEJOS

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado “Diseño e implementación de un Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma para el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie, de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 14 de febrero del 2014

Wilson David Pavón Vallejos

AUTORIZACIÓN

Yo, Wilson David Pavón Vallejos

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “Diseño e implementación de un Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma para el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 14 de febrero del 2014

Wilson David Pavón Vallejos

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas las personas que buscan cada día la felicidad y luchan por conseguirla. En especial a,

Mi Mami Susy, por su fortaleza y ser mi ejemplo de persona íntegra.

A Mari por compartir su amor.

A mis Hermanas Eri y Jessi, por estar siempre a mi lado y brindarme su amor.

A mi sobrinito Martín para que no se olvide lo importante de la vida.

A mis amigos.

Wilson David Pavón Vallejos

AGRADECIMIENTO

A Dios, por concederme la vida, permitirme lograr realizar este trabajo y llegar a este etapa de mi existencia porque sin su voluntad nada hubiera logrado.

A mis Padres, por su amor, apoyo y paciencia.

A Mari por apoyarme en la realización del proyecto.

A mis Asesores, por su confianza, compromiso y conocimiento en la realización del presente trabajo.

A todos los compañeros de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares por abrirme las puertas y permitirme realizar el presente proyecto.

Wilson David Pavón Vallejos

ÍNDICE

ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xx
RESUMEN.....	xxiii
ABSTRACT.....	xxiv
CAPÍTULO 1	1
SISTEMA DE DETECCIÓN Y MONITOREO DE RADIACIÓN GAMMA	1
1.1.DEFINICIÓN DEL PROYECTO	1
1.1.1.Antecedentes	1
1.1.2.Justificación e importancia.....	3
1.2.ALCANCE DEL PROYECTO	5
1.3.OBJETIVOS	7
1.3.1.Objetivos Generales	7
1.3.2.Objetivos Específicos.....	7
CAPÍTULO 2	8
ESTUDIO DEL ARTE DE LAS RADIACIONES IONIZANTES.....	8
2.1.RADIACIONES IONIZANTES	8

2.2.FÍSICA DE LAS RADIACIONES	10
2.3CLASIFICACIÓN DE LAS RADIACIONES	12
2.3.1.Partículas Alfa.....	13
2.3.2.Partículas Beta.....	13
2.3.3.Rayos Gamma	14
2.3.4.Neutrones	14
2.4.UNIDADES DOSIMÉTRICAS.....	15
2.4.1.Actividad (A)	15
2.4.2.Exposición (X)	16
2.4.3.Dosis Absorbida (D)	17
2.4.4.Dosis Equivalente (H).....	17
2.5.DAÑOS EN LOS SERES VIVOS.....	20
2.6.CUIDADOS Y MANEJO DE MATERIAL RADIATIVO.....	22
2.7.LÍMITES DE DOSIS INDIVIDUAL	25
2.8.FUENTES DE RADIACIÓN	25
2.8.1.Radón	27
2.8.2.Semiperíodo de Desintegración	27
2.9.DETECTORES DE RADIACIÓN IONIZANTE.....	29
2.9.1.Detectores Gaseosos.....	31
2.9.2.Detectores Semiconductores	32
2.10.EL DETECTOR GEIGER MÜLLER.....	32

2.10.1.Historia	34
2.10.2.Curva Plateau	35
2.11.ESTADÍSTICA DEL NÚMERO DE CUENTAS	37
CAPÍTULO 3	40
DISEÑO DEL SISTEMA DE DETECCIÓN Y MONITOREO DE RADIACIÓN GAMMA.....	40
3.1.BLOQUE DETECTOR DE RADIACIÓN	42
3.1.1.Tubo Geiger Müller.....	43
3.1.2.Fuente de Alto Voltaje de Corriente Directa.....	48
3.1.3.Acondicionamiento de Pulsos Nucleares	64
3.1.4.Diagrama de flujo del Detector de Radiación	73
3.1.5.Circuito Micro Procesado	76
3.1.6.Interfaz de Comunicación	90
3.1.7.Alimentación Eléctrica.....	102
3.1.8.Diseño Mecánico.....	111
3.1.9.Circuito Impreso.....	113
3.2.BLOQUE ADQUISICIÓN Y ALMACENAMIENTO	120
3.2.1.Diagramas de flujo	120
3.2.2.Diseño de la Interface Humano Máquina HMI.....	122
3.2.3.Base de Datos	127
CAPÍTULO 4	129

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN	129
4.1.PRUEBAS DEL DETECTOR DE RADIACIÓN	129
4.1.1.Implementación del Detector de Radiación	129
4.1.2.Fuente de Alto Voltaje	131
4.1.3.Acondicionamiento de Pulsos Nucleares	132
4.1.4.Sistema Micro procesado	136
4.1.5.Alimentación Eléctrica.....	138
4.1.6.Determinación de la Curva Plateau y tiempo muerto	140
4.1.7.Pruebas de Medición del Detector de Radiación	142
4.2.MANUAL DE USUARIO	154
4.3.COSTOS DEL PROYECTO.....	161
CAPITULO 5	162
CONCLUSIONES	162
RECOMENDACIONES	164
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	165
ANEXOS.....	171
Anexo 1. Caracterización del Transformador Elevador.....	171
Anexo 2. Diagrama de Flujo del bloque Detector de Radiación.....	176
Anexo 3. Diagrama de flujo del bloque de Adquisición y Almacenamiento.....	178
Anexo 4. Circuitos Electrónicos del Detector de Radiación.....	180
Anexo 5. Circuito Impreso del Detector de Radiación	186

Anexo 6. Listado de Componentes del Detector de Radiación.....	188
Anexo 7. Listado de Equipos Utilizados.....	190
Anexo 8. Certificado de Calibración del Detector de Radiación	192
Anexo 9. Carta de conformidad del trabajo de Tesis	194
GLOSARIO.....	196
DATA SHEETS	204
GM Tubo Geiger Muller LND 712.....	205
Q1 Transistor MOSFET IRF830.....	206
U1 Integrado 4049.....	207
U2 LM 7805	208
U3 Tarjeta Adaptadora XBee.....	209
U4 Integrado MAX232	210
U5 Microcontrolador PIC16F887	211
U6 Temporizador 555	212
U7 LM 317 T	213
U8 Módulos XBee.....	214
U9 XBee USB Adapter	215
U10 XStick.....	216
Carta de Responsabilidad.....	217

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1 Diagrama de bloques del Sistema.....	6
Figura. 2 Primera radiografía, realizada por Röntgen.....	9
Figura. 3 Diferencia entre ionización y excitación	11
Figura. 4 Tipos de radiación por la naturaleza penetrante o ionizante.....	12
Figura. 5 Capacidad de penetración de las partículas	13
Figura. 6 Equivalencias de unidades dosimétricas.....	19
Figura. 7 Clasificación de los daños en sistemas biológicos	21
Figura. 8 Organismos de Control de las Radiaciones Ionizantes.....	22
Figura. 9 Símbolo de radioactividad adoptado por el OIEA.....	23
Figura. 10 Medios de Protección en el manejo de fuentes de radiaciones ionizantes.....	24
Figura. 11 Curva de desintegración del uranio ²³⁸	28
Figura. 12 Clasificación de los detectores de radiación.....	30
Figura. 13 Detector Geiger Müller.....	33
Figura. 14 Símbolo Geiger Müller	34
Figura. 15 Curva Plateau del Geiger Müller	35
Figura. 16 Curva característica de la distribución de Poisson	37
Figura. 17 Partes constitutivas del Detector de Radiación.....	42
Figura. 18 Circuito equivalente del tubo GM	45
Figura. 19 Circuito del tubo Geiger Müller	46
Figura. 20 Circuito a implementarse con tubo GM.....	47

Figura. 21 Objetivo del Circuito de Alto Voltaje.....	49
Figura. 22 Diagrama de bloques de la fuente de alto voltaje	50
Figura. 23 Circuito de oscilador con compuertas CMOS	51
Figura. 24 Circuito de Pre-amplificación.....	54
Figura. 25 Filtro pasa altos de la etapa de pre amplificación.....	55
Figura. 26. Elementos para el circuito de Pre-amplificación	56
Figura. 27 (izq.) Circuito del IRF830., (der.) Resistencia Drain-Source	57
Figura. 28 (izq.) Símbolo del transformador con núcleo de ferrita, (der.) Símbolo del transformador elevador de voltaje	58
Figura. 29 Duplicador de voltaje de onda completa	61
Figura. 30. Regulación del circuito por medio de diodos zener.....	63
Figura. 31 Objetivo del circuito de acondicionamiento de pulsos nucleares	65
Figura. 32 Diagrama de bloques del circuito de Acoplamiento de Pulsos Nucleares.....	65
Figura. 33 Objetivo del circuito de acoplamiento	66
Figura. 34 Circuito de acoplamiento	67
Figura. 35 Objetivo del circuito inversor	68
Figura. 36 Diagrama esquemático del integrado 4049.....	69
Figura. 37 Objetivo del circuito multivibrador monoestable	69
Figura. 38 Operación de temporizador 555 como circuito multivibrador monoestable:(a) circuito; (b) formas de onda	70
Figura. 39. Circuito a implementarse como acondicionamiento de pulsos nucleares.....	73
Figura. 40.Definición del bloque Detector de Radiación.....	74

Figura. 41. (izq.) Conteo de pulsos y (der.) Estadística de la radiación.....	75
Figura. 42. Almacenamiento EEPROM.....	75
Figura. 43. Interacción con el bloque de Adquisición y Almacenamiento	76
Figura. 44 Puertos de entrada y salida para el sistema micro-procesado del bloque detector de radiación	77
Figura. 45 Diagrama de pines del PIC 16F887	79
Figura. 46. Administración de puertos del Micro controlador.....	81
Figura. 47. Divisor del voltaje de la batería	82
Figura. 48. Entradas y salidas utilizadas en la aplicación	83
Figura. 49. Circuito de las entradas digitales al micro controlador	84
Figura. 50. Diagrama de conexión del LCD	86
Figura. 51. Diseño de la disposición de la información en el LCD	86
Figura. 52. Interface de comunicación del Detector de Radiación	91
Figura. 53 Conexión RS232/TTL con un MAX232	93
Figura. 54. Cable para la comunicación alámbrica del Detector	94
Figura. 55 (sup.) Logo Digi, (iz.) Modulo XBEE, (der.)	95
Figura. 56. Disposición de los módulos XBee en los bloques del sistema de Detección.....	96
Figura. 57 Interface típica entre módulo XBEE y un microcontrolador.....	97
Figura. 58 Tarjeta adaptadora XBee5V/3.3V	98
Figura. 59 Adaptador XBee a USB.....	99
Figura. 60. Conexión entre computador y XStick de Digi.....	99
Figura. 61. Capas que implementa el protocolo IEEE 802.15.4.....	100

Figura. 62. Red Punto a Punto del Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma.....	101
Figura. 63 Red Punto – Multipunto del Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma.....	101
Figura. 64. Diagrama del objetivo de la fuente de alimentación	103
Figura. 65. Bloques constitutivos de la fuente de alimentación.....	104
Figura. 66 Diagrama de bloques de una fuente de alimentación	105
Figura. 67. Circuito de regulación y acople de baterías	105
Figura. 68. Batería Ni-Cd utilizada en el Detector de Radiación.....	107
Figura. 69. Diagrama de conexión y ecuación del regulador LM317.....	108
Figura. 70. Parte frontal de la caja para el Detector de Radiación.....	111
Figura. 71. Parte trasera de la caja para el Detector de Radiación.....	112
Figura. 72 Dimensiones de la caja del Detector de Radiación.....	112
Figura. 73 Tipos de sugerencias y recomendaciones en los PCB's	114
Figura. 74. Modelamiento tridimensional de la tarjeta electrónica.....	117
Figura. 75. Simulación del Detector de Radiación	118
Figura. 76. Señalética dispuesta en el Detector de Radiación.....	119
Figura. 77 Bloque de Adquisición y Almacenamiento	120
Figura. 78 Definición y Alarma Radiactiva en el Bloque de Adquisición y Almacenamiento	121
Figura. 79 Reglas en el HMI	123
Figura. 80 Consideraciones tomadas en cuenta en el HMI del Sistema	124
Figura. 81 Distribución de la pantalla del sistema SCAN 1.0	125
Figura. 82 Resultado del diseño del HMI del Sistema.....	125

Figura. 83 Entorno de desarrollo de aplicación Java	126
Figura. 84 Modelo entidad-relación de la Base de Datos	128
Figura. 85. Cara frontal del Detector de Radiación	130
Figura. 86. Elementos internos del Detector de Radiación I.....	130
Figura. 87. Elementos internos del Detector de Radiación II	131
Figura. 88. Medición de la salida de la fuente de Alto Voltaje de Corriente directa con una punta de alto voltaje con atenuación de 1000	131
Figura. 89. Rizado de la fuente de Alto Voltaje.....	132
Figura. 90. (Superior) Voltaje de salida del circuito inversor, (Inferior) Voltaje de salida del Tubo GM.....	133
Figura. 91. (Superior) Voltaje de salida del circuito multivibrador monoestable, (Inferior) Voltaje de salida del Tubo GM	134
Figura. 92. (Superior) Voltaje de salida del circuito multivibrador monoestable, (Inferior) Voltaje de salida del circuito inversor.....	135
Figura. 93. Comparación de entrada (Inferior) y salida (Superior) del circuito acondicionador de pulsos nucleares	136
Figura. 94. Simulación de Temporizador para conteo de pulsos	137
Figura. 95. Detalle de la simulación del temporizador	137
Figura. 96. Interface de visualización de datos por LCD.....	138
Figura. 97. Conversor AC-DC convencional utilizado.....	139
Figura. 98. Medición del voltaje de salida del conversor AC-DC	139
Figura. 99. Medición de voltaje de salida de la regulación.....	140
Figura. 100. Prueba de la curva Plateau del Geiger Müller LND 712	141
Figura. 101. Medición del ancho del pulso nuclear y el tiempo muerto	142

Figura. 102. Fuente de radiación AMERSHAM Cs -137 CDR 562.....	143
Figura. 103. BUCHLER - OB6 /943-29	143
Figura. 104. Primera prueba de validación del Detector de Radiación.....	145
Figura. 105. Datos obtenidos de la Primera prueba de validación.....	145
Figura. 106. Comparación entre valor real y valor experimental	146
Figura. 107. Medición de (Superior) Voltaje de salida del circuito multivibrador monoestable, (Inferior) Voltaje de salida del Tubo GM	147
Figura. 108. Determinación del rango de medida del Detector	149
Figura. 109 medición paralela (sup.) y medición perpendicular (inf.) con el haz de radiación	150
Figura. 110 Datos obtenidos originales de la tercera prueba de validación, calibración	151
Figura. 111. Comparación de los valores experimentales y límites permitidos en el 25% del rango del Detector	151
Figura. 112. Comparación de los valores experimentales y límites permitidos en el 50% del rango del Detector	152
Figura. 113. Comparación de los valores experimentales y límites permitidos en el 75% del rango del Detector	152
Figura. 114. Determinación de la Linealidad del Sistema	153
Figura. 115. Imagen in situ de la tercera prueba de validación.....	154
Figura. 116. Módulo XStick.....	155
Figura. 117. Encienda el Detector de Radiación.....	155
Figura. 118. Ícono de la aplicación SCAN 1.0	155
Figura. 119. Selección del Puerto Serial	156

Figura. 120. Comunicación con el detector	156
Figura. 121. Lectura en Tiempo Real.....	156
Figura. 122. Barra de Notificaciones	157
Figura. 123. Lectura de la Exposición a la Radiación.....	157
Figura. 124. Interface SCAN 1.0	157
Figura. 125. Modificación de umbrales de las alarmas.....	158
Figura. 126. Indicadores visuales de alarmas.....	158
Figura. 127. Almacenamiento de exposición.....	158
Figura. 128. Gráfica de exposición, tiempo vs. mR/h.....	159
Figura. 129. Selección de Reporte	159
Figura. 130. Reporte de exposición.....	160
Figura. 131. Interface de usuario funcionando.....	160
Figura. 132 Circuito equivalente aproximado (Universidad de Navarra, 2007)....	171
Figura. 133 Circuito para pruebas en vacío. Fuente: (Universidad de Navarra, 2007)	173
Figura. 134 Circuito para prueba de corto circuito. Fuente: (Universidad de Navarra, 2007).....	174
Figura. 135 Disposición de pines del transformador	175
Figura. 136 Equipos utilizados en proyecto	191

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla. 1 Características del Sistema Detección y Monitoreo de Radiación	
Gamma	6
Tabla. 2 Espectro electromagnético	10
Tabla. 3 Factores de ponderación W_R	18
Tabla. 4 Resumen de unidades dosimétricas	19
Tabla. 5 Límites de dosis ocupacional y para el público	25
Tabla. 6 Fuentes de radiación natural y artificial	26
Tabla. 7 Características del tubo GM LND 712	43
Tabla. 8 Cálculo de los elementos del circuito del tubo GM	47
Tabla. 9 Funcionamiento del oscilador simétrico con compuertas NOT	52
Tabla. 10 Referencia para la relación de vueltas con la corriente y el voltaje	59
Tabla. 11 Funcionamiento de un circuito duplicador de voltaje	61
Tabla. 12 Cálculo de los elementos del circuito de alto voltaje	64
Tabla. 13 Dimensionamiento de los elementos del circuito de acondicionamiento de pulsos nucleares	72
Tabla. 14 Características adicionales del PIC16F887	80
Tabla. 15 Modos de funcionamiento con el símbolo a desplegar	87
Tabla. 16 Dimensionamiento de los elementos del circuito del micro controlador	90
Tabla. 17 Comunicación entre los bloques del sistema	92
Tabla. 18 Especificaciones de los módulos XBee y XBee-Pro	96

Tabla. 19 Dimensionamiento de los elementos del circuito de comunicación	102
Tabla. 20 Dimensionamiento de los elementos del circuito de Alimentación Eléctrica.....	110
Tabla. 21 Capacidad de corriente de las pistas de un circuito impreso.....	116
Tabla. 22 Decaimiento de la fuente de Cs-137	143
Tabla. 23 Resultado de las mediciones con la fuente AMERSHAM Cs -137 CDR 562.....	144
Tabla. 24 Características del computador para instalación del sistema	154
Tabla. 25 Análisis de costos de Sistema	161
Tabla. 26 Identificación de los elementos del circuito equivalente	172
Tabla. 27 Valores del circuito equivalente.....	175
Tabla. 28 Lista total de elementos del Detector de Radiación	188
Tabla. 29 Listado de Equipos utilizados	190

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación. 1 Fórmula de la actividad de una fuente radiactiva.....	16
Ecuación. 2 Fórmula de la exposición o intensidad de un campo de radiación.....	16
Ecuación. 3 Fórmula de la dosis absorbida.....	17
Ecuación. 4 Fórmula de la dosis equivalente	18
Ecuación. 5 Demostración y Fórmula del semiperíodo de desintegración	29
Ecuación. 6 Intervalo de voltaje para que el GM este en zona de trabajo	36
Ecuación. 7 Probabilidad de medir x cuentas en un tiempo n	38
Ecuación. 8 Número de cuentas por unidad de tiempo, corresponde al valor medio de la medición	38
Ecuación. 9 Distribución de Poisson para medición de radiación	38
Ecuación. 10 Condición de normalización de Poisson	38
Ecuación. 11 Valor medio de la distribución de Poisson.....	39
Ecuación. 12 Varianza de la distribución de Poisson	39
Ecuación. 13 Desviación estándar de la distribución de Poisson.....	39
Ecuación. 14. Determinación de la relación matemática de las unidades de exposición	44
Ecuación. 15 Constante de tiempo calculada del circuito del tubo GM	45
Ecuación. 16 Constante de tiempo del circuito del tubo GM	46
Ecuación. 17 Cálculo de la potencia de la resistencia.....	47
Ecuación. 18 Ecuaciones de funcionamiento del oscilador	51
Ecuación. 19 La frecuencia de oscilación	52

Ecuación. 20 Cálculo de la resistencia y el capacitor para determinar la Frecuencia del oscilador simétrico.....	53
Ecuación. 21 Valor de la Resistencia seleccionada para el circuito de oscilación ..	53
Ecuación. 22 Frecuencia calculada del oscilador.....	54
Ecuación. 23. Cálculo de la frecuencia de corte del filtro pasa altos.....	55
Ecuación. 24. Salida del circuito de pre-amplificación, en el punto 1.....	56
Ecuación. 25. Salida del circuito de pre-amplificación, en el punto 2.....	56
Ecuación. 26. Cálculo de corriente R3.....	57
Ecuación. 27 Razón del número de vueltas con las corrientes y los voltajes del transformador	59
Ecuación. 28 Factores calculados del número de vueltas del transformador elevador de voltaje	60
Ecuación. 29. Voltaje y corriente del secundario del transformador elevador	60
Ecuación. 30 Ecuación de tiempo de Carga del capacitor	62
Ecuación. 31 Cálculo del valor de la resistencia del circuito de acoplamiento	67
Ecuación. 32 Cálculo de la potencia de la resistencia del circuito de acoplamiento	67
Ecuación. 33 Tiempo en alto del circuito monoestable	71
Ecuación. 34 Cálculo de la capacitancia del circuito multivibrador monoestable...	71
Ecuación. 35 Cálculo del número máximo de pulsos contados	72
Ecuación. 36. Cálculo del divisor de tensión para el voltaje de la batería.....	82
Ecuación. 37. Cálculo de la corriente de la tercera entrada	82
Ecuación. 38. Cálculo del voltaje de entrada en el conversor análogo-digital	83
Ecuación. 39. Cálculo de la corriente de entrada el micro controlador	84

Ecuación. 40. Cálculo de corriente de las tres salidas del micro controlador.....	85
Ecuación. 41 Tiempo de desbordamiento del TIMER1	88
Ecuación. 42 Tiempo de Máquina. Fuente: (García Breijo, 2008)	88
Ecuación. 43 Cálculo de la carga del Temporizador 1.....	88
Ecuación. 44 Análisis de la memoria del Detector de Radiación	89
Ecuación. 45. Velocidad mínima del canal de comunicación.....	92
Ecuación. 46. Características del banco de baterías utilizadas	107
Ecuación. 47. Tiempo aproximado de duración de baterías, después de un proceso de carga.....	107
Ecuación. 48. Cálculo de la resistencia para el regulador de corriente.....	108
Ecuación. 49. Cálculo del divisor de tensión del voltaje de la batería.....	109
Ecuación. 50. Características mínimas del conversor AC-DC	110
Ecuación. 51. Cálculo del número máximo de pulsos por segundo.....	147
Ecuación. 52. Rango Teórico de medida del Detector de Radiación.....	148
Ecuación. 53. Rango de medida del Detector de Radiación	149
Ecuación. 54 Ecuación para calcular la impedancia de cortocircuito.....	172
Ecuación. 55 Media geométrica de los obtenidos en los ensayos de vacío y de cortocircuito	172
Ecuación. 56 Admitancia de vacío referida al secundario	173
Ecuación. 57 impedancia de cortocircuito referida al secundario. Fuente: (Universidad de Navarra, 2007).....	174

RESUMEN

La radiación es un fenómeno natural y tiene aplicaciones útiles, que van desde la generación de electricidad hasta los usos en la medicina, la industria y la agricultura. Pero, implican riesgos asociados a las radiaciones que estas aplicaciones pueden entrañar para los trabajadores, la población y para el medio ambiente. Por consiguiente, el desarrollo de la medición de las radiaciones ionizantes debe incrementarse directamente proporcional al avance de dichas aplicaciones. Es así, como la tecnología de los medidores de radiación buscan tener una mejor exactitud, precisión y repetitividad, y que sea una tecnología accesible para multiplicar aplicaciones y que el personal pueda medir su exposición anual. El proyecto es el precedente de diseño de dispositivos capaces de detectar y monitorear exposición a la radiación en tiempo real y almacenar dichos datos. El sistema contribuye al control de la exposición máxima anual y permite detectar inmediatamente cuando los niveles de radiación sobrepasan los permitidos. La investigación desarrollada modela la estructura de un detector de radiación para producir múltiples detectores en base al prototipo.

Palabras claves

Electrónica Nuclear

Exposición a la radiación

Detección de radiación

Prototipo

Radiación gamma

ABSTRACT

Radiation is a natural phenomenon and has useful applications ranging from power generation to uses in medicine, industry and agriculture. But, involve risks associated with radiation that these applications can lead to workers, the public and the environment. Therefore, the development of the measurement of ionizing radiation should be increased proportional to the progress of these applications. Thus, as the technology of radiation meters looking to have a better accuracy, precision and repeatability, and is an affordable technology for scalable applications and enable staff to measure their annual exhibition. The project is the previous design of devices capable of detecting and monitoring radiation exposure in real time and store data. The system contributes to the control of the maximum annual exposure and can detect immediately when radiation levels exceed permitted. Research developed models the structure of a radiation detector to produce multiple detectors according to the prototype.

CAPÍTULO 1

SISTEMA DE DETECCIÓN Y MONITOREO DE RADIACIÓN GAMMA

1.1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO

1.1.1. Antecedentes

El Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), a través de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN) es el organismo que controla y regula el uso pacífico de las radiaciones ionizantes a nivel nacional. La SCAN ejerce sus funciones basada en reglamentación nacional y en las recomendaciones emitidas desde el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), fomentando siempre el mantenimiento de altos estándares de protección radiológica y seguridad física en las instalaciones donde se operan fuentes de radiación ionizante. Así, descrito en el Reglamento de Seguridad Radiológica (Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica, 1979):

Los efectos de la radiación en el ser humano pueden ser beneficiosos o perjudiciales, dependiendo de que las maquinas generadoras y emisoras de radiación, así como los isótopos radiactivos, sean utilizados o no en forma apropiada... Conociendo que el país tiene la responsabilidad básica de promover y crear condiciones favorables para mejorar el nivel de salud de su población y confiando en que las autoridades nacionales comprendan la necesidad de proteger contra los efectos nocivos de las radiaciones a los usuarios y al público en general. (p.2).

Debido que en el país no existe hasta el momento sistemas de fabricación nacional capaces de detectar y monitorear dosis de radiación en tiempo real y que permitan almacenar los registros en una base de datos; el Laboratorio de Patrones Secundarios ha propuesto diseñar dicho sistema para medir la dosis anual máxima y permita detectar inmediatamente cuando los niveles de radiactividad sobrepasan los niveles permitidos en laboratorios y oficinas adyacentes. Además, en la SCAN diariamente se manejan fuentes con niveles altos de radiactividad, debido a los elementos radiactivos que se necesitan en el trabajo diario, por ello es necesario que la institución pública también proteja a su personal ocupacionalmente expuesto (POE).

La motivación por parte del Laboratorio de Patrones Secundarios para implementar los mencionados detectores, se fundamenta en el boletín de la OIEA (Dolnicar, 2000), que expresa:

Que la experiencia adquirida por el organismo en la creación y la exploración de los laboratorios nucleares no deberían limitarse al mantenimiento y reparación. Se pueden diseñar y construir a nivel local muchos dispositivos nucleares simples, a un costo que representa solo una fracción del de las unidades comerciales equivalentes. La OIEA intenta estimular y asistir a los ingenieros y técnicos electrónicos en estos planes y hasta ha lanzado un programa para diseñar un conjunto de instrumentos de medición, los mismos que pueden producirse localmente en muchos países en desarrollo (p.3).

1.1.2. Justificación e importancia

Se implementa el Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma para las oficinas y laboratorios del MEER, debido a que la instrumentación electrónica nuclear empleada en investigaciones y en aplicaciones industriales se distingue por ser muy costosa debido su alta especialización. La reducción en la capacidad de compra de equipos e instrumentos científicos en las instituciones de investigación y el aumento del costo de los equipos especializados, han llevado a la búsqueda en el presente proyecto, de nuevas alternativas más accesibles debido a su producción nacional y con menor costo para la realización de investigación y experimentación. Pero, no se limita a la investigación, se considera que muy pronto todas las plantas de gestión de residuos y edificios gubernamentales tendrán que equiparse con sistemas de alarma para detectar la entrada de fuentes radioactivas y prevenir así accidentes radiológicos.

La SCAN, además, buscando siempre estar a la vanguardia de la investigación; pretende realizar este proyecto que se encuentra en los intereses regionales, sabiendo que la investigación de instrumentación nuclear en Universidades y Centros de Investigación en Latinoamérica actualmente se centra en el desarrollo de detectores de radiación que sean económicos, eficientes, versátiles y que principalmente garanticen la protección radiológica del POE; Por ejemplo, en México se desarrolló un sistema de detección de partículas alfa en la Universidad Autónoma de Zacatecas (Murrillo Ortiz & López Pinales, 2007), en donde se alcanzó el objetivo de mejorar el sistema propuesto por el fabricante. Otro caso se repite en el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear de Cuba (Toledo Acosta, Arteché Díaz, & Mesa Pérez, 2001), en donde se realizó un detector de radiación con excelentes resultados en error, precisión y repetitividad.

Es importante la investigación en el presente trabajo dado que una de las falencias actuales de la enseñanza universitaria en el ámbito de las radiaciones ionizantes, incluyendo universidades de primer nivel, es que no se dictan clases de electrónica nuclear, sino que se aprende durante el trabajo mismo o en cursos especiales organizados por los institutos de investigación. Y sabiendo que, los Organismos Internacionales como el Organización Mundial de la Salud (OMS) y el OIEA, exigen controlar por medio del uso de detectores de radiación, que los individuos no reciban cantidades de radiación superiores en el trabajo diario.

Con todo esto se justifica la implementación del Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación con el objetivo de mejorar la calidad de vida del personal, prevenir enfermedades, contribuir a brindar servicios de calidad y mejorar la seguridad radiológica. Así se cumple el Reglamento de Seguridad Radiológica, las políticas de calidad de la SCAN y se apuntala al Plan Nacional del Buen Vivir 2009-2013 (SENPLADES, 2009), en los Objetivos Nacionales en el Capítulo 7,

- Objetivo 3: Mejorar la calidad de vida de la población.
- Objetivo 4: Garantizar los derechos de la naturaleza y promover un ambiente sano y sustentable.

1.2. ALCANCE DEL PROYECTO

El proyecto denominado Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma, abarca el estudio de las radiaciones ionizantes y sus formas de detección electrónica; así como, el diseño e implementación del dispositivo para detección y el sistema adjunto para monitoreo de radiación.

El sistema se divide en dos bloques constitutivos, Figura. 1, que son: Detector de Radiación y, Adquisición y Almacenamiento, al primer bloque ingresa una medida física de radiación, y a la salida se obtiene la medición de radiación en tiempo real; mientras que, el segundo bloque recibe la salida del primero y obtiene un registro del análisis de la radiactividad.

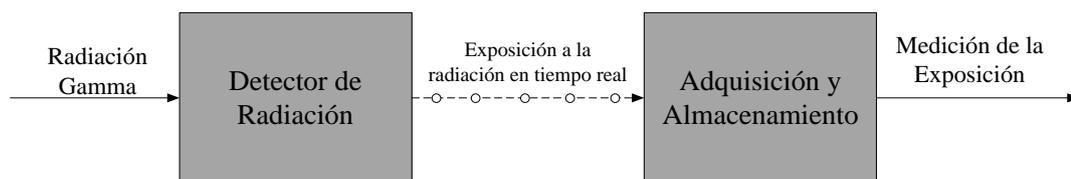


Figura. 1 Diagrama de bloques del Sistema

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

En la Tabla. 1, se describen las características de los bloques constitutivos, el bloque detector de radiación es el dispositivo físico, dispuesto en una tarjeta electrónica con capacidad de detección y comunicación. Y el bloque se Adquisición y Almacenamiento, puede monitorear y adquirir datos para su almacenamiento en una base de datos.

Tabla. 1 Características del Sistema Detección y Monitoreo de Radiación Gamma

Bloque del Sistema	Característica
Detector de Radiación	Dispositivo capaz de detectar radiación gamma ambiental basado en el funcionamiento del tubo Geiger Müller. Interfaz de comunicación alámbrica e inalámbrica entre detector y la PC.
Adquisición y Almacenamiento	Capacidad de monitoreo de la dosis de radiación en tiempo real en una Interface Humano Máquina (HMI) Base de datos que permita almacenar las dosis generadas en el tiempo.

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivos Generales

Diseñar e implementar el Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma para medir la exposición a la radiación del personal del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, utilizando como detector el tubo Geiger Müller.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar el estudio del arte de la física y los detectores de radiaciones ionizantes.
- Diseñar los circuitos de alto voltaje, acondicionamiento de pulsos nucleares, adquisición, control y comunicación del bloque Detector de Radiación.
- Diseñar la alimentación del bloque Detector de Radiación tomando en consideración las características eléctricas de los circuitos constitutivos.
- Diseñar el Circuito Impreso integrando los bloques y subsistemas, tomando en cuenta las consideraciones de espacio, disposición y capacidad de corriente de todos los elementos del Detector de Radiación.
- Diseñar la Base de Datos y la Interface Humano Máquina del bloque de Adquisición y Almacenamiento.
- Implementar el Sistema de Detección de Radiación Gamma.
- Validar el Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma.

CAPÍTULO 2

ESTUDIO DEL ARTE DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

2.1. RADIACIONES IONIZANTES

En la tarde del 8 de noviembre de 1895, el Físico alemán Wilhelm Röntgen de la Universidad de Wurzburg mientras trabajaba encontró que los rayos originados en un tubo de rayos catódicos podían pasar a través de materiales opacos a la luz, concluyendo que todos los materiales eran en cierto grado transparentes a estos rayos dependiendo de su densidad. Röntgen en dicho experimento demostró que en el tubo se originaba un nuevo tipo de radiación, que era invisible y solo revelaba su existencia al chocar sobre una pantalla fluorescente (Universidad de Chile, 2013).

Röntgen en posteriores experimentos, en torno a lo que el llamo rayos X, sustituyó la pantalla fluorescente por una placa fotográfica, de esta manera el 22 de diciembre de 1895 se realizó la primera fotografía con rayos X para uso médico, la

misma que se muestra en la Figura. 2. Con todo esto, el científico se hizo acreedor al primer Nobel de Física en 1901 (Flakus, 1995).



Figura. 2 Primera radiografía, realizada por Röntgen

Fuente: (Suabia, 2011)

En marzo de 1896, el Físico francés Antoine Henry Becquerel de la Escuela Politécnica de París descubrió en forma accidental que ciertos cristales emitían una radiación invisible que se mostraba en una placa fotográfica. Experimentos posteriores le permitieron concluir que el nuevo tipo de radiación no requería estimulación externa (Universidad de Chile, 2010). Por primera vez, este proceso de emisión espontánea recibió el nombre de radiactividad.

2.2. FÍSICA DE LAS RADIACIONES

El proceso de desintegración nuclear se caracteriza por las transformaciones que sufren los átomos de los elementos radiactivos, comenzando en un elemento inestable emisor de radiación con gran cantidad de energía, para que después de una serie de cambios termine en un elemento estable; por ejemplo, el Radio y el Uranio terminan como Plomo. Los tipos de radiación ionizante más conocidos son los rayos alfa, beta, gamma, rayos X y emisión de neutrones. A continuación se detalla en la Tabla. 2, las longitudes de onda del espectro electromagnético, las mismas que se detallan con su rango de energía característica, frecuencia y las aplicaciones típicas para las diferentes radiaciones.

Tabla. 2 Espectro electromagnético

Radiación	Longitud de onda λ [m]	Energía [eV]	Frecuencia	Uso
Cósmica	10^{-4} A°	100 MeV	10^{22} Hz	
Gamma	$10^{-3} \text{ A}^\circ - 10^{-1} \text{ A}^\circ$	10 KeV – 10 MeV	$10^{19} \text{ Hz} - 10^{21} \text{ Hz}$	Bisturí gamma
Rayos X	$10^{-2} \text{ A}^\circ - 10 \text{ A}^\circ$	100 eV – 1 MeV	$10^{19} \text{ Hz} - 10^{20} \text{ Hz}$	Diagnosís y Terapia
UV	$10^2 \text{ A}^\circ - 10^3 \text{ A}^\circ$	10 eV	$10^{15} \text{ Hz} - 10^{16} \text{ Hz}$	Esterilización
Visible	10^4 A°	1 eV	10^{14} Hz	Visión
IR	$10^5 \text{ A}^\circ - 10^7 \text{ A}^\circ$	$10^{-1} - 10^{-4} \text{ eV}$	$10^{11} \text{ Hz} - 10^{13} \text{ Hz}$	Calentamiento
Radar	10^8 A°	$10^{-4} - 10^{-5} \text{ eV}$	10^{10} Hz	Radar
Radio	$10^9 \text{ A}^\circ - 10^{13} \text{ A}^\circ$	$10^{-5} - 10^{-10} \text{ eV}$	$10^9 \text{ Hz} - 10^5 \text{ Hz}$	Comunicaciones

El factor A° equivale a: $1 \text{ A}^\circ = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$

Fuente: (SCAN, 2002)

Las radiaciones electromagnéticas que tienen energías superiores a los rayos ultravioleta pueden provocar cambios, no sólo en las moléculas sino en la estructura

de los átomos, produciendo principalmente ionización por lo que se denominan radiaciones ionizantes. Entendiendo por ionización al proceso en el cuál se arranca de un átomo uno o más electrones, mientras que el fenómeno de excitación consiste en alejar del núcleo atómico a uno o más electrones llevándolos desde sus órbitas estables a otras órbitas más alejadas del núcleo, obsérvese lo detallado en la Figura. 3, exponiéndose la diferencia entre ionización y excitación. En el proceso de excitación los electrones siguen perteneciendo al átomo, por otro lado en la ionización los electrones son desligados del mismo.

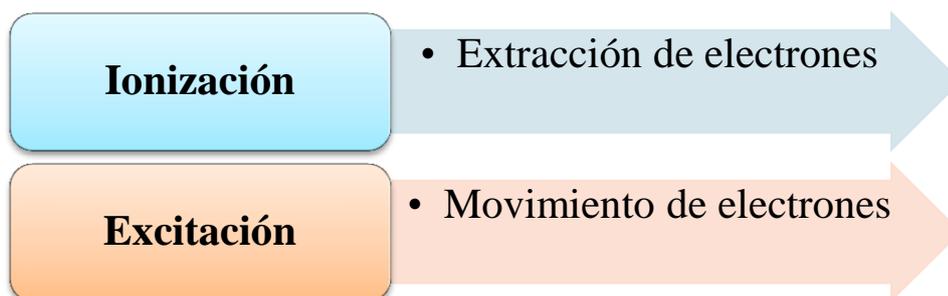


Figura. 3 Diferencia entre ionización y excitación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

En la ionización se entrega una cantidad de energía a un átomo, produciendo que los electrones sean extraídos, lo que provoca que los átomos o moléculas neutras adquieran carga eléctrica, bien positiva o negativa, en cuyo caso el átomo queda ionizado y posee una cierta carga neta (ionización positiva o negativa) (SCAN, 2002). En este proceso se provocan daños en los organismos vivos, debido a la energía absorbida por las células y tejidos que conforman el organismo.

2.3. CLASIFICACIÓN DE LAS RADIACIONES

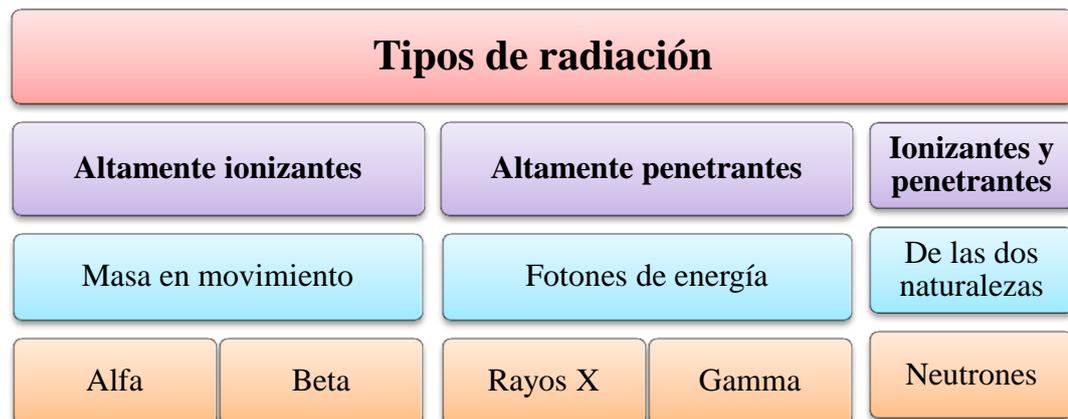


Figura. 4 Tipos de radiación por la naturaleza penetrante o ionizante

Fuente: (SCAN, 2002)

En la Figura. 4 se clasifican las radiaciones en dependencia de la capacidad de ionización y/o penetración. Esta característica, está en función de la cantidad de masa de la partícula emitida por cada tipo de radiación.

El átomo de cada uno de los elementos radiactivos emitirá su exceso de energía de diferente forma, es decir producirá distintos tipos de radiaciones ionizantes. Las diferentes radiaciones debido a su pequeña longitud de onda poseen propiedades muy características, como se muestra en la Figura. 5, en donde se puede observar la capacidad de penetración de las partículas alfa (α), beta (β) y de los rayos Gamma (γ), este poder de penetración es tanto mayor cuanto menor sea la longitud de onda.

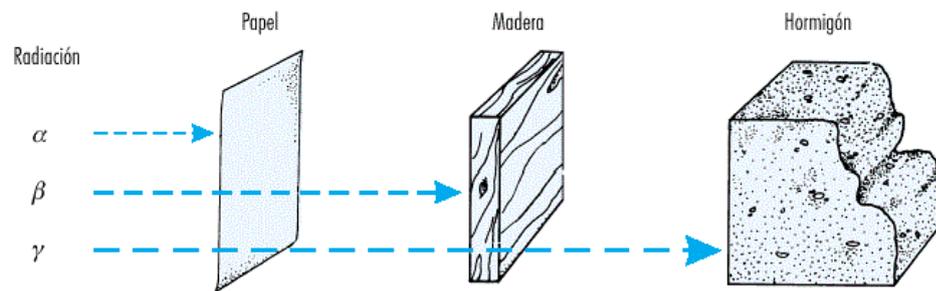


Figura. 5 Capacidad de penetración de las partículas

Fuente: (ACPRO, 2009)

2.3.1. Partículas Alfa

Las partículas alfa son núcleos de helio que están formados por dos protones y dos neutrones, por lo que tienen mayor masa y su capacidad de penetración en la materia es limitada, no pudiendo atravesar una hoja de papel o la piel de nuestro cuerpo, pero son muy energéticas (Foro de la Industria Nuclear Española, 2009) y peligrosas cuando las sustancias que las emiten se introducen en el cuerpo humano por ingestión o por inhalación.

2.3.2. Partículas Beta

Las partículas Beta son electrones y poseen una masa mucho menor que las partículas alfa, por lo que tienen mayor capacidad para penetrar en la materia. Una partícula beta puede atravesar una hoja de papel, pero será detenida por una fina

lámina de metal y por la ropa. Son menos energéticas que las partículas alfa (Foro de la Industria Nuclear Española, 2009). Sin embargo, las sustancias emisoras beta pueden ser peligrosas si se incorporan al organismo humano.

2.3.3. Rayos Gamma

Los rayos Gamma son radiaciones electromagnéticas similares a las ondas luminosas o las ondas de radio, pero con longitudes de onda más cortas, por lo que no tienen masa ni carga, lo que les hace tener un gran poder de penetración en la materia. Para detenerlas se requieren materiales de blindaje pesados, como una capa gruesa de plomo o una pared de hormigón. Los rayos gamma y los rayos X tienen las mismas propiedades, diferenciándose únicamente en su origen. Mientras que los rayos gamma se producen en el núcleo del átomo, los rayos X proceden de las capas externas del átomo, donde se encuentran los electrones (Foro de la Industria Nuclear Española, 2009).

2.3.4. Neutrones

Los neutrones son partículas sin carga eléctrica, por ser neutras eléctricamente tienen un gran poder de penetración en la materia. No producen ionización, es decir cuando interactúan con la materia no arrancan electrones, pero al chocar con un núcleo atómico pueden activarlo generando rayos alfa, beta, gamma o X, que si son

ionizantes. Los neutrones son las radiaciones ionizantes con mayor capacidad de penetración, por lo que para detenerlos hace falta una gruesa pared de hormigón, agua ligera y/o pesada (Foro de la Industria Nuclear Española, 2009).

2.4. UNIDADES DOSIMÉTRICAS

Las radiaciones, sean directa o indirectamente ionizantes, comunican su energía a la materia que atraviesan. La medición de esa energía comunicada al medio, permite evaluar las dosis de radiación que ha recibido la materia. Cuando se trata de tejidos vivos, esa transmisión de energía puede provocar daños a las células. En el presente apartado se examinará las diferentes magnitudes dosimétricas que se utilizan y sus unidades (SCAN, 2002).

2.4.1. Actividad (A)

La actividad es el número de transformaciones nucleares que suceden por unidad de tiempo, es decir, un isótopo que tenga mayor actividad será más radiactivo. Así la actividad por definición es el número de átomos desintegrados por unidad de tiempo. La unidad en el sistema internacional es el Bequerelio (Bq).

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = N\lambda = N_0 e^{-\lambda t}$$

Ecuación. 1 Fórmula de la actividad de una fuente radiactiva

Fuente: (SCAN, 2002)

2.4.2. Exposición (X)

La exposición está directamente relacionada con la interacción entre la radiación X y la radiación gamma con la materia, es por lo tanto una magnitud que evalúa la intensidad de un campo de radiación y se define matemáticamente como:

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

Ecuación. 2 Fórmula de la exposición o intensidad de un campo de radiación

En donde (dQ) representa el valor absoluto de la carga eléctrica total de los iones de un mismo signo, producidos en una masa de aire (dm). La unidad de la exposición en el sistema internacional es el coulomb por kilogramo (C/Kg), mientras que la unidad tradicional es el (R) Röntgen. La exposición está íntimamente relacionada con el conteo de pulsos nucleares, su relación depende del detector utilizado. El conteo se puede expresar en unidades de CPS y CPM, que significan Cuentas por Segundo y Cuentas por minuto, respectivamente.

2.4.3. Dosis Absorbida (D)

La dosis absorbida es la energía que deposita cualquier tipo de radiación ionizante por unidad de masa de material irradiado.

$$D = \frac{dE}{dm}$$

Ecuación. 3 Fórmula de la dosis absorbida

Fuente: (SCAN, 2002)

En donde (dE) represente la energía media impartida por la radiación ionizante a una cantidad de masa (dm). La unidad de la dosis absorbida en el sistema internacional es el Gray.

2.4.4. Dosis Equivalente (H)

La dosis equivalente proporciona información de la probabilidad de aparición de efectos estocásticos, dado que estos dependen de la calidad de la radiación, para ello se ha introducido un factor de ponderación para modificar la dosis absorbida y definir la dosis equivalente. Los factores de ponderación de la radiación W_R son adimensionales y se basan en una revisión de la información biológica, mírese la Tabla. 3 para observar las ponderaciones del factor W_R . La dosis equivalente en un órgano o tejido T, debido a la radiación R se puede expresar mediante:

$$H_{T,R} = W_R D_{T,R}$$

Ecuación. 4 Fórmula de la dosis equivalente

Fuente: (SCAN, 2002)

Donde $D_{T,R}$ es la dosis absorbida promedio debida a la radiación R, en el tejido u órgano T. La unidad en el sistema internacional es el Sievert (Sv).

Tabla. 3 Factores de ponderación W_R

Tipo	Rango energético	Factor de ponderación de la radiación W_R
Gamma	De todas las energías	1
Rayos X	De todas las energías	1
Fotones	De todas las energías	1
Electrones de las energías	De todas las energías	1
Neutrones	< 10 KeV	5
	> 10 KeV hasta 100 KeV	10
	> 100 KeV hasta 2 MeV	20
	> 2 MeV hasta 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protones	2 MeV	5
Partículas alfa	De todas las energías	20

Fuente: (SCAN, 2002)

Se utiliza la siguiente Tabla. 4 y la Figura. 6 para definir, a manera de resumen, las magnitudes dosimétricas con unidad tradicional, la unidad normalizada y

nomenclatura en el sistema internacional; y por supuesto, las relaciones matemáticas existentes entre las diferentes unidades. Esto para tener presente durante el desarrollo del proyecto.

Tabla. 4 Resumen de unidades dosimétricas

Magnitud	Unidad tradicional	Unidad normalizada	Sistema internacional
Actividad	Curie (Ci)	Becquerel (Bq)	s ⁻¹
Exposición	Roentgen (R)	Coulomb/kilogramo	c/Kg
Dosis absorbida	Rad (rad)	Gray (Gy)	J/Kg
Dosis equivalente	Rem (rem)	Sievert (Sv)	J/Kg

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

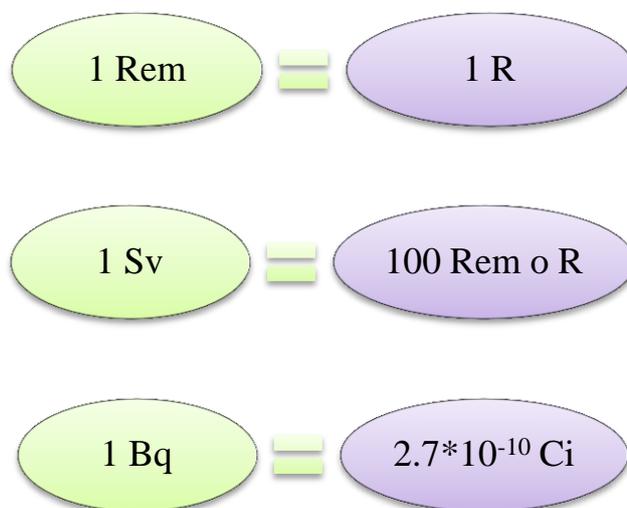


Figura. 6 Equivalencias de unidades dosimétricas

Fuente: (SCAN, 2002)

2.5. DAÑOS EN LOS SERES VIVOS

En 1895, experimentando con tubos de descarga catódica, el norteamericano Emil Grubbé sufrió una extraña dermatitis en las manos que ni él ni su médico lograron explicarse. Becquerel, en 1901, observó un enrojecimiento en su piel bajo el chaleco, en cuyo bolsillo había guardado una sustancia radiactiva (Armas Brito, 1987). Pierre Curie expuso deliberadamente una parte de su brazo a las radiaciones durante 10 horas, con lo que se causó una irritación y lesión cutánea semejante a la de una quemadura solar, la que tardó cuatro meses en curar.

Los pioneros en la investigación sobre radiaciones ionizantes terminaron siendo mártires de su propio trabajo, en su memoria se erigió un monumento en Hamburgo con una lista de 178 nombres (Flakus, 1995). En 1928, en el segundo Congreso Internacional de Radiología se creó la Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones (ICRP).

Las radiaciones ionizantes pueden provocar daños en los organismos vivos, en la Figura. 7 está la clasificación de los daños en sistemas biológicos, debido a la energía absorbida por las células y tejidos que conforman el organismo; dado que se produce una descomposición de las moléculas presentes en las células vivientes, este mecanismo de descomposición está relacionado con las interacciones ionizantes y de excitación, realizadas entre la radiación y los átomos que constituyen el tejido (Universidad de Chile, 2010). Incluso la radiación puede

arrancar electrones del material biológico, si la energía de las partículas radiactivas es mayor que la energía de enlace de los electrones, en este sentido las células en división son más vulnerables a la alta radiación (Astronoo, 2006). La cantidad de ionización producida por la radiación ionizante en las células o tejidos, nos dan una medida de la cantidad de descomposición o daño fisiológico que se produce en los tejidos y por consecuencia el daño del ser vivo que lo constituye.

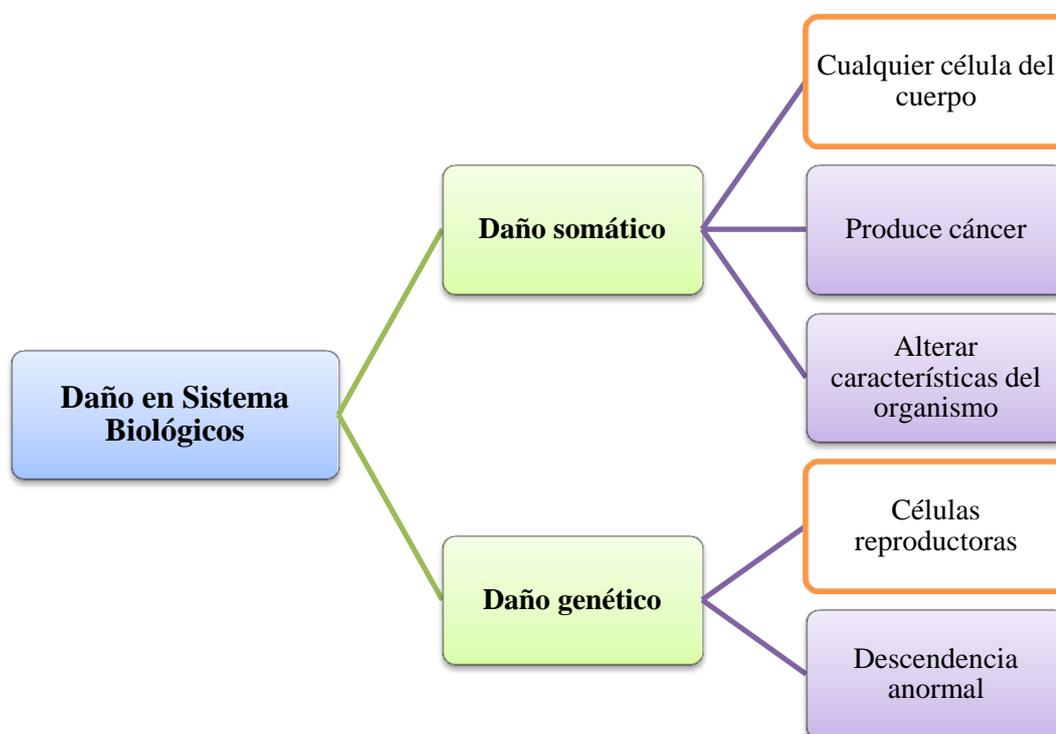


Figura. 7 Clasificación de los daños en sistemas biológicos

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

2.6. CUIDADOS Y MANEJO DE MATERIAL RADIATIVO

Desde los primeros estudios sobre los minerales radiactivos, se observó que la exposición a niveles elevados de radiación puede causar daños identificables a los tejidos del cuerpo humano. Por tanto, es esencial que toda actividad que implica exposición a radiaciones ionizantes se someta a ciertas normas de seguridad para proteger a las personas expuestas y al medio ambiente; entonces, es necesaria la existencia de organismos internacionales que regulen el control en la utilización de Radiaciones Ionizantes, mostrados en la Figura. 8.



Figura. 8 Organismos de Control de las Radiaciones Ionizantes

Fuente: (SCAN, 2002)

Estos organismos han emitido Normas Básicas de Protección Radiológica que sirven de base para la elaboración de leyes y reglamentos en muchos países, los mismos que se apoyan en decretos y medidas administrativas, cuyo cumplimiento es controlado en el Ecuador por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, a través de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN, 2002).

Debido a que el cuidado de los seres humanos es primordial, en el año 2007 la OIEA estableció el símbolo de cómo se debía indicar, la presencia de materiales radiactivos, mírese la Figura. 9, dicho símbolo se estableció después de varios estudios, en donde se determinó que el color rojo de fondo acompañado del trébol radiactivo de donde surgen rayos que van a una calavera y una figura humana que se aleja velozmente, era símbolo más apropiado, sin dejar a interpretaciones en la representación de presencia de elementos radiactivos.



Figura. 9 Símbolo de radioactividad adoptado por el OIEA

Fuente: (Astronoo, 2006)

La Protección Radiológica es un conjunto de Normas Técnicas y Procedimientos que tienen como objetivo el proteger a las personas y su descendencia de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes. Pero, la inevitable exposición del personal a la radiación externa puede ser controlada por la aplicación concurrente de uno o más de los métodos mostrados en la Figura. 10, identificándose las normas de distancia a la fuente radiactiva, el blindaje que cubre el material y el tiempo de exposición. Siempre tendiendo a aumentar la distancia y el blindaje, sin olvidarse de disminuir el tiempo de exposición.

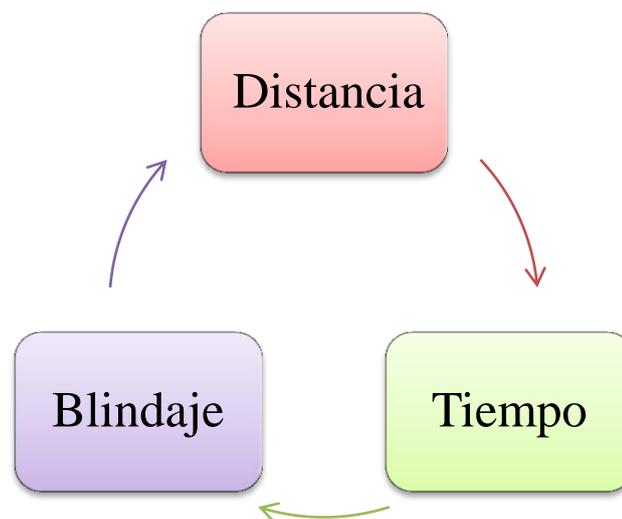


Figura. 10 Medios de Protección en el manejo de fuentes de radiaciones ionizantes

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

2.7. LÍMITES DE DOSIS INDIVIDUAL

La exposición de los individuos debe estar sujeta a límites de dosis o a algún control de riesgo, de forma que nadie esté sometido a dosis que se consideren inaceptables (SCAN, 2002). En 1990 la Comisión Internacional de Protección Radiológica emitió recomendaciones para los límites de dosis para el personal ocupacionalmente expuesto y para la población en general, Tabla. 5.

Tabla. 5 Límites de dosis ocupacional y para el público

Aplicación	Personal expuesto	Población
Dosis efectiva	20 mSv/año o 2 Rem/año	1 mSv/año
Dosis equivalente anual		
Cristalino	150 mSv	15 mSv
Piel	500 mSv	50 mSv
Manos y pies	500 mSv	
Mujer embarazada	2mSv/período de embarazo	

Fuente: (SCAN, 2002)

2.8. FUENTES DE RADIACIÓN

La radiación generada por las actividades humanas que utilizan fuentes radiactivas, los ensayos de armas nucleares, secuelas de accidentes radiológicos, aumentan la dosis anual recibida por la población mundial. Además la Tierra, a pesar de su escudo magnético es continuamente irradiada por una corriente de

partículas, como los rayos cósmicos de alta energía del espacio exterior y el sol (Astronoo, 2006). Por ello, es necesario identificar plenamente las fuentes de radiación natural y artificial que se describen en la Tabla. 6.

Tabla. 6 Fuentes de radiación natural y artificial

Clasificación	Fuente	Elemento
Radiación Natural		
Radiación Gamma terrestre	Minerales que han existido en la tierra desde su origen	Potasio40
		Rubidio87
		Uranio238
		Uranio235
		Torio232
Radiación interna	Alimentos, aire, agua	Carbono14
		Plomo210
		Polonio210
	Ambientes cerrados	Radón
Radiación artificial		
Fuentes Médicas	Rayos X	Cobalto60
	Radioterapia	
	Rayos Gamma	
	Braquiterapia	Yodo 125
Precipitación Radiactiva	Ensayos de armas nucleares	Diversos
La Industria Nuclear y otras Industrias	Vierten sustancias radiactivas al medio ambiente	Diversos
Industria Nucleoeléctrica	Centrales nucleares	Carbono14
		Azufre35
Las Industrias No Nucleares	Vertidos radiactivos	Radio
Emisiones Accidentales de Substancias Radiactivas	Central Nuclear de Chernobyl	Diversos
Radiación en Diversos Productos	Detectores de humo	Diversos
	Relojes luminosos	Diversos

Fuente: (SCAN, 2002)

Dentro de las fuentes de radiación natural, está presente un gas que podría ser parte de la vida de muchas personas en sus actividades diarias; por ello, extendemos la explicación del Radón, por la importancia y el aporte que pueda ofrecer en el mejoramiento de la calidad de vida.

2.8.1. Radón

El Radón es un gas radiactivo, producido por la descomposición de uranio presente en ciertas rocas como el granito (Astronoo, 2006), corresponde a la fuente más importante de radiactividad natural dada por la inhalación de los Radionucleídos, el grado de exposición al Radón aumenta en lugares cerrados. Los niveles de radiación pueden ser muy elevados, si el edificio se encuentra en un terreno particularmente radiactivo o ha sido construido con materiales radiactivos. El aislamiento térmico, agrava la situación, al hacer más difícil la salida del gas (CENAPRED, 2005).

2.8.2. Semiperíodo de Desintegración

El semiperíodo de desintegración fue un concepto introducido por Rutherford en 1904, para señalar el tiempo necesario para que un elemento radiactivo se desintegre desde una actividad inicial a la mitad de esa actividad (Universidad de Chile, 2010). La velocidad de desintegración de cada nucleído radiactivo, está

determinada por una constante, llamada constante de desintegración (λ). Para cada nucleído radiactivo, hay un intervalo de tiempo T fijo durante el cual el número de núcleos que había al comienzo del intervalo, se reduce a la mitad del mismo.

A continuación se observa la curva de desintegración del uranio²³⁸, en la Figura. 11, mírese que debe transcurrir 4500 millones de años para que la radiactividad se reduzca a la mitad. Cuando han pasado 10 vidas-medias, la cantidad de cualquier substancia radiactiva se reduce a un décimo de uno por ciento, las vidas medias de los átomos radiactivos varían desde el orden de 10^{-9} segundos, al orden de 10^9 años (Universidad de Chile, 2010).

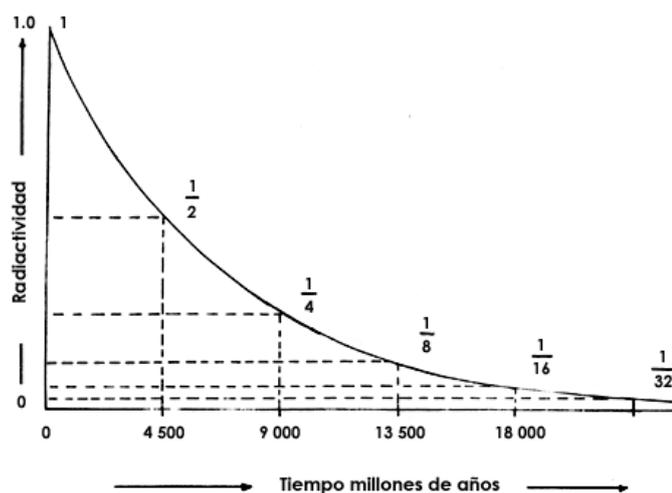


Figura. 11 Curva de desintegración del uranio²³⁸

Fuente: (Jiménez Reyes & Bulbulian, 2012)

La función que representa el semiperíodo de desintegración o vida media de los elementos radiactivos se muestra a continuación, la demostración matemática está referenciado al Capítulo II del Libro de Protección Radiológica (SCAN, 2002).

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

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

$$N_0 = 2N$$

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = \ln\left(e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}\right)$$

$$\ln(1) - \ln(2) = -\lambda T_{\frac{1}{2}}$$

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

Ecuación. 5 Demostración y Fórmula del semiperíodo de desintegración

2.9. DETECTORES DE RADIACIÓN IONIZANTE

Aunque la radiación ionizante ha existido en la naturaleza a lo largo de toda la historia de la Humanidad, el hombre carece de un sentido especial capaz de percibir

este tipo de radiaciones, no fue hasta el siglo XVII con Röntgen y Becquerel que abrieron las puertas a este campo científico. Röntgen observó que el aire se volvía conductor de electricidad cuando estos rayos lo atravesaban, este efecto se utilizó posteriormente como principio operativo de varios tipos de detectores de radiación. Posteriormente, Rutherford y Geiger descubrieron que, en una pantalla uniforme, cada centelleo correspondía al impacto de una sola partícula alfa, este se convirtió en un método muy sencillo para contar dichas partículas (Flakus, 1995).

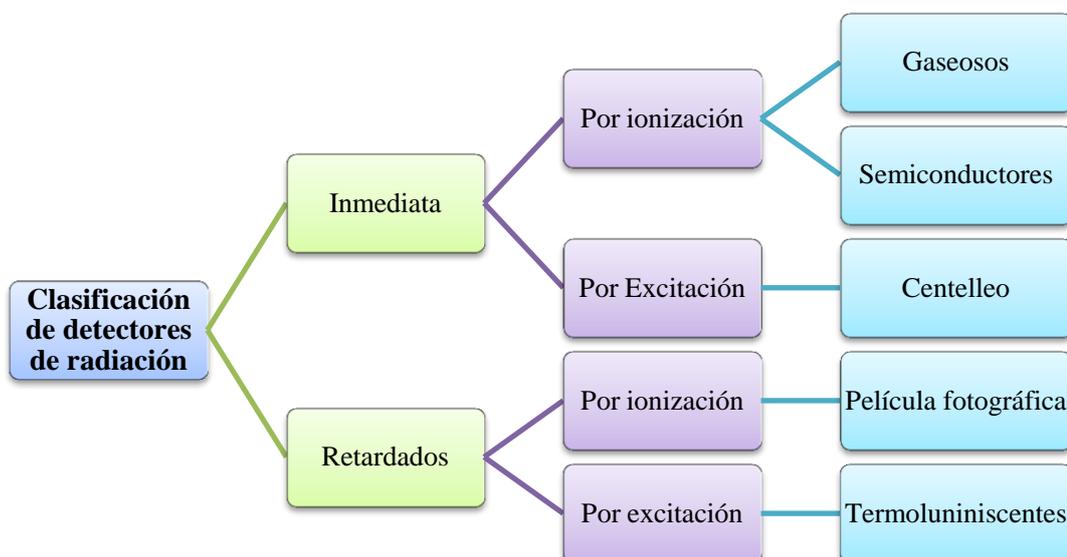


Figura. 12 Clasificación de los detectores de radiación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

El diseño de detectores de radiación se basa en el conocimiento de la interacción de las radiaciones con la materia, principalmente a través de la ionización y la excitación de sus átomos; puede haber emisión de luz, cambio de

temperatura o efectos químicos, todo lo cual puede ser un indicador de la presencia de radiación (CENAPRED, 2005). Los métodos de detección de radiación ionizante más empleados son: ionización de gases, centelleo de sustancias, cámaras de ionización, termoluminiscencia y película fotográfica, obsérvese la Figura. 12, en donde se muestra la clasificación de los diferentes detectores de radiación.

Los detectores actualmente permiten investigar la naturaleza de las radiaciones nucleares y ha servido para la aplicación beneficiosa de las radiaciones en medicina, industria e investigación, así como para la prevención de los riesgos que pudieran entrañar la radiación. Los detectores basan el funcionamiento en la interacción de la radiación con el material del propio detector, dado que la radiación es una forma de energía (SCAN, 2002). Esta energía puede depositarse parcial o totalmente en un medio adecuado produciendo así un efecto determinado.

2.9.1. Detectores Gaseosos

Los detectores gaseosos operan mediante la utilización de la ionización, producida por el paso de la radiación a través de un gas. Típicamente, constan de dos electrodos a los que un cierto potencial eléctrico es aplicado, entre los electrodos está presente un gas. La radiación ionizante que pasa por el espacio entre los electrodos genera pares de iones que son portadores de carga, los que toman energía cinética influenciada mediante un campo eléctrico, este movimiento induce una corriente en los electrodos, que puede ser medida a través de una electrónica

adecuada. La carga producida por la radiación puede ser transformada en un pulso eléctrico, denominado pulso nuclear, el mismo que se puede contar (Tsoulfanidis, 1995).

2.9.2. Detectores Semiconductores

Los detectores semiconductores, está compuesto por germanio o silicio, y tiene una excelente resolución en la medición de rayos gamma. Una limitación práctica de los detectores es que su almacenamiento y funcionamiento han de tener lugar a temperaturas muy bajas. Con los años se consiguió producir germanio de extremada pureza, lo que permitió fabricar detectores de germanio sin compensación por litio, los llamados detectores de germanio intrínseco. Estos pueden conservarse a temperatura ambiente.

2.10. EL DETECTOR GEIGER MÜLLER

Un tubo Geiger Müller, mírese la Figura. 13, consiste en dos electrodos con un gas inerte (Gas no radiactivo bajo determinadas condiciones de presión) a baja presión entre ellos. El tubo está cerrado por una fina ventana para que a través de ella penetre y llegue al gas la radiación ionizante. El electrodo externo es usualmente un cilindro, mientras que el interior es un alambre delgado, generalmente tungsteno colocado en el centro del cilindro. La diferencia de

potencial produce un campo eléctrico entre ambos electrodos que provoca que cualquier radiación directamente ionizante que entra en el tubo provoque una avalancha, la cual produce un pulso de corriente que señala el paso de radiación, es decir, cuando una partícula pasa por el gas, ioniza las moléculas del mismo liberando electrones (Universidad Complutense de Madrid, 2010). Si la intensidad de campo eléctrico es demasiado pequeña, no se produce pulso alguno, y si es demasiado alta se produce una descarga continua incluso en ausencia de radiación.

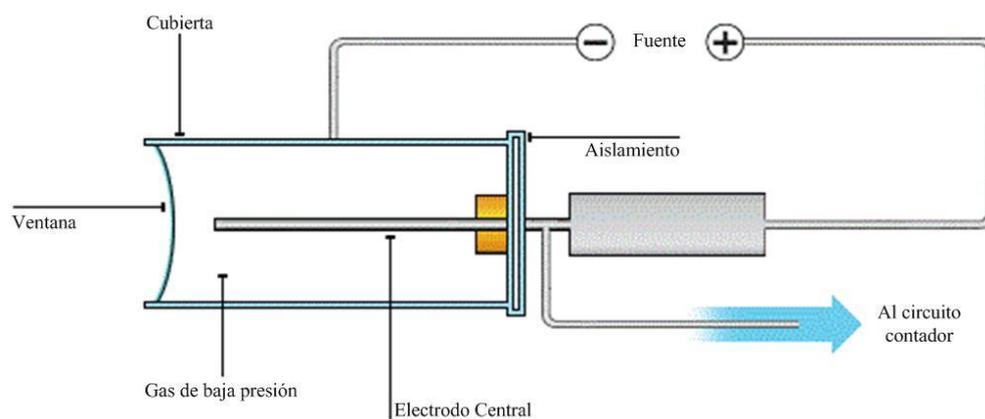


Figura. 13 Detector Geiger Müller

Fuente: (BBC, 2008)

El tubo Geiger Müller no distingue entre tipos de partículas, y no es capaz de proporcionar el valor de sus energías; éste sólo proporciona información sobre el número de partículas que han interactuado en el detector (Universidad de Valencia, 2013).

2.10.1. Historia

En 1908, Ernest Rutherford y Hans Geiger describieron el primer contador eléctrico cilíndrico de partículas alfa. En 1928, Hans Geiger y Walter Müller introdujeron un nuevo tipo de contador con gas, que respondía a cada fenómeno inducido por radiaciones emitiendo una señal de alta intensidad; Así, descubrieron el contador Geiger-Müller que se perfeccionó por su simplicidad, facilidad de manejo y bajo precio, encontrando rápidamente amplia aplicación en la medición de radiación. El tubo GM es sin duda, la mejor solución cuando lo que se necesita es un método de recuento sencillo y económico de radiación ionizante (Flakus, 1995).

No existe símbolo internacionalmente normado para la representación de un tubo GM, el símbolo utilizado en el presente proyecto para los planos y diagramas eléctricos es el que muestra en la Figura. 14.

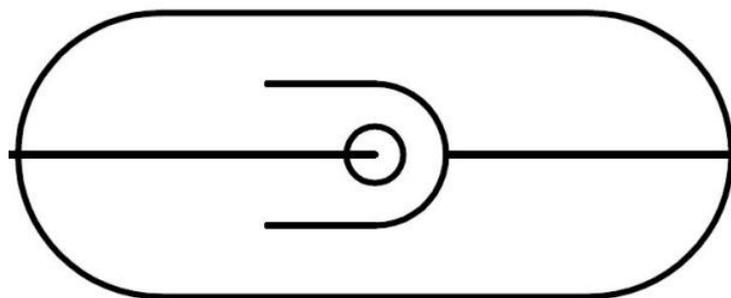


Figura. 14 Símbolo Geiger Müller

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

2.10.2. Curva Plateau

El tubo Geiger Müller es utilizado como sensor en circuitos que cuentan el número de descargas en un intervalo de tiempo definido. En el tubo GM, bajo un valor de voltaje mínimo no se registra ninguna cuenta, este voltaje mínimo está en función de la presión del gas y de la separación de los electrodos. Existe un intervalo de voltaje, llamado región Geiger Müller donde la rapidez de recuento es aproximadamente independiente de la tensión aplicada (Universidad de Chile, 2010). En consecuencia, la información recogida no depende de la ionización inicial y por tanto depende únicamente de la energía de la radiación.

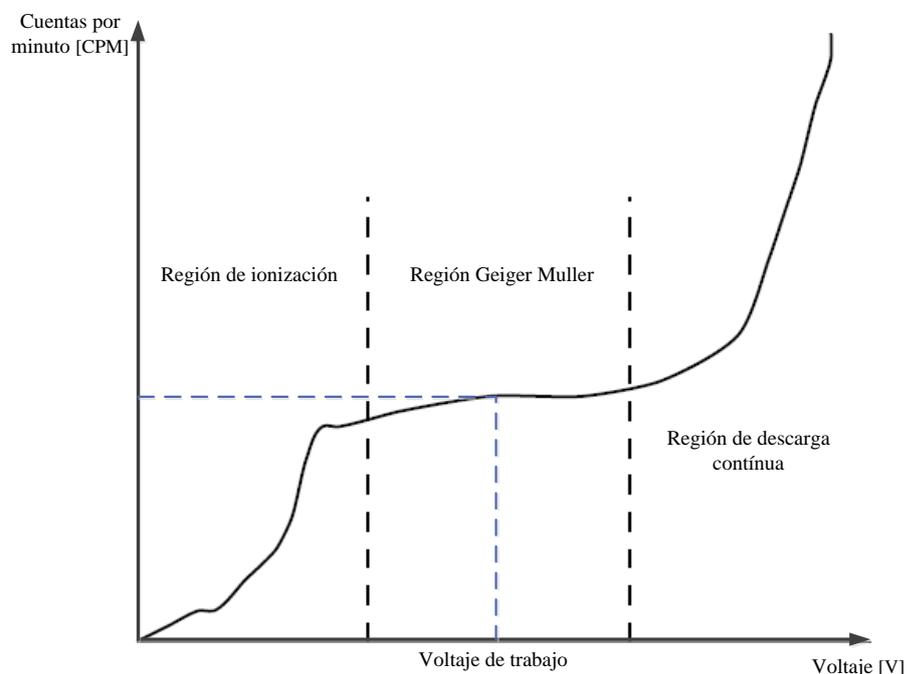


Figura. 15 Curva Plateau del Geiger Müller

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

En la región GM los electrones adquieren energías cinéticas suficientes como para producir una señal amplificada que permite identificar el paso de una radiación (Universidad de Santiago de Compostela, 2013). Esta región, conocida también como plateau es donde opera el contador Geiger Müller, obsérvese la Figura. 15.

Cuando el nivel de voltaje está por encima de la región Geiger Müller, se produce ionización sin que pase la radiación, esta es la zona de descarga continua. Al contrario, en la región de ionización el voltaje está muy por debajo de la necesidad mínima, por lo tanto no se puede registrar radiación alguna. Idealmente, el voltaje umbral, mostrado en la Ecuación. 6, es el intervalo de valores que puede tomar el voltaje para el correcto funcionamiento del detector GM.

$$400V < V_{umbral} < 900V$$

Ecuación. 6 Intervalo de voltaje para que el GM este en zona de trabajo

El tiempo Muerto del Geiger Müller es otro concepto muy utilizado en la medición de radiaciones ionizantes, este concepto se aplica al paso de una radiación ionizante, el gas del detector necesita un tiempo para que se recombinen sus átomos para estar en disposición de registrar otro paso de radiación.

2.11. ESTADÍSTICA DEL NÚMERO DE CUENTAS

El decaimiento radiactivo es un proceso randómico. En consecuencia, cualquier medida basada en la observación, en este caso, de la radiación está sujeta a un cierto grado de fluctuación estadística, estas fluctuaciones inherentes representan una fuente inevitable de incertidumbre en todas las mediciones nucleares y, a menudo pueden ser la principal fuente de imprecisión o error (Knoll, 2000).

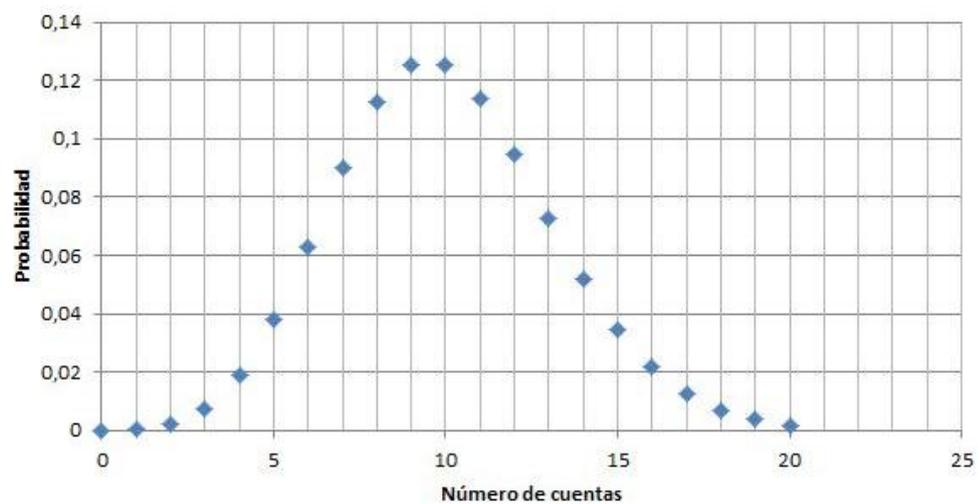


Figura. 16 Curva característica de la distribución de Poisson

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

Entonces debemos tratar la medición de radiación mediante un modelo matemático adecuado. Ese modelo son las distribuciones de probabilidad, con los cuales podremos predecir el momento en el que un núcleo aislado se desintegrará. La distribución de Poisson, mostrado en la Figura. 16, será el modelo matemático

utilizado, el mismo que expresa la probabilidad de sucesos para un determinado valor en un cierto intervalo de tiempo (Huertas & Hueso, 2008).

Las expresiones matemáticas de la distribución de Poisson son extraídas del libro “Radiation detection and measurement” de Glenn Knoll (Knoll, 2000). La expresión $P(x)$ es la probabilidad de observar el resultado x cuando el promedio para un gran número de ensayos es pn .

$$P(x) = \frac{(pn)^x}{x!} e^{-pn}$$

Ecuación. 7 Probabilidad de medir x cuentas en un tiempo n

$$pn = \bar{x}$$

Ecuación. 8 Número de cuentas por unidad de tiempo, corresponde al valor medio de la medición

$$P(x) = \frac{(\bar{x})^x}{x!} e^{-\bar{x}}$$

Ecuación. 9 Distribución de Poisson para medición de radiación

$$\sum_{x=0}^n P(x) = 1$$

Ecuación. 10 Condición de normalización de Poisson

$$\bar{x} = \sum_{x=0}^n xP(x) = pn$$

Ecuación. 11 Valor medio de la distribución de Poisson

$$\sigma^2 = \sum_{x=0}^n (x - \bar{x})^2 P(x) = pn$$

Ecuación. 12 Varianza de la distribución de Poisson

$$\sigma = \sqrt{\bar{x}} = \sqrt{pn}$$

Ecuación. 13 Desviación estándar de la distribución de Poisson

En conclusión, la desviación estándar corresponde al promedio de las mediciones en un intervalo establecido. Entonces, entre mayor sea el intervalo de tiempo en el que se tome valores, se podrá tomar como referencia medidas anteriores para promediarlas y acercarse al valor verdadero. En consecuencia, la medida de radiación, no es una medida directa, sino es consecuencia de las medidas anteriores, y tiene un tiempo de estabilización, dependiente del número de mediciones promediadas.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA DE DETECCIÓN Y MONITOREO DE RADIACIÓN GAMMA

En el presente capítulo se diseña íntegramente el Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma, incluyendo los dos bloques constitutivos: Detector de radiación y el bloque de Adquisición y Almacenamiento, es importante recordar el Alcance del Proyecto mostrado en la Figura. 1. El diseño contempla los circuitos electrónicos, elementos mecánicos, interfaz de comunicación, interfaz humano máquina y la base de datos. El trabajo se centra inicialmente en el análisis y diseño electrónico de las corrientes, voltajes y potencias de los elementos constitutivos de los circuitos del detector. Todo esto priorizando, que el resultado final tenga todas las características que componen los sistemas de detección comerciales de radiación ionizante.

El detector de radiación debe reunir por su particular trabajo, características especiales que lo diferencien de cualquier otro detector. En este sentido (Peretti & Romero, 2000) describe a los detectores de radiación con tubo Geiger Müller como:

Los contadores Geiger son instrumentos destinados a detectar y medir radiación ionizante, son particularmente útiles en la inspección de áreas y/o personal. Si se los utiliza en situaciones de emergencia radiológica (accidentes con liberación de material radioactivo), puede ser necesario que personal ingrese a zonas con niveles de actividad desconocidos. Una lectura errónea puede conducir a una sobreexposición y es por ello importante lograr un alto nivel de confianza en el instrumento de medición (p.1)

Por ello, la importancia de la confiabilidad del sistema y del dispositivo creado en el proyecto.

El nombre elegido para el Sistema, para fines prácticos es el nombre de la institución que auspicia el Proyecto, debido a su importancia en el área de las radiaciones a nivel nacional, el nombre está acompañado de un número que refleja la versión de la aplicación.

Nombre del sistema **SCAN 1.0**

3.1. BLOQUE DETECTOR DE RADIACIÓN

En la Figura. 17 se muestra un diagrama de bloques, en donde se describe las partes constitutivas que forman el Detector de Radiación, estas partes se diseñan en los siguientes apartados. El diagrama de bloques se centra en la característica fundamental de medición de radiación; el conjunto detector, acondicionamiento y medidor, busca que el dispositivo logre tener el alto nivel de confianza para medición de radiaciones ionizantes.

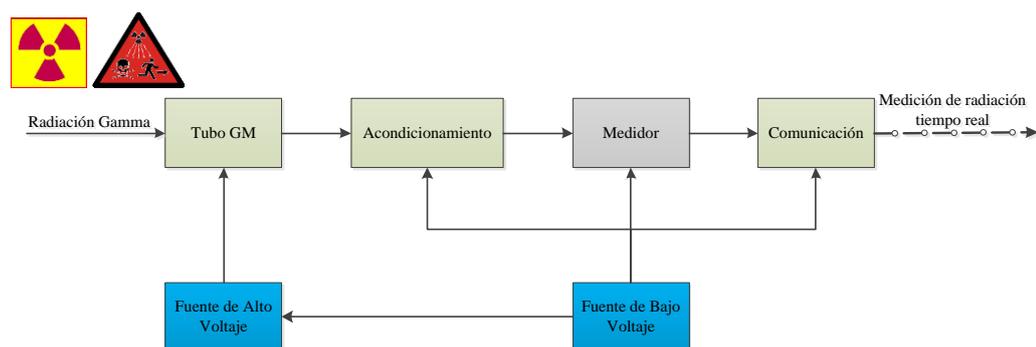


Figura. 17 Partes constitutivas del Detector de Radiación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

La Primera diferencia entre el detector de radiación típico y el propuesto, es que la implementación del conteo de pulsos anteriormente se realizaba por medio de circuitos adicionales; así, el discriminador de pulsos que mejora la medida del instrumento, en el presente proyecto se implementa digitalmente, tomando en cuenta las consideraciones estadísticas para la medición de radiación gamma. Y la

segunda diferencia, radica en la capacidad de comunicación con aplicaciones externas, que permiten realizar un análisis exhaustivo de la medición de radiación.

3.1.1. Tubo Geiger Müller

Tabla. 7 Características del tubo GM LND 712

Característica	Descripción
Medición	Radiaciones alfa, beta y gamma
Gas	Neón
Sensibilidad Co60	18 (cps/mR/h)
Sensibilidad Cs137	16 (cps/mR/h)
Fondo	10 cpm máximo
Capacitancia	3 pF
Alimentación	450 a 650 voltios DC
Temperatura de Trabajo	-40 / +75 °C
Dimensiones	9,1 mm de diámetro
Pulso nuclear	500 <i>useg</i>

Fuente: (LND, INC, 2013)

El tubo Geiger Müller escogido para el proyecto es el LND712, por las características mostradas en la Tabla. 7; este presenta sensibilidad de 16 cuentas por segundo por cada $\frac{mR}{h}$ para el Cs137, lo que se traduce en un detector capaz de registrar mínimo $0,0625 \frac{mR}{h}$. A su vez, el fondo determina que no existirá gran incertidumbre en la medición. El voltaje de alimentación se ajusta a los parámetros eléctricos que se pretende en el proyecto, las dimensiones y la duración del pulso nuclear, lo hacen perfecto para la aplicación implementada; para más información, mírese la hoja de datos del Tubo Geiger Müller, en la sección Data Sheets.

Tomándose como referencia la Tabla. 7, determinamos la relación entre cuentas por segundo y la exposición medida en $\frac{mR}{h}$, en la Ecuación. 14, la misma que se determina a partir de la sensibilidad Gamma con el Cs137, que es el Radionucleídos de calibración. Con todo esto culminaremos en un factor que relaciona las unidades de exposición a la radiación.

Sensibilidad al Cs137: 16 cps/mr/hr

$$1cps = 0.625 \frac{uSv}{h}$$

$$1cps = 0.0625 \frac{mR}{h}$$

Ecuación. 14. Determinación de la relación matemática de las unidades de exposición

3.1.1.1. Diseño del circuito del Tubo GM

El circuito, del que es parte el tubo GM está conformado por otros elementos, Figura. 18, los mismos que disminuyen el valor del alto voltaje en el ánodo del tubo y permiten la ionización del gas interno. Este método se le conoce como de enfriamiento externo, que es simplemente aplicado por medio de una resistencia en serie con el tubo GM, la que tiene alta resistencia en el orden de los 10 $M\Omega$, recomendado por el fabricante (LND, INC, 2013); el capacitor CGM es la representación de la capacitancia del tubo GM, que según la hoja de datos es de 3 pF .

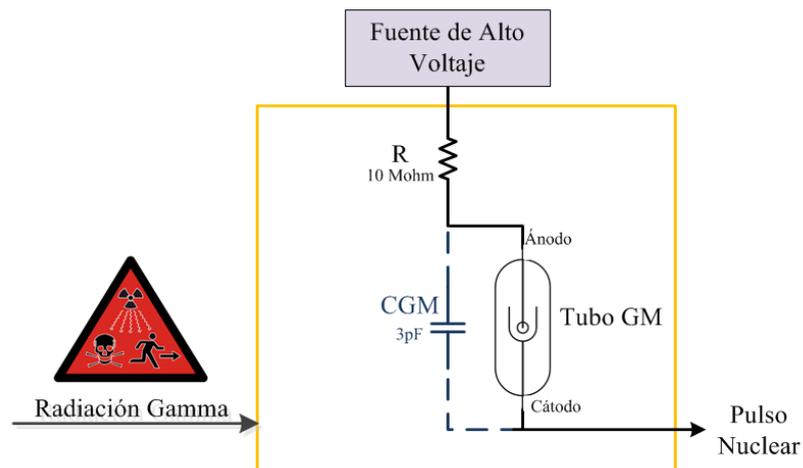


Figura. 18 Circuito equivalente del tubo GM

Fuente: (Knoll, 2000)

Como la información del fabricante del tubo GM indica que el tiempo muerto mínimo es de 90 useg , y fórmula para el cálculo de la constante de tiempo, mostrada en la Ecuación. 15, arroja un valor menor al mínimo aceptado, es necesario aumentar esta constante de tiempo.

$$\tau = R * C_{GM} = 10 \text{ M}\Omega * 3\text{pF}$$

$$\tau = 30 \text{ useg}$$

Ecuación. 15 Constante de tiempo calculada del circuito del tubo GM

Fuente: (Knoll, 2000)

El aumento de la constante de tiempo, se logra por medio de la disposición de un capacitor en paralelo con el tubo GM, Figura. 19, de tal manera que la

capacitancia resultante sea la suma de las dos mencionadas. Con esto, se calcula la nueva constante de tiempo, Ecuación. 16, que está dentro del rango aceptado.

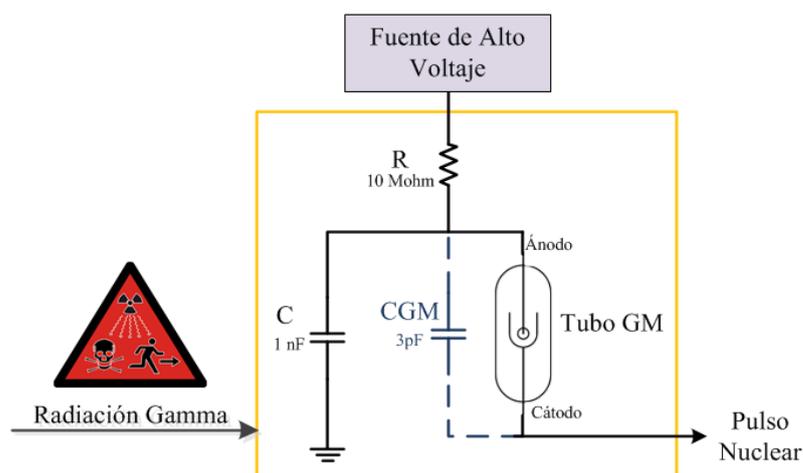


Figura. 19 Circuito del tubo Geiger Müller

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

$$\tau = R * (C + C_{GM}) = 10 \text{ M}\Omega * (3\text{pF} + 1\text{nF})$$

$$\tau = 10 \text{ mseg}$$

Ecuación. 16 Constante de tiempo del circuito del tubo GM

Para elegir la potencia del resistor que se encuentra en el ánodo del tubo GM, se calcula en la Ecuación. 17. Mientras que el voltaje del Capacitor será de 1000 [V], para garantizar el funcionamiento del elemento.

$$P = \frac{v^2}{R} = \frac{500 [V]^2}{1M\Omega} = 0.25W$$

Ecuación. 17 Cálculo de la potencia de la resistencia

3.1.1.2. Resultado del Diseño

El resultado del diseño del circuito del tubo GM se muestra en la Tabla. 8, y en la Figura. 20 está el resultado del diseño con todas las consideraciones calculadas anteriormente.

Tabla. 8 Cálculo de los elementos del circuito del tubo GM

Elemento	Nombre	Descripción	1er valor	1era unidad	2do valor	2da unidad
C9	103M	Cerámico	10	nF	1	KV
GM	LND 712	Tubo GM	3	pF	18	cps/mR/h
R7			10	MΩ	0,5	W

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

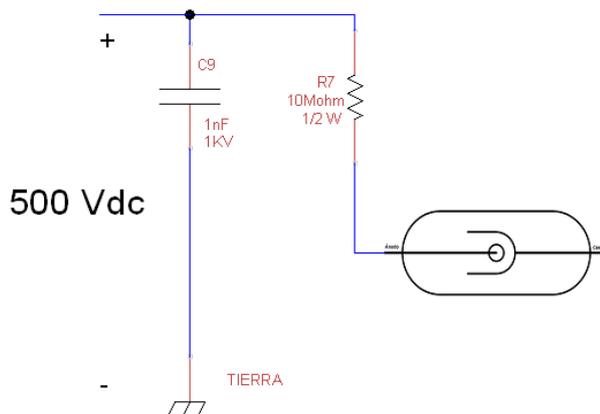


Figura. 20 Circuito a implementarse con tubo GM

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.1.2. Fuente de Alto Voltaje de Corriente Directa

Las fuentes de alimentación de alta tensión son necesarias para operar los detectores nucleares; el valor y la polaridad del voltaje dependen del tipo de detector. El detector Geiger Müller, necesita de alta tensión bien regulada para producir resultados fiables, debido a que los voltajes requeridos son superiores a los 400 voltios, el circuito de alto voltaje es también un multiplicador de tensión (IAEA, 2002).

La salida de la fuente de alto voltaje que alimenta al tubo LND 712, es el valor dado por el fabricante (LND, INC, 2013), este voltaje debe estar entre 450 a 650 voltios; para determinar el valor específico dentro del rango mencionado se realizó un ensayo para determinar la curva plateau del tubo GM, el ensayo de determinación de la curva plateau se documenta en la página 140; como conclusión del ensayo se determinó que el voltaje que le permite al detector permanecer en la región GM es de 500 voltios, que es el elegido para la fuente de alto voltaje. El objetivo del circuito de alta tensión se puede observar en la Figura. 21, mírese que la entrada del circuito es un voltaje continuo de 5 voltios, mientras que la salida será un voltaje de 500 voltios de corriente directa.

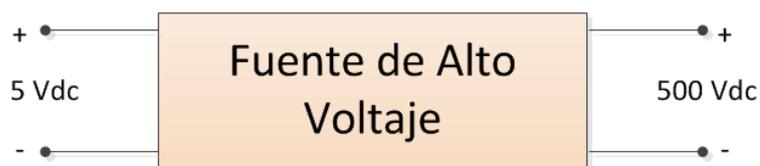


Figura. 21 Objetivo del Circuito de Alto Voltaje

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.1.2.1. Diseño del circuito de alto voltaje

Para iniciar el diseño de la fuente de alta tensión se requiere identificar plenamente las necesidades del tubo GM, la fuente de alto voltaje deberá suministrar energía desde la resistencia, dispuesta en el ánodo del tubo GM, hasta la tierra del circuito, mírese la Figura. 20.

Internamente para lograr la implementación del circuito de alto voltaje se utilizarán algunos circuitos constitutivos, los que se muestran en el diagrama de bloques de la Figura. 22, para lograr el objetivo se convierte el voltaje continuo a voltaje alterno por medio del oscilador luego se amplifica, multiplica el voltaje, y por último se regula para obtener la salida deseada.



Figura. 22 Diagrama de bloques de la fuente de alto voltaje

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

a. Circuito oscilador

El circuito oscilador es necesario para convertir el voltaje continuo a voltaje alterno, debido a que el primero no permite ser amplificado por un transformador, al convertirlo en corto circuito. Entonces para el convertidor de voltaje DC - AC, es conveniente el uso de un oscilador cuando se desea reducir al mínimo las dimensiones del circuito, se analiza la implementación por medio de puertas CMOS.

Los osciladores son circuitos que cambian el estado de sus salidas permanentemente entre dos estados lógicos (1 lógico y 0 lógico). Los osciladores que se pueden construir se basan en la carga y descarga mediante el uso de resistencias, condensadores, inversores y compuertas. El período de oscilación es proporcional al valor del condensador y de la resistencia a través de la que se carga y descarga. (Arias, 2008).

En la Figura. 23, se muestra un circuito oscilador simétrico basado en inversores y compuertas. La frecuencia de oscilación de estos circuitos depende básicamente de los valores de la resistencia y el condensador. Este oscilador es simétrico ya que el tiempo que dura el nivel alto, es igual al que permanece en nivel bajo, demostrando la relación en la Ecuación. 18; la señal de salida oscila indefinidamente con un período T dependiente del producto RC .

$T1$ Tiempo en alto

$T2$ Tiempo en bajo

$$T1 = T2$$

Ecuación. 18 Ecuaciones de funcionamiento del oscilador

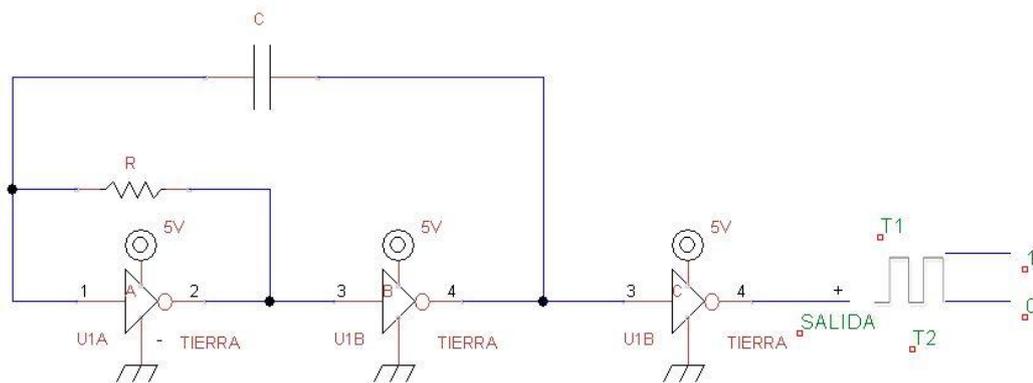


Figura. 23 Circuito de oscilador con compuertas CMOS

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

El funcionamiento del oscilador se basa en la carga y descarga del capacitor conectado entre la entrada del inversor A, y la salida del inversor B, mírese la

Tabla. 9, en donde se ejemplifica el funcionamiento del circuito, en el primer estado se carga el capacitor por medio de la resistencia, cuando llega a un voltaje de 5 V cambia al segundo estado produciéndose una descarga, iniciando el proceso.

Tabla. 9 Funcionamiento del oscilador simétrico con compuertas NOT

Estado	Entrada A	Salida A, Entrada B	Salida B	Capacitor
Primer estado	0	1	0	Carga
Segundo estado	1	0	1	Descarga
Primer estado	0	1	0	Carga

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

Como circuito inversor se utilizará el integrado 4049, el que produce una corriente de salida mayor y es capaz de manejar circuitos TTL (Lógica Transistor a Transistor 0-5V). El capacitor debe estar entre $0.01 - 10 \mu F$; así, la frecuencia de la señal de salida estará en dependencia de los valores de R y C, relacionados en la Ecuación. 19.

$$f = \frac{1}{2,2RC}$$

Ecuación. 19 La frecuencia de oscilación

Fuente: (Arias, 2008)

La frecuencia de oscilación debe estar en el rango de frecuencia de funcionamiento del transformador que es de 25 KHz, mírese los cálculos en la Ecuación. 20 en donde se asume el valor del capacitor, obteniéndose el valor de la resistencia.

$$f = 25 \text{ KHz}$$

$$C = 4,7 \text{ nF}$$

$$R = \frac{1}{2.2fC} \approx 3868 \Omega$$

Ecuación. 20 Cálculo de la resistencia y el capacitor para determinar la Frecuencia del oscilador simétrico

Para asegurar el valor de frecuencia de oscilación se selecciona un valor de resistencia superior al calculado, este valor se define en la Ecuación. 21.

$$R = 4.3 \text{ K}\Omega$$

Ecuación. 21 Valor de la Resistencia seleccionada para el circuito de oscilación

A continuación se verifica el funcionamiento del oscilador en la Ecuación. 22, utilizando el valor de la resistencia y el capacitor calculados.

$$f = \frac{1}{2,2 * 4,3K\Omega * 4,7nF}$$

$$f = 22,49 KHz$$

Ecuación. 22 Frecuencia calculada del oscilador

b. Circuito de Pre-amplificación

Obsérvese que la etapa de Pre-amplificación, Figura. 24, está inserta entre el segundo (B) y tercer (C) inversor del circuito oscilador simétrico. Esta etapa tiene el objetivo de: primero filtrar la señal del oscilador y, segundo, pre amplificar la señal entre los inversores para obtener una señal que permita activar el MOSFET, que es el transistor que controla la corriente del primario del transformador.

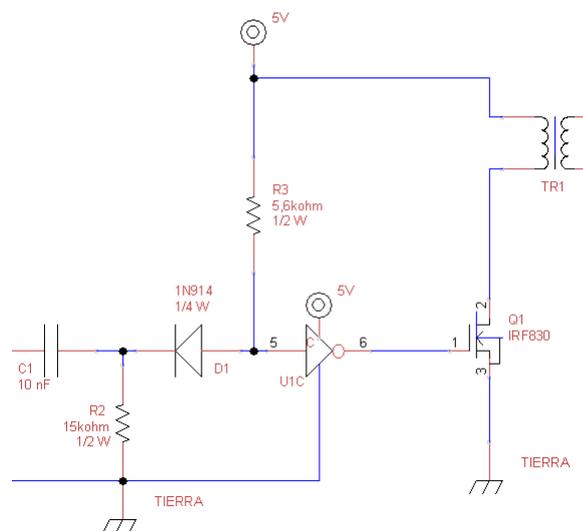


Figura. 24 Circuito de Pre-amplificación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

El filtro es pasa altos del tipo RC, Figura. 25. Este sub circuito tiene el objetivo de rechazar ruidos que puedan generarse en los inversores de la etapa de oscilación simétrica. La frecuencia de corte se la calcula tomando en consideración que la señal del oscilador está en la frecuencia de 2.4 KHz, entonces es de interés que se eliminen señales menores a 2 KHz. Para el cálculo, Ecuación. 23, se asume el valor de la resistencia de 15KΩ, para limitar la corriente a tierra. Y desde la respuesta calculada del valor del capacitor, tomamos el valor de capacitancia existente más cercano.

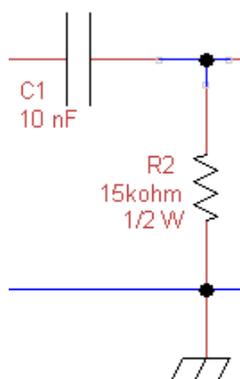


Figura. 25 Filtro pasa altos de la etapa de pre amplificación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

$$f_c = \frac{1}{2\pi * R_2 * C_2} = 2 \text{ KHz}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi * 15K\Omega * 2KHz} = 5.31 \text{ nF} \rightarrow 10 \text{ nF}$$

Ecuación. 23. Cálculo de la frecuencia de corte del filtro pasa altos

La segunda etapa de la pre-amplificación, Figura. 26, se realiza por medio de la combinación de diodo, resistor. El objetivo es utilizar directamente la fuente de alimentación como señal de entrada para el tercer inversor (C) para asegurar el valor de voltaje y corriente; la fuente conectada al ánodo del diodo por medio de una resistencia permite que el diodo este siempre polarizado directamente; por otro lado, en el cátodo esta la señal filtrada del oscilador. En consecuencia, se podrá calcular la Ecuación. 24 y la Ecuación. 25, que como resultado se obtiene adicionalmente una inversión de la señal.

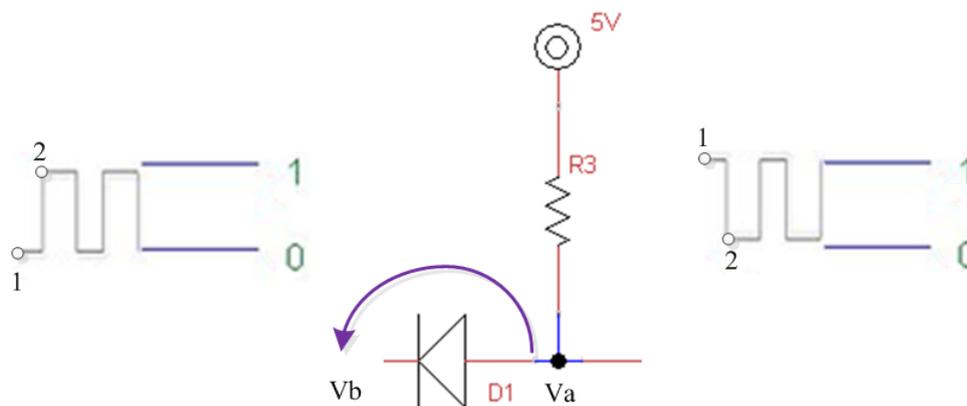


Figura. 26. Elementos para el circuito de Pre-amplificación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

$$V_{salida} = V_a - V_b = 5 - 0 = 5 [V]$$

Ecuación. 24. Salida del circuito de pre-amplificación, en el punto 1

$$V_{salida} = V_a - V_b = 5 - 5 = 0 [V]$$

Ecuación. 25. Salida del circuito de pre-amplificación, en el punto 2

El diodo elegido es el 1N914, que es un diodo convencional. Y en la Ecuación. 26, se calcula la corriente que atraviesa la resistencia R3.

$$I_{R3} = \frac{V}{R} = \frac{5}{5.5k\Omega} = 0.9 [mA]$$

Ecuación. 26. Cálculo de corriente R3

La segunda etapa de la pre-amplificación, contempla un transistor MOSFET, el mismo que permite la regulación de la corriente en el primario del transformador. Como se sabe, a la salida del tercer inversor (C) se tiene un voltaje de 5 [V], que será el voltaje utilizado para activar la compuerta del MOSFET.

El MOSFET seleccionado para dicha operación será el IRF830 el que por sus características mostradas en la Figura. 27, que corresponde al gráfico de relación de voltajes entre compuerta-fuente y corriente compuerta-drenaje del transistor, permite alimentar con una corriente de aproximadamente 500 [mA] al primario del transformador.

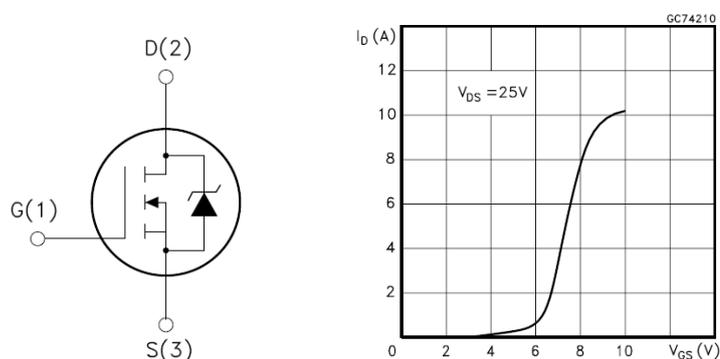


Figura. 27 (izq.) Circuito del IRF830., (der.) Resistencia Drain-Source

Fuente: (STMicroelectronics, 1998)

c. Amplificación por Transformador

En la etapa de amplificación el transformador se utiliza para elevar el voltaje, esto se consigue con relación al número de vueltas en el devanado primario y en el secundario del transformador, mírese en la Figura. 28 la representación del transformador. El transformador es un dispositivo que convierte la potencia eléctrica de AC de una tensión determinada a otra que puede ser, más alta o más baja que la primera a través de la acción de un campo magnético.

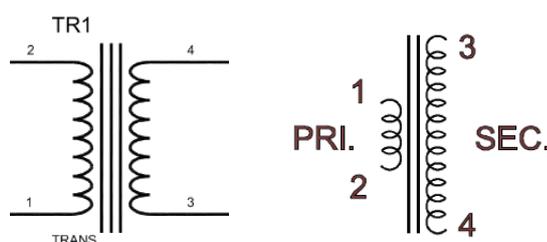


Figura. 28 (izq.) Símbolo del transformador con núcleo de ferrita, (der.)

Símbolo del transformador elevador de voltaje

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

La razón de voltajes del transformador es proporcional a la relación del número de vueltas; y por otro lado, la razón de corrientes del transformador es inversamente proporcional a la relación del número de vueltas, es decir; un transformador elevador de voltaje puede ser considerado como un transformador reductor de corriente o bien un transformador reductor de voltaje puede ser considerado como un elevador de corriente, mírese la Ecuación. 27 y la Tabla. 10.

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s}$$

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

Ecuación. 27 Razón del número de vueltas con las corrientes y los voltajes del transformador

Tabla. 10 Referencia para la relación de vueltas con la corriente y el voltaje

Siglas	Significado
N_p	Número de vueltas en el devanado primario
N_s	Número de vueltas en el devanado secundario
V_p	Voltaje en el devanado primario
V_s	Voltaje en el devanado secundario
I_p	Corriente que circula en el devanado primario
I_s	Corriente que circula en el devanado secundario

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

El transformador utilizado en la aplicación es un dispositivo comercial utilizado generalmente en circuitos en donde se requiere altos voltajes. Teniendo el transformador se realiza la caracterización del mismo en el Anexo 1, se puede observar el ensayo de vacío y el ensayo de cortocircuito. En la Ecuación. 28, se muestran los factores calculados en las pruebas del transformador.

$$N_p = 1$$

$$N_s = 33,91$$

Ecuación. 28 Factores calculados del número de vueltas del transformador elevador de voltaje

Con los factores mostrados anteriormente, se puede calcular el voltaje y la corriente del secundario del transformador, estos cálculos están en la Ecuación. 29.

$$V = \frac{V_p * N_s}{N_p} = \frac{5 * 33,91}{1} = 169.55 [V_{rms}] \text{ o } 293.66 [V_p]$$

$$I_s = \frac{N_p * I_p}{N_s} = \frac{500m}{33,91} = 14.75 [mA]$$

Ecuación. 29. Voltaje y corriente del secundario del transformador elevador

d. Circuito duplicador y regulador de voltaje

Los circuitos multiplicadores de voltaje se emplean para rectificar el voltaje de salida y elevarlo a dos, tres, cuatro o más veces. El tubo Geiger Müller necesita un alto voltaje con escasa corriente, suministrado por medio del circuito en análisis. El

circuito multiplicador utilizado corresponde a uno de onda completa, estos tienen un mejor desempeño a comparación de los circuitos de media onda (IAEA, 2002).

La Figura. 29, muestra el circuito utilizado como duplicador de voltaje de onda. Adicionalmente, en la Tabla. 11, se indica el voltaje pico que se logra en cada uno de los capacitores del circuito y el semiciclo correspondiente.

Tabla. 11 Funcionamiento de un circuito duplicador de voltaje

Semiciclo	Capacitor	Por acción de	Voltaje pico
+	C1	Conducción de D1	$V_m=294$ [Vdc]
-	C2	Suma de voltajes	$2V_m = 588$ [Vdc]

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

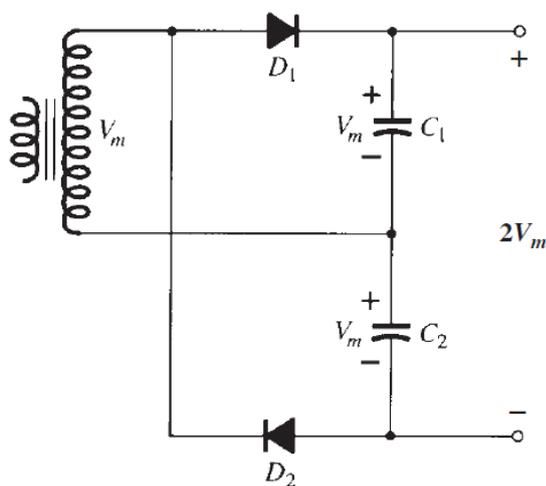


Figura. 29 Duplicador de voltaje de onda completa

Fuente: (Boylestad & Nashelky, 2009)

Para dimensionar el circuito se toma en cuenta los valores de corriente y voltaje del secundario del transformador. Es así que, para los diodos es necesario que puedan soportar una corriente de al menos 20 [mA], entonces será suficiente un típico diodo 1N4007. Y para los capacitores será necesario que soporten un voltaje mínimo 200 [V], pero para garantizar el funcionamiento se coloca capacitores cerámicos que soportan hasta 1000 [V], y con una capacitancia de 10 [nF], el mismo que se escogió en función de reducir el tiempo de carga, mírese la Ecuación. 30, en donde se puede apreciar que entre menor sea el valor de capacitancia, menor será el tiempo de carga y descarga de los capacitores.

$$\tau = RC$$

Ecuación. 30 Ecuación de tiempo de Carga del capacitor

La regulación del alto voltaje se realiza por medio de los diodos zener D2, D3 y D4 dispuestos en serie, de la Figura. 30. Los diodos D4 Y D5, aportan una regulación de 200 [V] cada diodo; mientras que el D6 aporta el restante para llegar a los 500 [V]. Sabiendo que en el circuito de alto voltaje los valores de corriente son bajos, este no represente un factor importante al elegir los diodos reguladores. Los diodos escogidos son: dos diodos zener del tipo 1N5281B y un diodo restante del tipo 1N5271B.

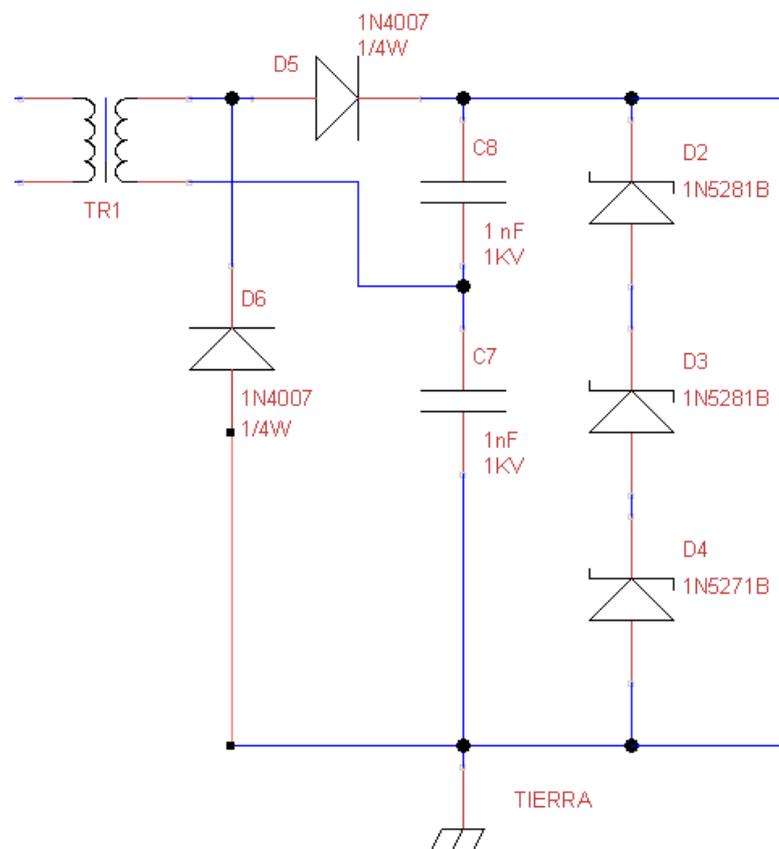


Figura. 30. Regulación del circuito por medio de diodos zener

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.1.2.2. Resultado del diseño

Como resultado se obtiene el circuito que se observa en el Anexo 4 2 Circuito de Alto Voltaje de Corriente Directa, y la Tabla. 12 en donde se enlistan los elementos con sus respectivas dimensiones.

Tabla. 12 Cálculo de los elementos del circuito de alto voltaje

Elemento	Nombre	1er valor	1era unidad	2do valor	2da unidad
C1	103J	10	<i>nF</i>	12	<i>V</i>
C2	2A472J intercap	4,7	<i>nF</i>	12	<i>V</i>
C7	103M	10	<i>nF</i>	1	<i>KV</i>
C8	103M	10	<i>nF</i>	1	<i>KV</i>
D1	1N914	0,5	<i>W</i>		
D2	1N5281B o 1N5956B	0,5	<i>W</i>	200	<i>V</i>
D3	1N5281B o 1N5956B	0,5	<i>W</i>	200	<i>V</i>
D4	1N5271B o 1N4148PH	0,5	<i>W</i>	100	<i>V</i>
D5	1N4007	0,5	<i>W</i>		
D6	1N4007	0,5	<i>W</i>		
Q1	IRF830				
R1		4,2	<i>KΩ</i>	0,5	<i>W</i>
R2		15	<i>KΩ</i>	0,5	<i>W</i>
R3		5,5	<i>KΩ</i>	0,5	<i>W</i>
TR1	Trafo elevador				
U1	CD4049AE				

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.1.3. Acondicionamiento de Pulsos Nucleares

El circuito de acondicionamiento de pulsos nucleares, tiene por objetivo mejorar la señal proveniente del cátodo del tubo GM, como se observa en la Figura. 31 a la entrada del presente bloque ingresa un pulso analógico con amplitud variable, por consecuencia, esta señal no es tratable; y a la salida se tendrá una señal rectangular adecuada para un dispositivo microcontrolador con tecnología TTL.

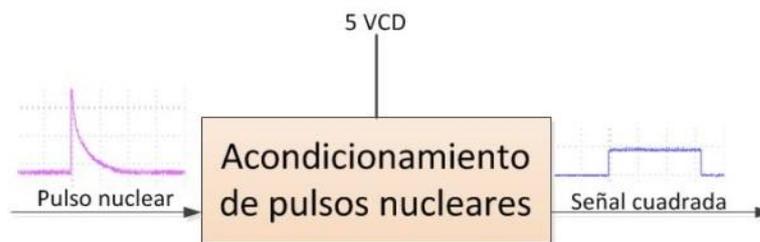


Figura. 31 Objetivo del circuito de acondicionamiento de pulsos nucleares

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.1.3.1. Diseño del Circuito Acondicionador de Pulsos Nucleares

El diagrama de bloques propuesto para el acondicionamiento de pulsos nucleares, se presenta en la Figura. 32, en donde se han tomado en cuenta consideraciones para que cumpla con satisfacción la función encomendada. Se puede observar que el diagrama está compuesto por los circuitos de acoplamiento, inversión y el multivibrador monoestable. Para el cumplimiento del objetivo del circuito de acondicionamiento de pulsos nucleares, se ha considera el circuito multivibrador monoestable como solución para el problema planteado.



Figura. 32 Diagrama de bloques del circuito de Acoplamiento de Pulsos Nucleares

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

a. Circuito de acoplamiento

Obsérvese la Figura. 33, en donde se gráfica el objetivo del circuito de acoplamiento, a este bloque ingresarán los pulsos nucleares del cátodo del tubo Geiger Müller, con una amplitud variable de 20 a 40 voltios, medido experimentalmente, y a la salida se tiene pulsos nucleares de 5 voltios de amplitud, sin preocuparse todavía de la duración del pulso nuclear. Para cumplir este objetivo, en el circuito de acoplamiento está presente una resistencia en paralelo a un diodo zener, Figura. 34; el primer elemento limitará la circulación de corriente, mientras que el segundo elemento será el encargado de regular el voltaje.

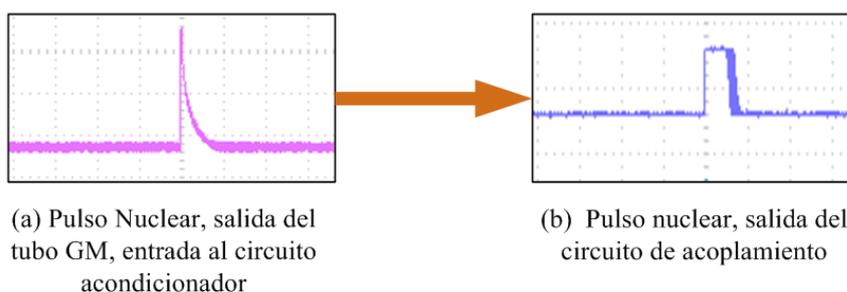


Figura. 33 Objetivo del circuito de acoplamiento

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

Para dimensionar los elementos del circuito de acoplamiento, se toma en cuenta que la diferencia de potencial presente en estos elementos será de 20 a 70 voltios, obtenido experimentalmente, y teniendo en cuenta que la corriente debe ser baja, alrededor de $200\mu A$ para evitar daños en los elementos, se tiene las consideraciones

de la Ecuación. 31 y la Ecuación. 32. Es importante resaltar que el valor del diodo zener debe ser de 5.1V, para lograr el objetivo propuesto del circuito.

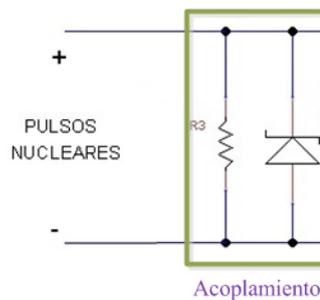


Figura. 34 Circuito de acoplamiento

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

$$R = \frac{V}{I} = \frac{70}{200\mu A} = 350K\Omega$$

Ecuación. 31 Cálculo del valor de la resistencia del circuito de acoplamiento

$$P_R = \frac{V^2}{R} = \frac{40^2}{350K\Omega} = 5mW \rightarrow \frac{1}{2} W$$

Ecuación. 32 Cálculo de la potencia de la resistencia del circuito de acoplamiento

b. Circuito inversor

El circuito inversor, tiene por objetivo preparar la señal para que esta pueda disparar el circuito multivibrador monoestable; para ello debe invertir la señal del pulso nuclear, mírese la Figura. 35.

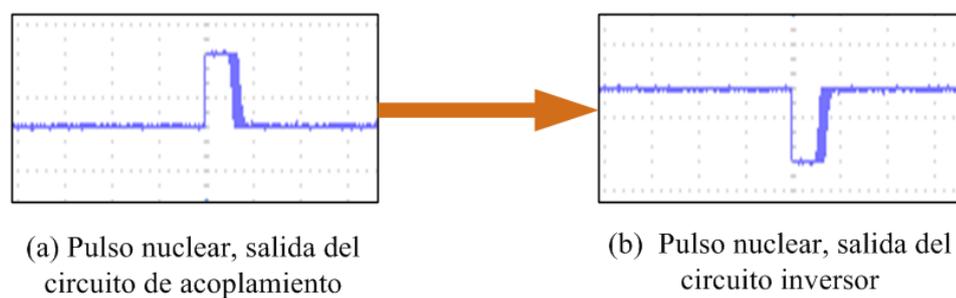


Figura. 35 Objetivo del circuito inversor

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

La solución es utilizar una compuesta adicional del circuito Oscilador simétrico, que utiliza como inversor el integrado 4049, el esquemático equivalente se muestra en la Figura. 36, en donde se observa que la relación del voltaje de salida con el de entrada garantiza el funcionamiento del sub circuito inversor.

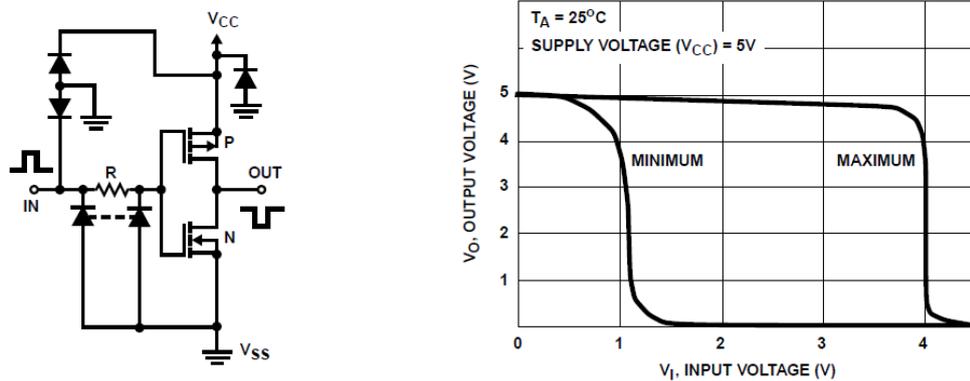


Figura. 36 Diagrama esquemático del integrado 4049

Fuente: (Texas Instruments, 2004)

c. Circuito multivibrador monoestable

El circuito multivibrador monoestable tiene por objetivo, como se puede ver en la Figura. 37, la conversión del pulso nuclear inverso a un pulso nuclear rectangular con una amplitud de 5 voltios. Todo esto para que sea una señal adecuada para el conteo de los pulsos en un sistema micro-procesado.

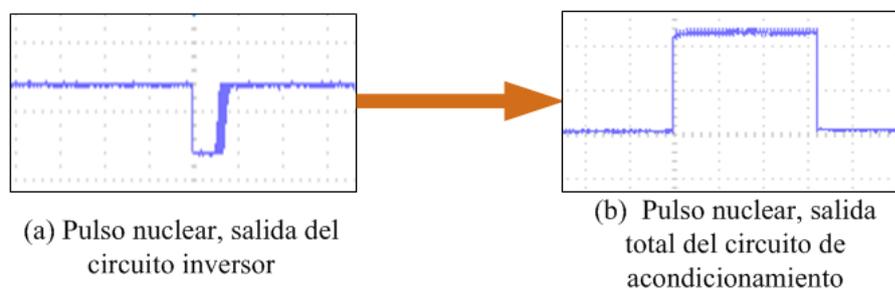


Figura. 37 Objetivo del circuito multivibrador monoestable

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

El circuito multivibrador monoestable utiliza como circuito integrado principal al temporizador 555, estos temporizadores son circuitos analógicos y digitales que se utilizan en varias operaciones de temporización, siendo un circuito integrado muy aceptado por mucho tiempo (Boylestad & Nashelky, 2009). La función que cumple el circuito multivibrador monoestable se muestra en la Figura. 38, cuando la señal de entrada tiene un flanco negativo activa el circuito monoestable, teniendo a la salida una señal rectangular, durante un intervalo dado por la Ecuación. 33. El intervalo de este circuito oscila desde microsegundos hasta segundos.

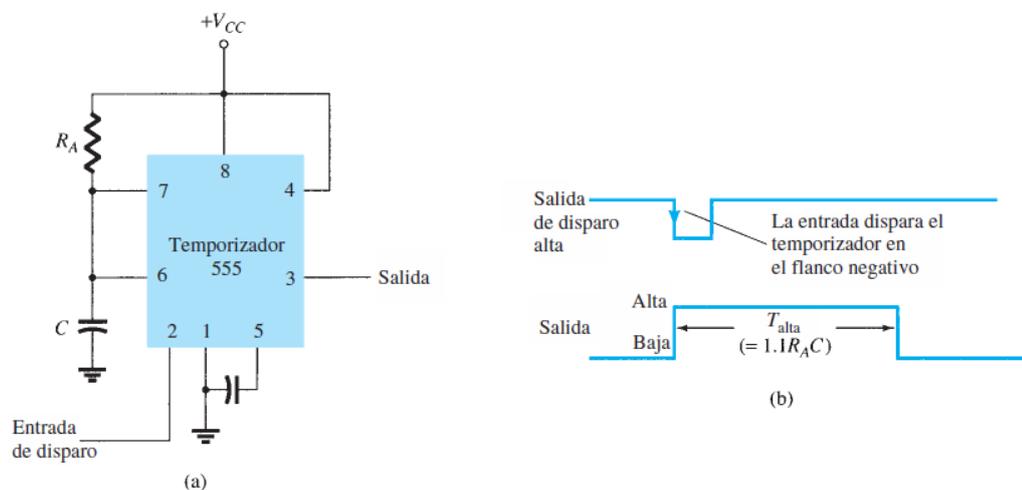


Figura. 38 Operación de temporizador 555 como circuito multivibrador monoestable:(a) circuito; (b) formas de onda

Fuente: (Boylestad & Nashelky, 2009)

$$T_{alta} = 1.1R_A C$$

Ecuación. 33 Tiempo en alto del circuito monoestable

Fuente: (Boylestad & Nashelky, 2009)

Para el dimensionamiento de los elementos del circuito multivibrador monoestable será suficiente con el cálculo de la Ecuación. 33. Como se ha mencionado, el tiempo de duración del pulso nuclear del tubo Geiger Müller, al detectar una partícula de radiación es de 500 *useg*. Pero, para garantizar el conteo de los pulsos en el microcontrolador, se asume un tiempo en alto de 1.5 *mseg* y asumiendo un valor para la resistencia de 150 *KΩ*, procedemos al cálculo en la Ecuación. 34.

$$C = \frac{T_{alta}}{1.1R_A} = \frac{1.5mseg}{1.1 * 150K\Omega} = 9.09 nF \rightarrow 10 nF$$

Ecuación. 34 Cálculo de la capacitancia del circuito multivibrador monoestable

Debido al tiempo que el pulso nuclear está en alto a la salida del circuito multivibrador es de 1.5 *mseg*, se puede calcular el número máximo de pulsos que se pueden contar en un segundo, Ecuación. 35, este cálculo tiene incidencia directa en el límite superior de medida del instrumento.

$$N^{\circ} \text{ max pulsos} = \frac{1 \text{ seg}}{1.5 \text{ mseg}} = 666 \text{ pulsos por minuto}$$

Ecuación. 35 Cálculo del número máximo de pulsos contados

3.1.3.2. Resultado del diseño

Como resultado del diseño del circuito de acondicionamiento de pulsos nucleares se obtiene el circuito de la Figura. 39, anexo 4.3 Acondicionador de pulsos y la Tabla. 13.

Tabla. 13 Dimensionamiento de los elementos del circuito de acondicionamiento de pulsos nucleares

Elemento	Nombre	1er valor	1era unidad	2do valor	2da unidad
C5	103J	10	<i>nF</i>	100	<i>V</i>
C6	103J	10	<i>nF</i>	100	<i>V</i>
D7	1N4733A, 1N751A	0,5	<i>W</i>	5,1	<i>V</i>
R4		470	<i>KΩ</i>	0,5	<i>W</i>
R5		150	<i>KΩ</i>	0,5	<i>W</i>
U1	CD4049AE				
U6	LM555CN				

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

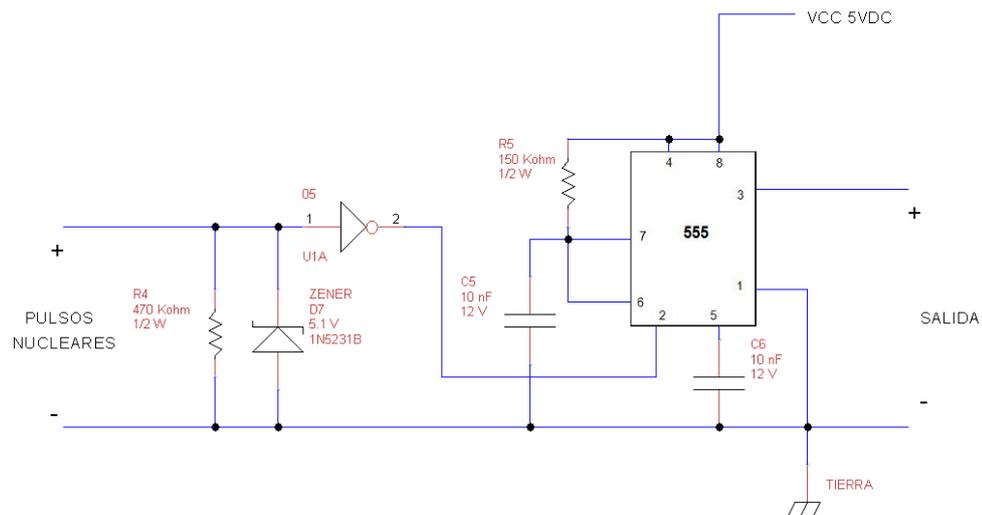


Figura. 39. Circuito a implementarse como acondicionamiento de pulsos nucleares

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.1.4. Diagrama de flujo del Detector de Radiación

A partir de la Figura. 1, se define el flujo total del Sistema y la interrelación que existe entre los dos bloques que lo conforman. Mírese los Anexos 2 y 3, en donde se encuentran dichos diagramas.

En el Anexo 2, corresponde al Diagrama de flujo del Detector de Radiación, el mismo que se ha dividido en cuatro acciones fundamentales:

- Conteo de pulsos nucleares.
- Estadística de la radiación.
- Almacenamiento en la memoria EEPROM.

- Interacción con el bloque de Adquisición y Almacenamiento.

El flujo comienza con la definición de las entradas, salidas, temporizadores, comunicación, librerías; definición de variables como Cuentas por segundo (CPS), Cuentas por minuto (CPM), Dosis de radiación y el factor de conversión de pulsos a exposición, Figura. 40.

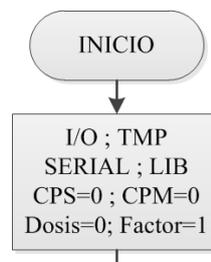


Figura. 40. Definición del bloque Detector de Radiación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

El conteo de pulsos nucleares, se encarga de contar y acumular los pulsos durante un segundo, determinando así las Cuentas por Segundo (CPS). A continuación, Figura. 41, la estadística de la radiación aplica la distribución de Poisson, promediando los 10 últimos conteos; adicionalmente, se determina la exposición a la radiación multiplicando el promedio de pulsos por el factor de conversión de unidades; y por último, acumula por 60 segundos la cuenta de los CPS para obtener la Cuenta por Minuto (CPM).

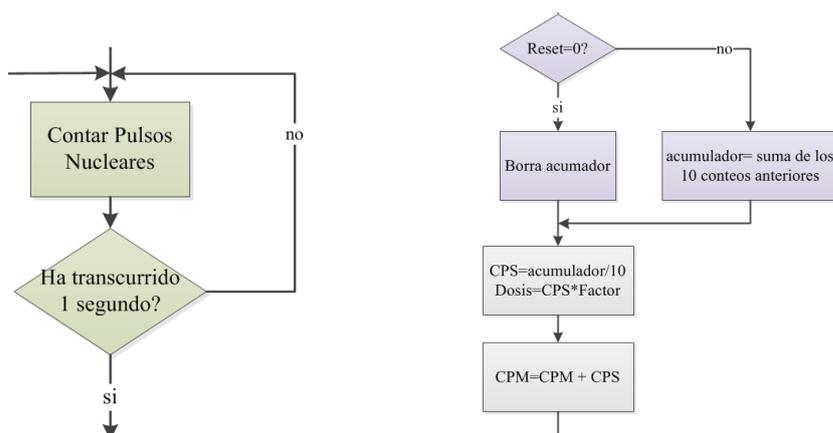


Figura. 41. (izq.) Conteo de pulsos y (der.) Estadística de la radiación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

El Almacenamiento en la memoria EEPROM, tiene por objetivo que el Detector de Radiación pueda independientemente almacenar información sin necesitar de elementos externos. Se almacenará los CPM cada 60 segundos, mírese la Figura. 42.

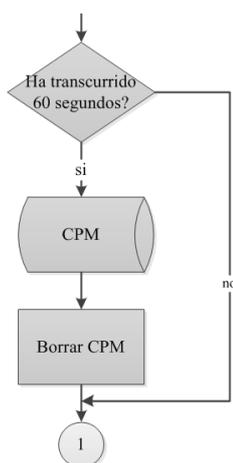


Figura. 42. Almacenamiento EEPROM

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

En la sección Interacción con el bloque de Adquisición y Almacenamiento, Figura. 43, se pretende mostrar las acciones conjuntas que realizan los bloques constitutivos del sistema. Así, se envía desde el Detector: la identificación del módulo, la cuenta en tiempo real y los datos almacenados en la memoria EEPROM.

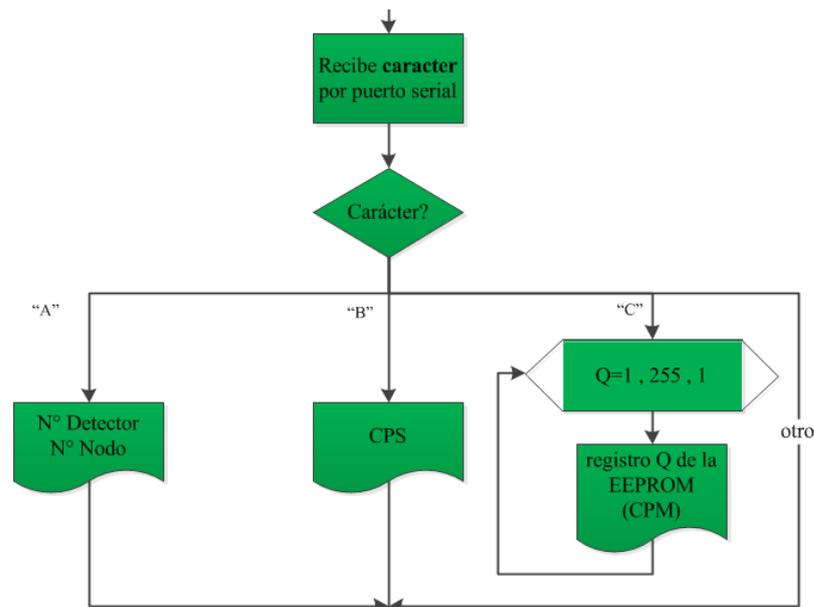


Figura. 43. Interacción con el bloque de Adquisición y Almacenamiento

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.1.5. Circuito Micro Procesado

El bloque detector de radiación es independiente en funcionamiento del bloque de Adquisición y Almacenamiento, de forma que, puede medir dosis de radiación sin necesidad de estar conectado a un sistema computacional más complejo. Este precedente exige que el detector de radiación pueda independientemente realizar

todas las funciones encomendadas para el bloque en mención. Por esto, el detector de radiación tiene una estructura micro-procesada que permite convertir los pulsos nucleares en datos para visualizar, grabar internamente y transmitir al siguiente bloque del sistema.

3.1.5.1. Diseño del Circuito Micro Procesado

Observando las necesidades expuestas en el diagrama de flujo del Detector de Radiación, se plantea que el sistema micro procesado debe tener los requerimientos explicados en la Figura. 44.

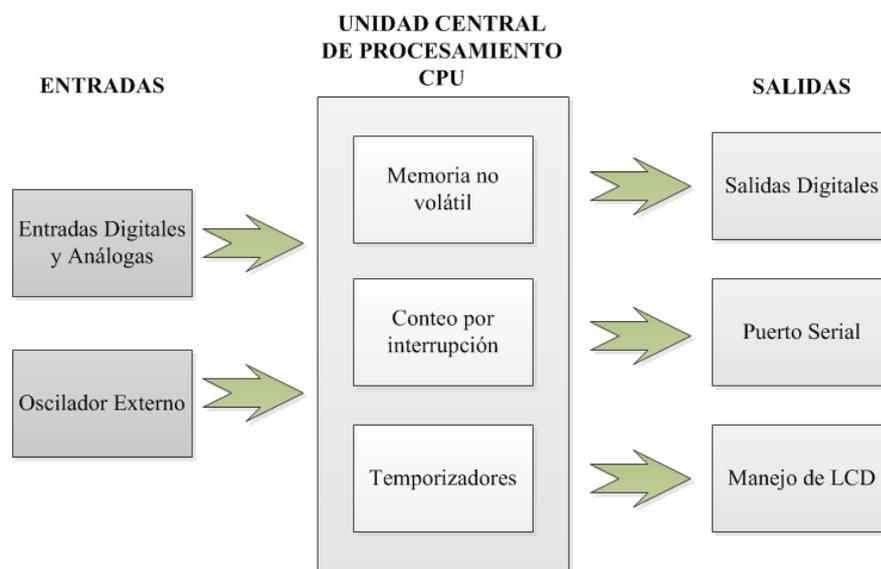


Figura. 44 Puertos de entrada y salida para el sistema micro-procesado del bloque detector de radiación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

La anterior figura, muestra que se requieren entradas digitales, analógicas y que el sistema permita utilizar un oscilador externo para mejorar la precisión en tiempo, utilizando un oscilador de 4 [Mhz]. Internamente debe tener una memoria no volátil para el almacenamiento de datos, y se requiere que tenga la posibilidad de contar por medio de interrupciones y el dispositivo debe permitir que por interrupciones se detecte el cambio en las entradas. Y como salidas, se requiere salidas digitales para indicadores de estado del detector, puerto RS232 para disponer de una interfaz de comunicación y manejo de LCD para una lectura en tiempo real de la exposición de radiación.

De las muchas opciones de dispositivos que pueden utilizarse como unidad central de proceso en el Detector de Radiación, el dispositivo electrónico que más se ajusta a los requerimientos establecidos en la Figura. 44, debido a que presenta todos los requerimientos, la posibilidad de montaje en un circuito impreso y su bajo costo, hacen que el microcontrolador sea perfecto para la aplicación en cuestión. El microcontrolador seleccionado para la aplicación es el PIC16F887.

a. PIC16F887

El micro controlador es un circuito integrado, en cuyo interior posee toda la arquitectura de un computador, esto es CPU, memorias RAM, EEPROM, y circuitos de entrada y salida. Además, el microcontrolador es capaz de realizar la

tarea de muchos circuitos lógicos como compuertas, conversores, temporizadores, decodificadores, entre otros. Simplificando todo el diseño a una placa de reducido tamaño, bajo costo y pocos elementos. (Reyes, 2006).

El microcontrolador es un circuito integrado programable el cual contiene todos los componentes necesarios para controlar el funcionamiento de una tarea específica asignada. Para llevar a cabo la tarea, el microcontrolador utiliza muy pocos componentes asociados y una memoria de tipo no volátil denominada ROM, donde se almacena el programa que determina el funcionamiento del mismo. La utilización de un microcontrolador en un circuito reduce notablemente el tamaño y el número de componentes utilizados en éste y en consecuencia, disminuye el número de fallas, el volumen y el peso de los equipos, entre otras ventajas. (Palacios & Lopez , 2004). El diagrama de pines del controlador en mención se muestra la Figura. 45.

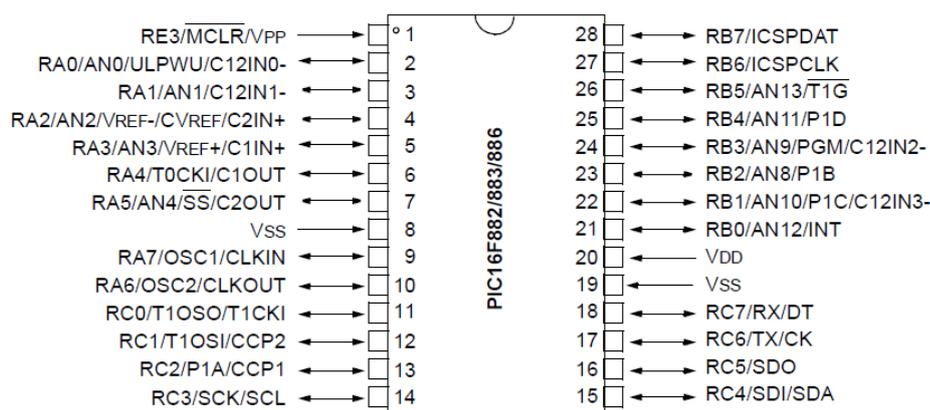


Figura. 45 Diagrama de pines del PIC 16F887

Fuente: (Microchip Technology Inc., 2007)

Características principales del PIC16F887

- Estructura RISC, con alto rendimiento.
- Versión mejorada del PIC16F877A.
- 35 pines de entrada/salida con control individual.
- Oscilador interno de precisión y conexión a oscilador externo.
- Entradas y salidas digitales
- Puerto RS232.
- Visualización por LCD
- Modo ahorro de energía en modo Sleep.

Mírese la Tabla. 14, en donde se dispone las características adicionales del PIC16F887.

Tabla. 14 Características adicionales del PIC16F887

Dispositivo	Memoria de Programa	Memoria de datos		I/O	10 bit A/D (canales)	ECCP/CCP	EUSART	Comparadores	Timers 8/16 bit
	Flash (palabras)	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)						
PIC16F887	8192	368	256	35	14	1/1	1	2	2/1

Fuente: (Microchip Technology Inc., 2007)

La administración de puertos en relación a la aplicación de cada uno de ellos, se muestra en la Figura. 46. Esta administración designa al puerto A como el conversor análogo digital y es la conexión del oscilador externo; el puerto B es destinado al manejo de las entradas y salidas digitales; el puerto C se encarga de la comunicación RS232; y por último, el puerto D está destinado al control del LCD.

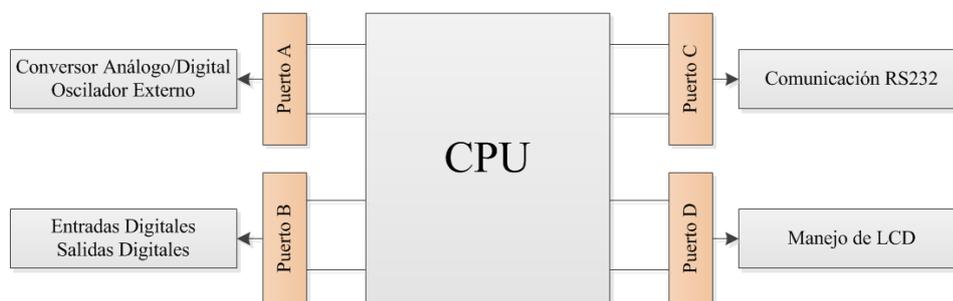


Figura. 46. Administración de puertos del Micro controlador

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

b. Entrada Análoga

La entrada análoga, es necesaria para medir el valor del voltaje de la batería del detector, y reportar, oportunamente cuando la batería debe recargarse, se recomienda ver más detalles en el diseño de la Alimentación Eléctrica. Para lograr el objetivo de medir el voltaje de la batería se debe realizar un divisor de tensión para reducir el voltaje de la batería, mírese la Figura. 47 y los cálculos en la Ecuación. 36, sabiendo que el voltaje del divisor ingresa a la entrada analógica del microcontrolador; como consideraciones de funcionamiento se tiene, que si el voltaje de la batería es menor a 5,5 se debe alertar. El cálculo de la corriente de entrada el microcontrolador es calculado en la Ecuación. 37, determinándose que es un valor óptimo, sin tener riesgo en su funcionamiento.

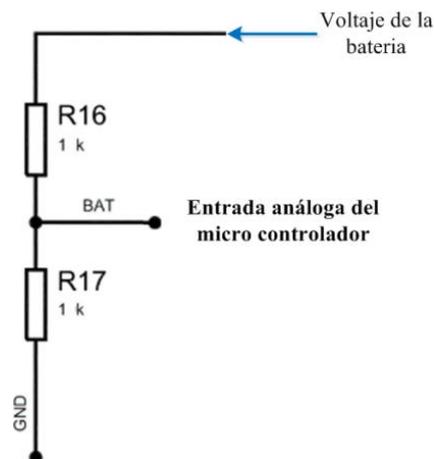


Figura. 47. Divisor del voltaje de la batería

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

$$V_{in} = \frac{V_{bat} * 1K}{2K}$$

$$V_{in} = \frac{5,5 * 1K}{2K} = 2.25 [V]$$

Ecuación. 36. Cálculo del divisor de tensión para el voltaje de la batería

$$I_{3 max} = \frac{V}{R} = \frac{8V}{1k} = 8 [mA]$$

Ecuación. 37. Cálculo de la corriente de la tercera entrada

Internamente el micro controlador, tiene un conversor análogo digital que tiene una resolución de 10 bits. Para calcular el voltaje de entrada, en la programación del microcontrolador, se debe aplicar la Ecuación. 38.

$$V = \frac{5 * N^{\circ} \text{ leido}}{1024}$$

Ecuación. 38. Cálculo del voltaje de entrada en el conversor análogo-digital

c. Entradas y Salidas digitales

Se utilizan dos entradas y tres salidas digitales del micro controlador las mismas que se muestran en la Figura. 48. Como entradas tenemos el pulso nuclear para el conteo y una entrada de reseteo manual de la cuenta de pulsos nucleares. Por otro lado, como salidas: la primera se activa cuando se detecta un pulso nuclear, la segunda se activa cuando se envía un dato por la interfaz de comunicación y la última es intermitente al correcto funcionamiento del detector.

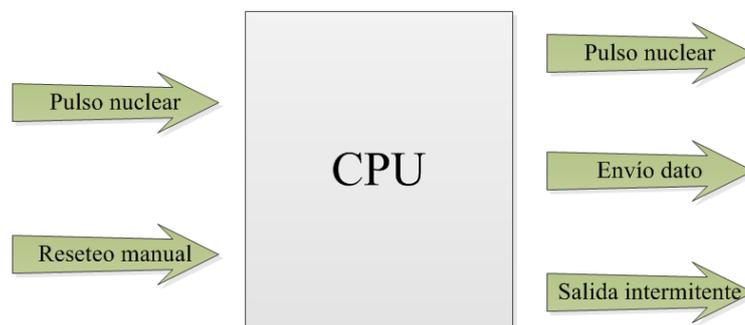


Figura. 48. Entradas y salidas utilizadas en la aplicación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

Para dimensionar las resistencias de las entradas, considérese que el voltaje del pulso nuclear será máximo 5 [V] a la salida del circuito multivibrador monoestable; y la alimentación del pulsador para el reseteo manual es de 5 [V]. En consecuencia, las dos reciben el mismo tratamiento calculado en la Ecuación. 39, en donde se elige una resistencia de 220 Ω . Adicionalmente se presenta la Figura. 49, en donde se muestra el circuito de ingreso de las dos entradas digitales.

$$I_{1,2} = \frac{V}{R} = \frac{5}{220} = 22,7 \text{ [mA]}$$

Ecuación. 39. Cálculo de la corriente de entrada el micro controlador

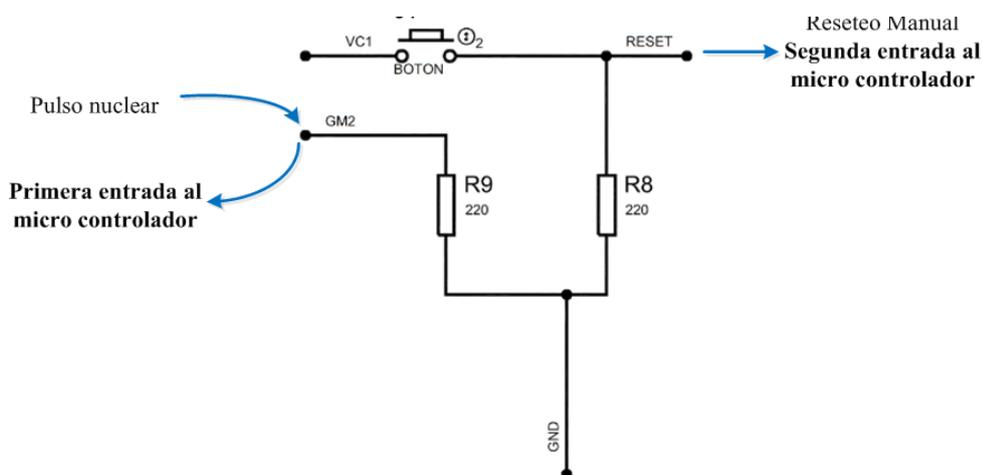


Figura. 49. Circuito de las entradas digitales al micro controlador

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

Y mientras que para dimensionar las salidas, hay que considerar que éstas están conectadas a tres respectivos diodos led, los que son protegidos por resistencias de 330Ω , en la Ecuación. 40, se calcula la corriente que atraviesa los diodos mencionados.

$$I_{salida} = \frac{V}{R} = \frac{5}{330} = 15,15 [mA]$$

Ecuación. 40. Cálculo de corriente de las tres salidas del micro controlador

d. Manejo de LCD

El LCD, en el proyecto tiene el objetivo de informar en tiempo real la exposición a radiación, el estado de la batería y el modo de funcionamiento que tiene el Detector de Radiación. Como se mencionó, el LCD se encuentra conectado en el puerto D del microcontrolador; la conexión entre LCC y microcontrolador, Figura. 50, mírese las resistencia conectadas que fueron determinadas tomando en cuenta el mejor contraste del LCD, por medio del método de prueba y error.

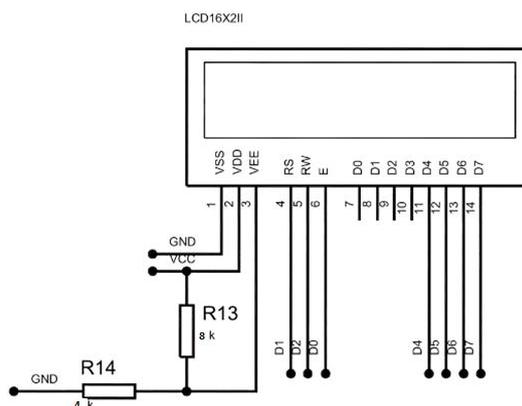


Figura. 50. Diagrama de conexión del LCD

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

El LCD físicamente es un dispositivo que permite desplegar caracteres en 16 columnas y 2 filas. El diseño de la interfaz es importante para desplegar la información necesaria que requiera el operador. El diseño se muestra en la Figura. 51, a la izquierda se dispone de la información de la medición de radiación, en la parte superior están las cuentas por segundo o CPS en tiempo real; y en la parte inferior se muestra el valor de la exposición en mR/h aplicando el análisis estadístico previo.



Figura. 51. Diseño de la disposición de la información en el LCD

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

Mientras que en la parte derecha se dispone de información general de interés para el operador, en la parte superior se muestra el modo de funcionamiento del Detector representado por los símbolos, mostrados en la Tabla. 15; y en la parte inferior se dispone del estado de la batería, en el caso de que el voltaje esté bajo aparecerá la letra “B”, caso contrario no se despliega ningún mensaje.

Tabla. 15 Modos de funcionamiento con el símbolo a desplegar

Modo	Símbolo
Inicialización	“Γ”
Envío de datos en Tiempo real	“>”
Borrado de la memoria	“X”
Lectura de la memoria EEPROM y envío de la información	“<”

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

e. Cálculo del Temporizador y medición de pulsos nucleares

El TIMER 1 es el seleccionado para garantizar que el intervalo de conteo sea 1 segundo, para que se garantice las cuentas en CPS. En la aplicación, este TIMER trabaja como temporizador, incrementando la cuenta en cada ciclo de instrucción. Los cálculos realizados, se presentan en la Ecuación. 41 y la Ecuación. 42, nótese que la constante P corresponde al Pre-escalador del Temporizador.

$$T = T_{CM} * P * (65536 - \text{Carga TMR1})$$

Ecuación. 41 Tiempo de desbordamiento del TIMER1

$$T_{CM} = \frac{4}{F_{OSC}}$$

Ecuación. 42 Tiempo de Máquina

Fuente: (García Breijo, 2008)

Entonces, para generar un ciclo que permita realizar retardos de un segundo se realizan los cálculos de la Ecuación. 43, se calculó 0,5 segundos debido a que está en el límite superior del contador, y el proceso se repite dos veces.

$$0.5 = \frac{4}{F_{OSC}} * (65536 - x) * P$$

$$x = TMR1 = 3036$$

Ecuación. 43 Cálculo de la carga del Temporizador 1

Para implementar el modelo estadístico de Poisson en el micro controlador, descrito en la estadística del número de cuentas de la página 37, se debe calcular el promedio de las cuentas por segundo; este se implementa por programación calculando el promedio de los 10 últimos valores de las cuentas por segundo.

f. Administración de Memoria del micro controlador

Las exposiciones a la radiación son almacenadas directamente en el Detector de Radiación, estas se graban en la memoria EEPROM del micro controlador, sabiendo que la EEPROM, es un tipo de memoria que puede ser programada, borrada y reprogramada eléctricamente. Las celdas de memoria EEPROM resisten hasta millón de modificaciones y tienen 256 espacios de memoria (Microchip Technology Inc., 2007), mírese la Ecuación. 44, en donde se realiza un análisis de la memoria del detector de radiación.

$$\text{Capacidad de memoria} = 256 \text{ bytes}$$

$$\text{Tamaño del dato} = 2 \text{ bytes}$$

$$\text{N}^\circ \text{ de registros permitidos} = \frac{256 \text{ bytes}}{2 \text{ bytes}} = 128 \text{ registro}$$

Ecuación. 44 Análisis de la memoria del Detector de Radiación

3.1.5.2. Resultado del Diseño

Como resultado se obtiene el circuito que se observa en el Anexo 4.4 Circuito Micro Procesado e Interface de comunicación, y la Tabla. 16 en donde se enlistan los elementos con sus respectivas dimensiones.

Tabla. 16 Dimensionamiento de los elementos del circuito del micro controlador

Elemento	Nombre	1er valor	1era unidad	2do valor	2da unidad
C14	Capacitor micro	22	pF		
C15	Capacitor micro	22	pF		
D11	Led rojo				
D12	Led verde				
D13	Led verde Run				
J4	Botón Reset				
LCD	LCD16X32				
R10	Led rojo	330	Ω	0,5	W
R11	Led verde	330	Ω	0,5	W
R12	Activación micro	10	$K\Omega$	0,5	W
R13	R2 LCD	4	$K\Omega$	0,5	W
R14	R1 LCD	8	$K\Omega$	0,5	W
R6	Limitador del reset	220	Ω	0,5	W
R8	Tubo Geiger Müller	220	Ω	0,5	W
R9	Led rojo	330	Ω	0,5	W
U5	PIC16F887				
X1	Cristal 4 MHz				

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.1.6. Interfaz de Comunicación

La interfaz de comunicación del Sistema de Detección de Radiación Gamma, por el Alcance del Proyecto, debe tener dos posibilidades de comunicación: **inalámbrica** como interface para la operación normal; y **alámbrica** en aplicaciones en donde se requiera que el detector tome medidas dentro de un lugar en donde sea imposible una comunicación de este tipo, por ejemplo, cuando se requiera calibrar el detector en el Laboratorio de Patrones Secundarios de la SCAN, sabiendo que se

realiza dentro de un bunker blindado de plomo. En la Figura. 52, se representan las dos formas de comunicación con el Bloque de Adquisición y Almacenamiento.

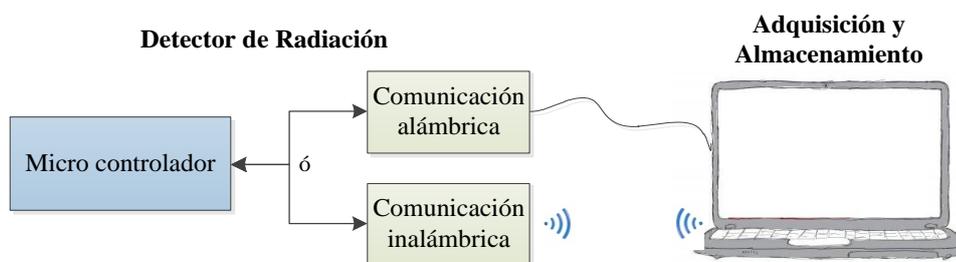


Figura. 52. Interface de comunicación del Detector de Radiación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.1.6.1. Diseño de la Interface de comunicación

La comunicación es bidireccional, permite la interacción entre el Bloque Detector y el de Adquisición y Almacenamiento; las interfaces (alámbrica e inalámbrica) funcionan una a la vez, el usuario tomará la decisión de cuál interface utilizar para la medición a realizarse. La comunicación consiste en el intercambio de información entre los dos bloques constitutivos del sistema, definida en los diagramas de flujo del Anexo 2 y Anexo 3, los caracteres que se intercambian entre los dos boques constitutivos están en la Tabla. 17, en donde se describe detalladamente el tamaño y la velocidad que se necesita en la comunicación, en cada una de las acciones de: inicialización, tiempo real y lectura de la memoria del detector.

Tabla. 17 Comunicación entre los bloques del sistema

Acción	Adquisición y Almacenamiento		Detector de Radiación	
	Envía carácter	Tamaño	Responde información	Tamaño o velocidad
Inicialización	"A"	7 bits	N° de detector	8 bits
			N° de nodo	8 bits
Tiempo real	"B"	7 bits	Cuentas por segundo	8 bits/seg
Memoria	"C"	7 bits	Registro memoria	max. 2048 bits
Total		21 bits		2072 bytes

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

Y tomando en cuenta que se podría realizar todas las funciones descritas, en la Tabla. 17, en un segundo de funcionamiento del sistema; se requiere el cálculo de la velocidad mínima que debe tener los canales de comunicación, la velocidad se determina a partir de la sumatoria de los datos, hipotéticamente en un segundo de funcionamiento. Esta velocidad mínima debe ser,

$$V_{min} = 2093 \text{ bps}$$

Ecuación. 45. Velocidad mínima del canal de comunicación

a. Comunicación alámbrica RS232

La comunicación elegida como interface alámbrica para el detector de radiación es la RS232, debido a que la norma RS232 es la más habitual en la comunicación

serie, por la fiabilidad en la implementación, distancia y la velocidad de transmisión la hacen ideal para la presente aplicación. La comunicación RS232 comunica un equipo terminal de datos (Detector de radiación) y el equipo de comunicación de datos (Adquisición y Almacenamiento). Las características eléctricas de la señal en esta norma establecen que la longitud máxima entre el terminal de datos y el de comunicación de datos no debe ser superior a 15 metros y la velocidad máxima de transmisión debe ser de 20000 bps, que cumple con la característica de velocidad del sistema.

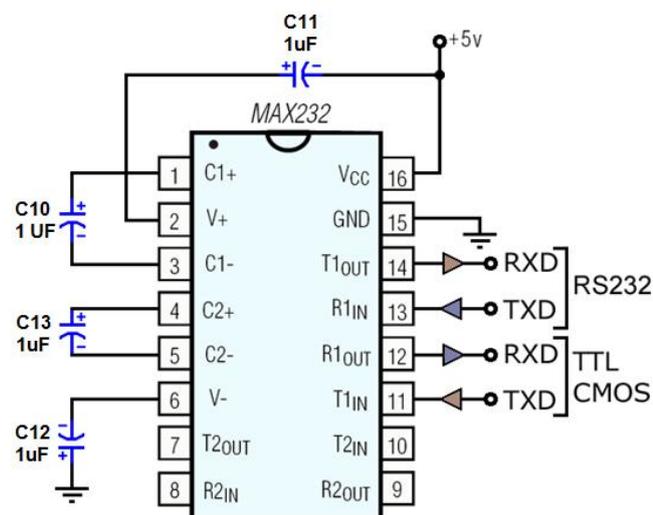


Figura. 53 Conexión RS232/TTL con un MAX232

Fuente: (Dispositivos Digitales, 2013)

Los niveles lógicos de RS232 no son compatibles con TTL, que es la señal que utilizan los PIC en el módulo USART; en consecuencia, se debe utilizar un conversor de nivel de TTL a RS232, esto se logra a través del circuito integrado MAX232, mírese la Figura. 53, en donde está el circuito a implementarse.

En la comunicación alámbrica será necesario realizar un cable serial, en donde un terminal tiene tres cables conectados al circuito MAX232 del Detector, Figura. 53, y estos serán conectados por medio de un conector DB-9 al computador con la conexión que se muestra en la Figura. 54.

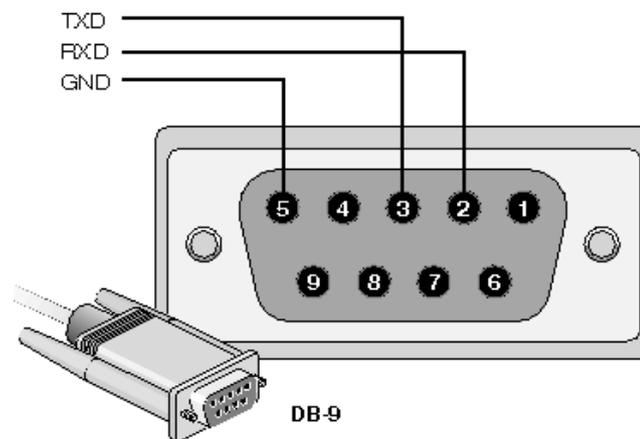


Figura. 54. Cable para la comunicación alámbrica del Detector

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

b. Comunicación inalámbrica por medio de módulos XBEE

La comunicación elegida como interface inalámbrica para el detector de radiación son los módulos de radio frecuencia XBee fabricados por la empresa Digi (Digi International Inc., 2013). Seleccionados en base, a que los módulos presentan una solución excepcionalmente potente para la implementación de redes inalámbricas en sus aplicaciones de comunicaciones de datos, por la velocidad y

distancia de transmisión, que cumplen con la característica requeridas por el sistema. Se muestra el logo de Digi y el módulo XBee en la Figura. 55.



Figura. 55 (sup.) Logo Digi, (iz.) Modulo XBEE, (der.)

Fuente: XStick (Digi International Inc., 2013)

Los módulos XBee trabajan en protocolo 802.15.4 (explicado en página 99) que pertenece a las redes PAN (Personal Área Network). Se proporciona información técnica de los módulos en la Tabla. 18, mírese la existencia de tres clases de XBee que se diferencian por la distancia en la transmisión y el consumo de corriente, mientras que la tercera clasificación es el módulo para conectarlo en el USB de un computador, estas tres clases de módulos tienen la capacidad de comunicarse entre sí.

En la Figura. 56, se representa como están dispuesto los módulos XBee en el sistema, a continuación se explica el conexionado de cada de estos módulos con el Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma.

Tabla. 18 Especificaciones de los módulos XBee y XBee-Pro

Especificaciones	XBEE	XBEE PRO	XStick
Banda frecuencia	2.4 Ghz	2.4 Ghz	2.4 Ghz
Alimentación eléctrica	2.8 Vdc – 3.4 Vdc	2.8 Vdc – 3.4 Vdc	5 Vdc del USB
Potencia de transmisión RF	0 dBm , 1 mW	18 dBm , 63 mW	0 dBm , 1 mW
Distancia al aire libre	90 m	1.6 km	15 m
Distancia cubierta	30 m	90 m	40 m
Consumo de corriente, recepción	45 mA	50 mA	64 mA
Consumo de corriente, transmisión	50 mA	215 mA	64 mA
Velocidad de transmisión	250 kbps	250 kbps	250 kbps

Fuente: (Digi International Inc., 2013)

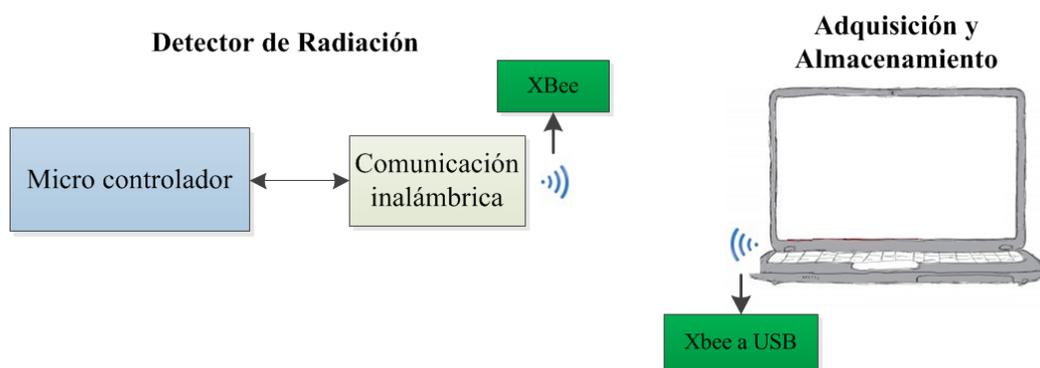


Figura. 56. Disposición de los módulos XBee en los bloques del sistema de Detección

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

Para utilizar los módulos con el microcontrolador, mírese la Figura. 57, en donde se observa el conexionado con el módulo XBee, aquí se conecta únicamente dos pines para la comunicación. Pero, como los módulos XBee funcionan con un voltaje de 3.3V no con TTL, lo que significa que se debe introducir un dispositivo que realice esta disminución de voltaje.

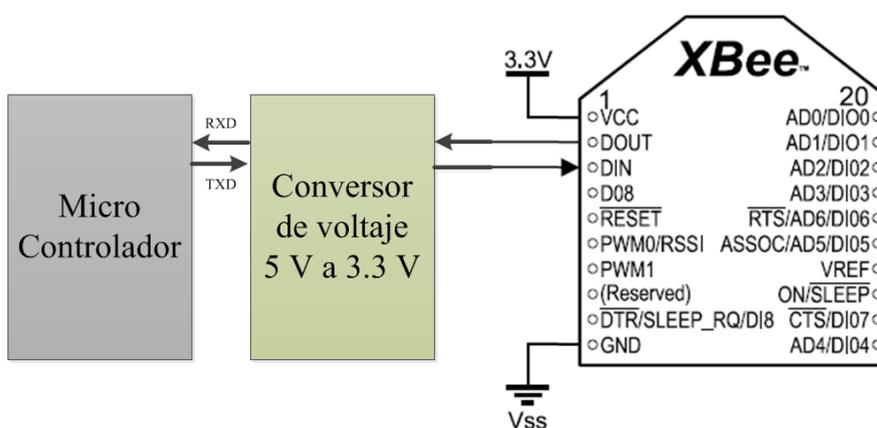


Figura. 57 Interface típica entre módulo XBEE y un microcontrolador

Fuente: (Hebel & Bricker, 2010)

El convertor de Voltaje 5 V a 3.3 V, es el dispositivo que permite adaptar la distancia de los pines del módulo XBee que es 2mm (0.079 in) a la convención de las tarjetas impresas de 2.54mm (0.1 in), también es una tarjeta de adaptación de los 5 voltios del micro-controlador, convirtiéndose en los 3.3 voltios que requieren los módulos XBee. Y por último, condiciona la salida de 5 V de un dispositivo TTL a la entrada del módulo en mención, Figura. 58.

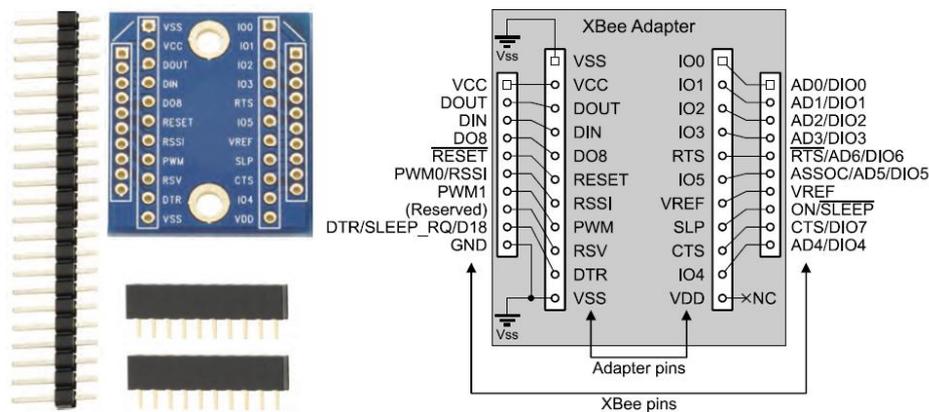


Figura. 58 Tarjeta adaptadora XBee5V/3.3V

Fuente: (Hebel & Bricker, 2010)

Y en el bloque de Adquisición y Almacenamiento es necesario proporcionar de un dispositivo XBee a USB que permita comunicar de forma inalámbrica con un computador, Figura. 57, hacia el bloque Detector de Radiación y viceversa. Para ello se dispone de dos alternativas, según la medición a realizarse.

La primera, Figura. 59, es disponer de un adaptador Xbee a USB, que permitirá comunicarse de forma serial entre los dos bloques constitutivos del sistema, y proporcionará alimentación por medio de la conversión de 5V de USB a 3.3 para el módulo XBee, (Hebel & Bricker, 2010). El módulo XBee utilizado en esta disposición dependerá de la distancia a la cual se quiere comunicar, Tabla. 18, los módulos XBee y Xbee Pro permitirán comunicarse a largas distancias.

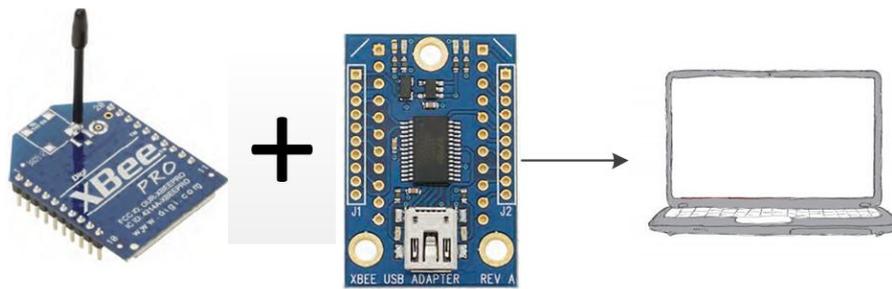


Figura. 59 Adaptador XBee a USB

Fuente: (Hebel & Bricker, 2010)

La segunda, Figura. 60, es conectar directamente el XStick de (Digi International Inc., 2013) en el computador, de esta forma se permitirá comunicarse de forma serial entre los dos bloques constitutivos del sistema. Con la limitación de largo alcance, Tabla. 18, pero facilitando la instalación del sistema.

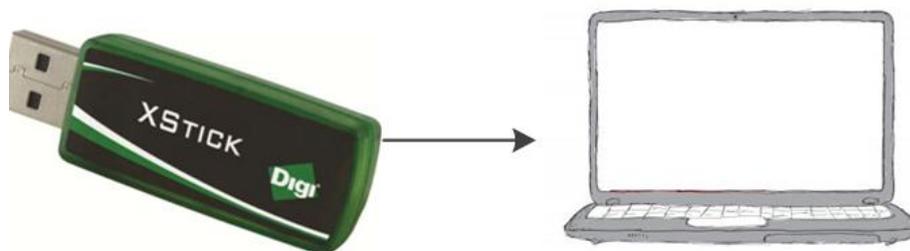


Figura. 60. Conexión entre computador y XStick de Digi

Fuente: (Digi International Inc., 2013)

c. Red de Detectores

El protocolo que se implementa por medio de los módulos XBee es la IEEE 802.15.4, que es una herramienta de tecnología inalámbrica de corto alcance bajo

consumo, provee flexibilidad y es una solución para aplicaciones de seguridad y automatización, el protocolo implementa las capas física y de enlace de datos, Figura. 61 (Craig, 2004).

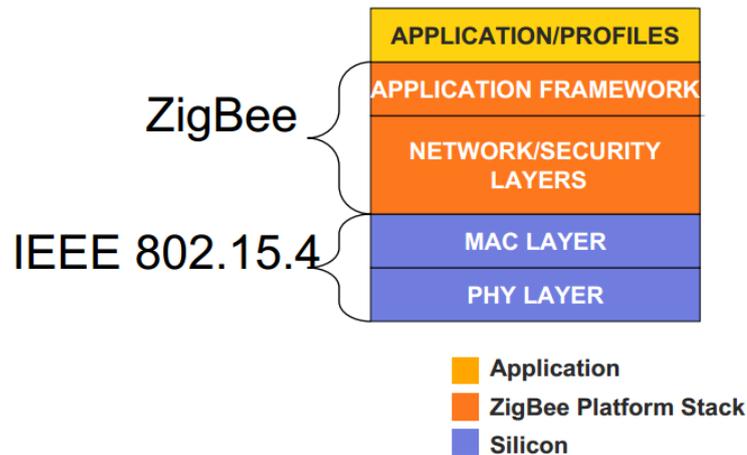


Figura. 61. Capas que implementa el protocolo IEEE 802.15.4

Fuente: (Craig, 2004)

El protocolo como capa física define al aire como medio físico, determina las características materiales, maneja las señales eléctricas del medio de transmisión y los niveles de tensión y se encarga de transmitir el flujo de bits a través del medio. Y como capa de enlace de datos direcciona al medio, detecta errores, distribuye ordenadamente las tramas, y controla el flujo de los datos.

En la Figura. 62, se diagrama la red punto a punto que se implementa en el Sistema, en donde se envían los datos entre dos nodos, nodo base AA (Adquisición y Almacenamiento) y el nodo DR (Detector de Radiación), la red estará identificada plenamente lo que permite que dos sistemas funcionen sin que interfieran su comunicación (Hebel & Bricker, 2010).

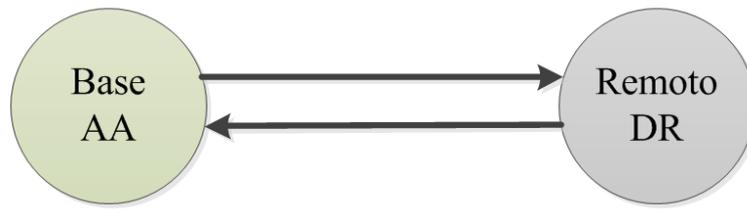


Figura. 62. Red Punto a Punto del Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

La red Punto a Multipunto, Figura. 63, se podrá implementar en el presente Sistema con varios Detectores de Radiación, cada uno identificado por un número de nodo, la comunicación realizará entre la base y un nodo remoto a la vez.

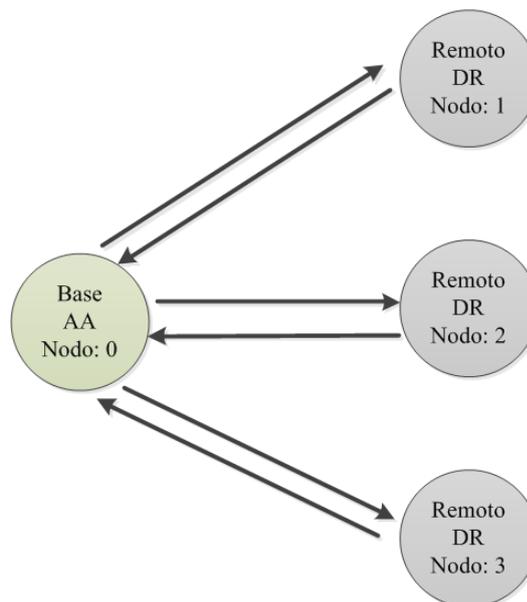


Figura. 63 Red Punto – Multipunto del Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.1.6.2. Resultado del Diseño

Como resultado se obtiene el circuito que se observa en el Anexo 4.4 Circuito Micro Procesado e Interface de comunicación, y la Tabla. 19 en donde se enlistan los elementos con sus respectivas dimensiones.

Tabla. 19 Dimensionamiento de los elementos del circuito de comunicación

Elemento	Nombre	1er valor	1era unidad	2do valor	2da unidad
C10	Electrolítico	1	μF	12	V
C11	Electrolítico	1	μF	12	V
C12	Electrolítico	1	μF	12	V
C13	Electrolítico	1	μF	12	V
U8	XBEE				
U9	XBEE USB				
U10	XStick				
U3	5V A 3.3V XBEE				
U4	MAX232				

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.1.7. Alimentación Eléctrica

La fuente de alimentación se desarrolla sabiendo que el bloque Detector de Radiación requiere de voltaje de corriente directa con una amplitud de 5 V y una corriente de 300 [mA], determinada experimentalmente, con el mejor desempeño en regulación y con el mínimo rizado posible. Con portabilidad en su funcionamiento, es decir, puede ser transportado por que tiene baterías que le permiten funcionar sin estar conexas a una fuente de alimentación externa.

La fuente de alimentación eléctrica o regulador de voltaje se define según (Boylestad & Nashelky, 2009), como: “Comenzamos con un voltaje de ca y obtenemos un voltaje de cd constante al rectificar el voltaje de ca y luego filtrarlo para obtener un nivel de cd, y, por último, lo regulamos para obtener un voltaje de cd fijo deseado” (p. 773).

3.1.7.1. Diseño del circuito de alimentación eléctrica

Obsérvese la Figura. 64, en donde se gráfica el objetivo del circuito de alimentación eléctrica, en donde se tiene como entrada: la alimentación eléctrica externa domiciliar de 110 [Vac] y el voltaje de las baterías Niquel Cadmio, nótese que este es un canal bidireccional con el objetivo de cargarlas cuando sea necesario; mientras que la salida es el voltaje de 5 voltios para el funcionamiento del detector.

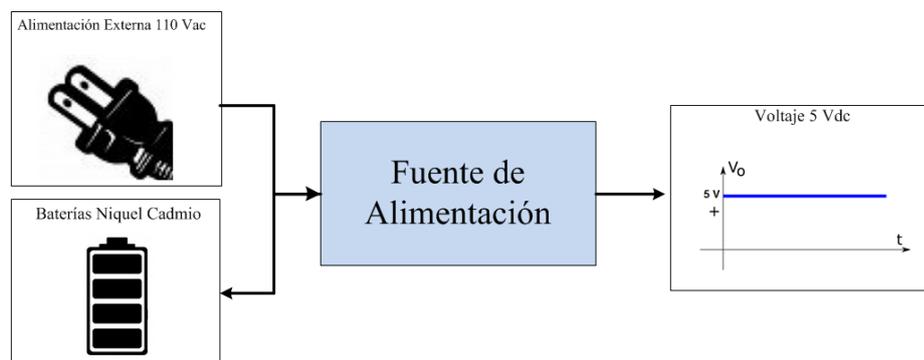


Figura. 64. Diagrama del objetivo de la fuente de alimentación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

El circuito de la fuente de alimentación está compuesto por dos sub circuitos, Figura. 65, que son: el conversor de corriente alterna a corriente directa y el de regulación y acople de baterías. Estos dos circuitos son independientes y se implementan en diferentes circuitos impresos, debido a que si fallara, especialmente el conversor AC-CD, todo el Detector de radiación dejaría de funcionar.

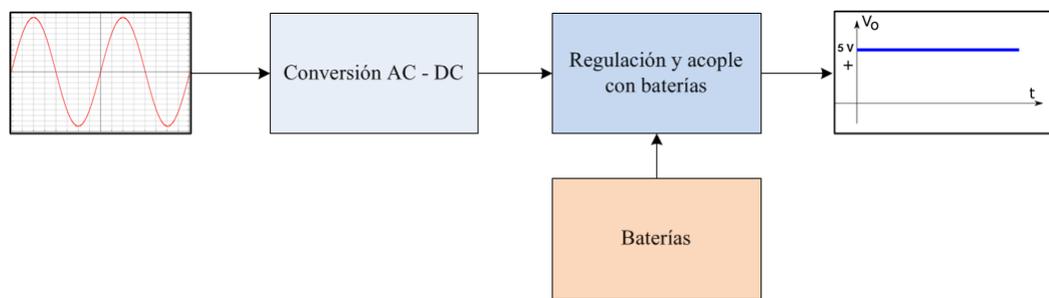


Figura. 65. Bloques constitutivos de la fuente de alimentación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

a. Conversión AC - DC

Este circuito generalmente utiliza un transformador para reducir el voltaje de línea de corriente alterna, después del transformador se utiliza un rectificador, seguido por un filtro por capacitor, y por último, según las necesidades de precisión un regulador de tensión. En la Figura. 66 se muestra el diagrama de bloques típico de este tipo de circuito. Este circuito es un conversor comercial que proporciona a la salida un voltaje de 12 V y 1.25 A.

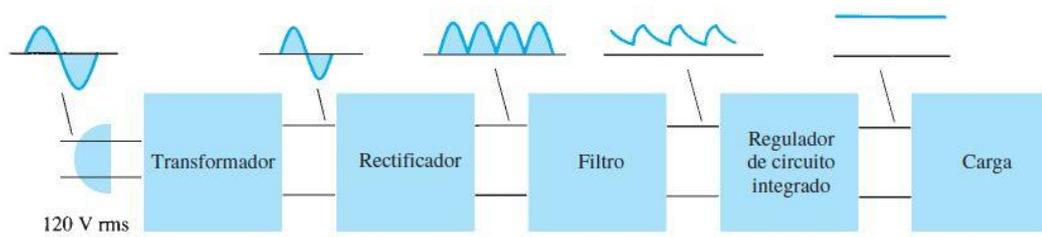


Figura. 66 Diagrama de bloques de una fuente de alimentación

Fuente: (Boylestad & Nashelky, 2009)

b. Regulación y acople con baterías

El circuito que se plantea para la regulación y acople de baterías es el que se muestra en la Figura. 67, el circuito está dividido en tres secciones: la primera es para cargar la batería, la segunda es para el filtrado y regulación y por último la etapa de lectura del voltaje de la batería.

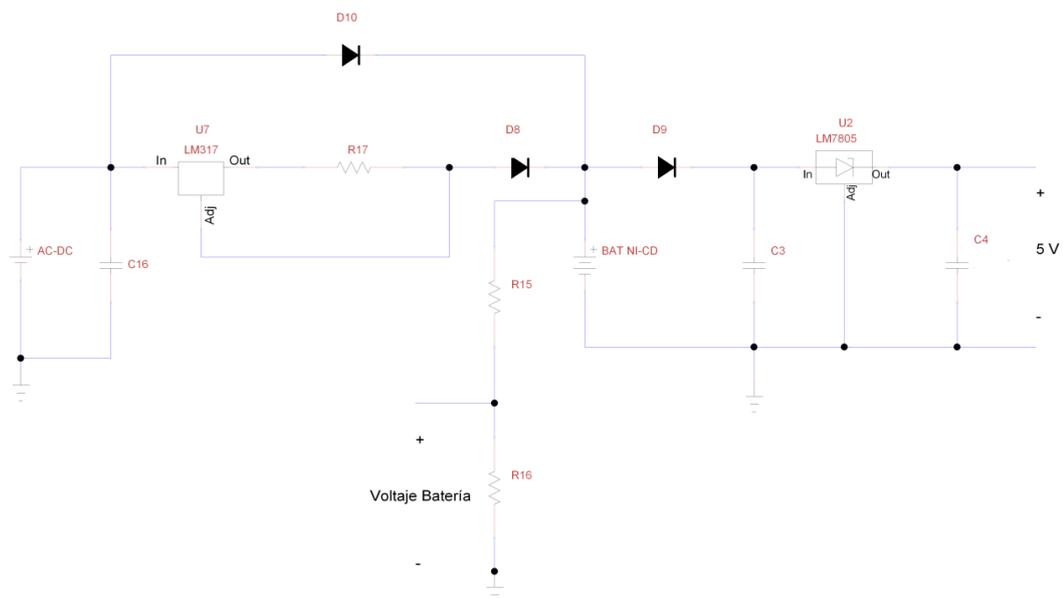


Figura. 67. Circuito de regulación y acople de baterías

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

La primera etapa está compuesta por los elementos desde la alimentación externa, del diagrama Figura. 67, hasta el diodo D8 exceptuando las resistencias R15 y R16, este sub circuito tiene la responsabilidad de cargar la batería y alimentar las siguientes etapas cuando está conectada la alimentación externa. Cabe mencionar, que si no existe una fuente externa, esta etapa no funciona.

El funcionamiento del circuito se basa en el regulador de voltaje U7, que es el LM317, que con la resistencia R17 proporciona la corriente necesaria para cargar la batería, mientras que el diodo D8 evita que la corriente de la batería regrese al regulador de voltaje; el diodo D3 cumple dos funciones: la primera es de proteger al circuito antecesor cuando no proporcione corriente y la segunda, es que permite que pase la corriente directamente de la fuente externa cuando la batería este en proceso de carga y el capacitor C3, cumple la función de filtrado de la señal de entrada.

Para el cálculo de R17 es necesario analizar la batería que se utiliza en el circuito, la que se muestra en la Figura. 68, esta batería es de 3.6 V, está compuesta químicamente por Níquel - Cadmio y tiene una capacidad de 700 *mAh*. Como es necesario tener dos baterías en serie para tener la capacidad de alimentar al integrado U2, la batería tienen las características mostradas en la Ecuación. 46. Y sabiendo que el circuito consume un total de 300 *mA*, se calcula la duración aproximada de la batería después de un proceso de carga en la Ecuación. 47.



Figura. 68. Batería Ni-Cd utilizada en el Detector de Radiación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

$$V = 7.2 [V]$$

$$\text{Capacidad} = 1.4 [Ah]$$

Ecuación. 46. Características del banco de baterías utilizadas

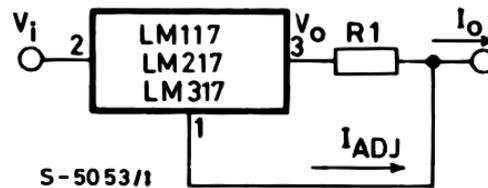
$$\text{Tiempo} = \frac{1.4 A}{0.3 Ah}$$

$$\text{Tiempo} = 4.66 \text{ horas}$$

Ecuación. 47. Tiempo aproximado de duración de baterías, después de un proceso de carga

Para el proceso de carga se entregará al banco de baterías una corriente que es proporcional al 10% de la capacidad de las mismas, para este caso debe ser de 140 mA. Entonces se realiza el cálculo, en base al diagrama y fórmula dado por el

fabricante y mostrado en la Figura. 69. El cálculo de la resistencia se realiza en la Ecuación. 48, y se aproxima al valor más cercano de resistencia.



$$I_o = \frac{V_{ref}}{R_1} + I_{ADJ} \approx \frac{1.25V}{R_1}$$

Figura. 69. Diagrama de conexión y ecuación del regulador LM317

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

$$R_{17} = \frac{1.25 V}{140mA} = 8.98 \rightarrow 10\Omega$$

Ecuación. 48. Cálculo de la resistencia para el regulador de corriente

Para elegir los diodos que cumplirán la función de D8 y D10, sabiendo que por estos atravesará máximo una corriente de 500 [mA] en funcionamiento normal, se escoge el diodo 1N4007 que soporta hasta 1A de corriente directa.

La segunda etapa está compuesta por los elementos de la Figura. 67, que comprende desde la batería hasta la salida del diagrama exceptuando las resistencias R15 y R16. El circuito tiene la responsabilidad de filtrar y regular la tensión.

El funcionamiento comienza en D8 que se encarga de evitar la inversión de la polaridad de la batería; después el U2, que corresponde al LM7805, regula la tensión en 5V y los capacitores C3 y C4 se encargan de realizar el filtrado de la señal. Para el cálculo de la corriente de salida, sabemos que esta dependerá exclusivamente de la carga, es decir, de todos los elementos que necesitan alimentarse de esta fuente de voltaje, mientras estos elementos no exijan más de los 1.5 A que proporciona el regulador LM7805 (Texas Instruments, 2003) no existirá ningún problema en el funcionamiento del circuito.

La tercera etapa está compuesto por las resistencias R15 y R16; tiene el objetivo de reducir el voltaje de la batería, para ingresarlo por la entrada análoga del micro controlador para leerlo y evaluar si el voltaje de la batería está bajo los 5.5 V que es el límite de funcionamiento del regulador, determinado experimentalmente; y si es el caso, desplegar un mensaje para que el operario pueda conectarlo a una fuente externa. El cálculo de las resistencias se realiza en la Ecuación. 49; asumiendo que los valores de las resistencias son de 1 K Ω ; entonces para valores inferiores a 2.25 V, se debe desplegar una alerta visual del estado de la batería.

$$V_{div} = V_{min} * \frac{R_{15}}{R_{15} + R_{16}} = \frac{V_{min}}{2} = 2.25 [V]$$

Ecuación. 49. Cálculo del divisor de tensión del voltaje de la batería

3.1.7.2. Resultado del diseño

Con este precedente, y sabiendo que el circuito de regulación y acople de baterías necesita mínimo para alimentar al regulador (LM7805) de 7,7 voltios, dado por el fabricante. El conversor AC-DC comercial debe tener al menos las características de la Ecuación. 50

$$V \geq 7.7 [V] \quad y \quad I \geq 500 [mA]$$

Ecuación. 50. Características mínimas del conversor AC-DC

Como resultado se obtiene el circuito que se observa en el Anexo 4.5 Circuito de Alimentación Eléctrica, y la Tabla. 20 en donde se enlistan los elementos con sus respectivas dimensiones.

Tabla. 20 Dimensionamiento de los elementos del circuito de Alimentación Eléctrica

Elemento	Nombre	1er valor	1era unidad	2do valor	2da unidad
C16	Electrolítico	100	<i>nF</i>	50	<i>V</i>
C3	Electrolítico	100	<i>nF</i>	10	<i>V</i>
C4	Electrolítico	220	<i>uF</i>	10	<i>V</i>
D10	1N4007	0,5	<i>W</i>		
D8	1N4007	0,5	<i>W</i>		
D9	1N4007	0,5	<i>W</i>		
R15	Divisor batería	1	<i>Kohm</i>	0,5	<i>W</i>
R16	Divisor batería	1	<i>Kohm</i>	0,5	<i>W</i>
R17	Resistencia	10	<i>ohm</i>	0,5	<i>W</i>
U2	LM7805				
U7	LM317T				

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.1.8. Diseño Mecánico

El diseño mecánico del Detector de Radiación, se lo realiza antes del circuito impreso para determinar así, las dimensiones máximas de ancho y largo de la tarjeta electrónica, la caja en la cual está confinado el detector de radiación se muestra en la Figura. 70 y Figura. 71, que son la parte delantera y trasera, respectivamente.

Las dimensiones del case del detector de radiación, son de: ancho 15.72 [cm] de largo, 9.51 [mm] de ancho y 5 [cm] de altura, Figura. 72. Con este precedente, la tarjeta electrónica se ha realizado con las dimensiones de 12,5 [cm] de largo y 8 [cm] de ancho.

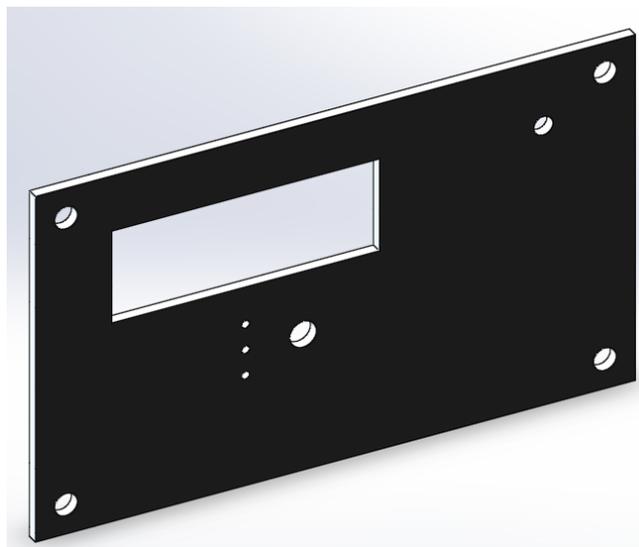


Figura. 70. Parte frontal de la caja para el Detector de Radiación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

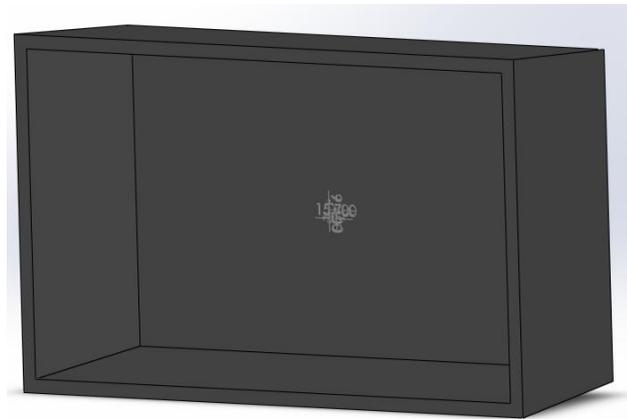


Figura. 71. Parte trasera de la caja para el Detector de Radiación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

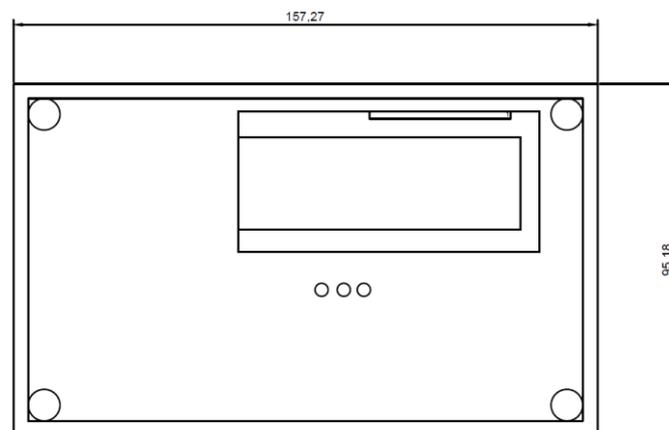


Figura. 72 Dimensiones de la caja del Detector de Radiación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

La disposición de los elementos está distribuida de forma que la tarjeta electrónica estará sujeta a la cara frontal del case para poderlo retirar y facilitar la visualización de los elementos internos. Y las baterías de alimentación estarán alojadas en la parte trasera del case del Detector de Radiación.

3.1.9. Circuito Impreso

El presente apartado tiene por objetivo el diseño y la realización del circuito electrónico sobre un soporte rígido que lleva situados los conductores sobre él de forma pegada y sujeta, este es el circuito impreso.

Para el diseño del circuito impreso se ha considerado las etapas de desarrollo del esquemático, simulación y fabricación del arte de PCB utilizando aplicaciones que permiten realizar el Diseño Asistido por Computadora (CAD). Se establecen técnicas, normas y recomendaciones que se han tomado en cuenta durante el avance del mismo, solucionando las diversas anomalías, físicas, electromagnéticas y de radiación, presentes en el PCB.

Para la presente etapa del proyecto se ha utilizado recomendaciones del libro Diseño y Fabricación de circuitos impresos del (CEKIT, 2000), y sugerencias del artículo Técnicas de diseño, desarrollo y montaje de circuitos impresos de (Salas & Pérez, 2007). Mírese la Figura. 73 que contiene los tipos de sugerencias y recomendaciones al momento de diseñar una PCB, que son detallados en los siguientes apartados.

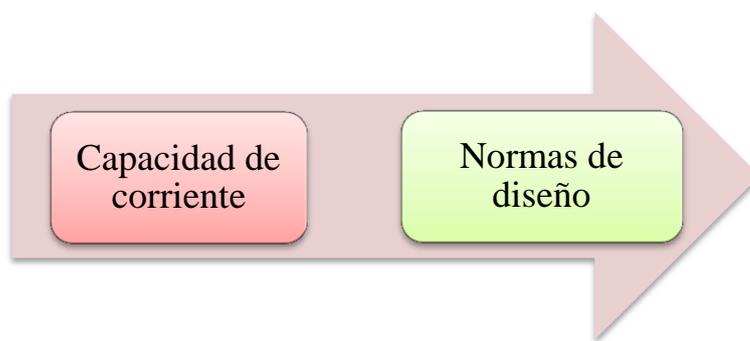


Figura. 73 Tipos de sugerencias y recomendaciones en los PCB's

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.1.9.1. Normas de diseño del circuito impreso

Las normas tomadas en cuenta para la disposición de los elementos del circuito impreso se enlistan a continuación:

- Entre pistas próximas y entre pistas y puntos de soldadura es mínimo $0,8\text{ mm}$.
- La distancia entre pistas y los bordes de la placa es aproximadamente 5 mm .
- Las resistencias están separadas de la placa 1 mm . (Educar Chile, 2007).
- Se utiliza líneas rectas y ángulos de 45° lo que agiliza el diseño y le da una buena presentación.

- Los componentes por su forma y tamaño que deben ir montados sobre los paneles, para conectarlos con los otros componentes que están montados sobre el circuito impreso, se debe dejar una dona o pad para allí colocar un terminal o para insertar el cable que va hacia dicho elemento.
- Las perforaciones se realizan utilizando brocas de 0.8 mm para todos los agujeros de los componentes y si es necesario, con una broca de $1,2\text{ mm}$.
- Las perforaciones de los agujeros por donde pasan los tornillos de sujeción de los circuitos en el chasis se utilizó una broca de $3,5\text{ mm}$.
- Puntos de prueba (TP o test point) a la salida de cada etapa, en lugares de la placa donde se pueda conectar instrumental fácilmente.
- No existen pistas, ni componentes cerca de los bordes de las placas donde puedan tener contacto con los tornillos de fijación, guías o con la estructura.
- Se diseña evaluando que los componentes puedan cambiarse sin necesidad de extraer otro.

3.1.9.2. Capacidad de corriente

Las líneas que unen los puntos de conexión en los circuitos impresos, deben cumplir ciertos requisitos mecánicos, eléctricos y estéticos. Eléctricamente, su ancho determina la capacidad de corriente en amperios que pueden manejar, Tabla. 21, para circuitos de baja potencia, una línea de $0,5\text{ mm}$ es suficiente en la mayoría de los casos. Si hay espacio disponible, se puede utilizar 1 mm como espesor para todas las líneas.

Tabla. 21 Capacidad de corriente de las pistas de un circuito impreso

Máxima corriente permitida	
Ancho pista mm	Amperios
0.12	0.5
0.25	0.5
0.5	1.4
0.75	1.8
1.25	2.2
1.75	3.5
2.5	4
5	6

Fuente: (CEKIT, 2000)

3.1.9.3. Programa de Diseño Asistido por Computadora, Proteus

Proteus es el Programa elegido para realizar las funciones de programa de diseño asistido por computadora. El programa Proteus está conformado por dos aplicaciones llamadas Ares e Isis.

Isis está diseñado para realizar esquemas de circuitos con casi todos los componentes electrónicos que se encuentran actualmente disponibles en el mercado de los circuitos integrados y los componentes pasivos y activos utilizados en las aplicaciones electrónicas, además posee una aplicación de simulación que permite comprobar la efectividad de un circuito.

Ares es una aplicación que se usa para situar los componentes utilizados en el esquema realizado en Isis sobre una tarjeta virtual. Los componentes pueden encontrarse en la librería de la aplicación con los nominales de la clase de

encapsulado en el caso de los integrados y con respecto a la denominación técnica referente a la forma física de los componentes. (Salinas Rojas, 2008)

3.1.9.4. Resultado del diseño del Circuito Impreso

Como resultado se obtienen los diagramas que se observa en el Anexo 5. Circuito Impreso del Detector de Radiación, el mismo que cumple con todas las recomendaciones y normas expuestas anteriormente. Adicionalmente, se presenta la tabla del Anexo 7, que es la lista total de elementos del Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma.

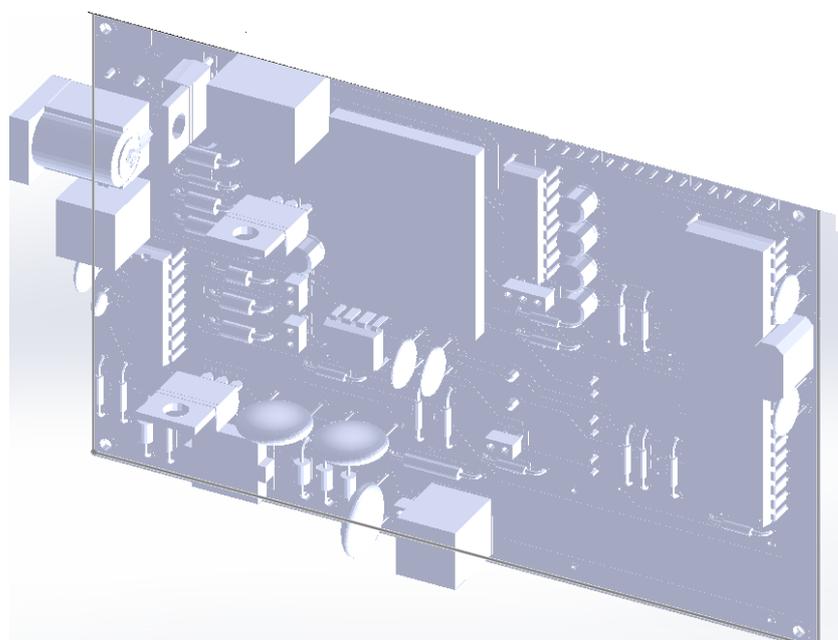


Figura. 74. Modelamiento tridimensional de la tarjeta electrónica

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

La conjugación de las etapas de diseño mecánico y circuito impreso, se realiza por medio de una simulación tridimensional para determinar antes del ensamble, la apariencia física del Detector de Radiación. En la Figura. 74, mírese el circuito impreso implementado en simulación, comprobando los elementos no son obstruidos entre sí, y que la dimensión de la PCB es suficiente para los elementos constitutivos de la aplicación.

En la Figura. 75 se puede observar una simulación tridimensional del Detector de Radiación cumpliendo la disposición de los elementos constitutivos.

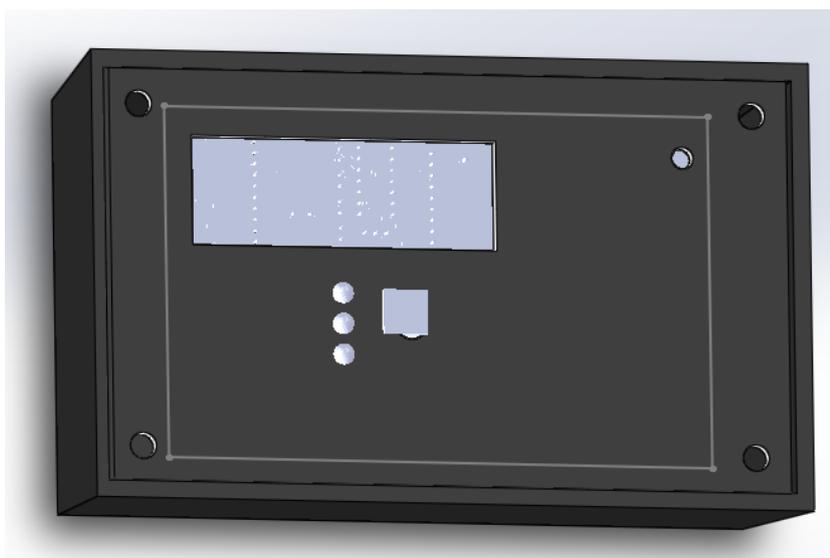


Figura. 75. Simulación del Detector de Radiación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

La señalética dispuesta en la cara frontal del Detector de Radiación, tienen por objetivo reconocer las accionamientos e indicaciones que el detector de radiación dispone, esta señalética se muestra en la Figura. 76, nótese la existencia de dos

controles: **Power**, que permite activar la alimentación, y **Reset** que encera la medición de radiación; mientras que los indicadores: **Nuclear pulse**, se encenderá cuando se detecte un pulso nuclear; el indicador **Communication**, estará activo cuando se tenga comunicación con el computador; y el indicador **Operation** titila mientras el funcionamiento del dispositivo sea el correcto.

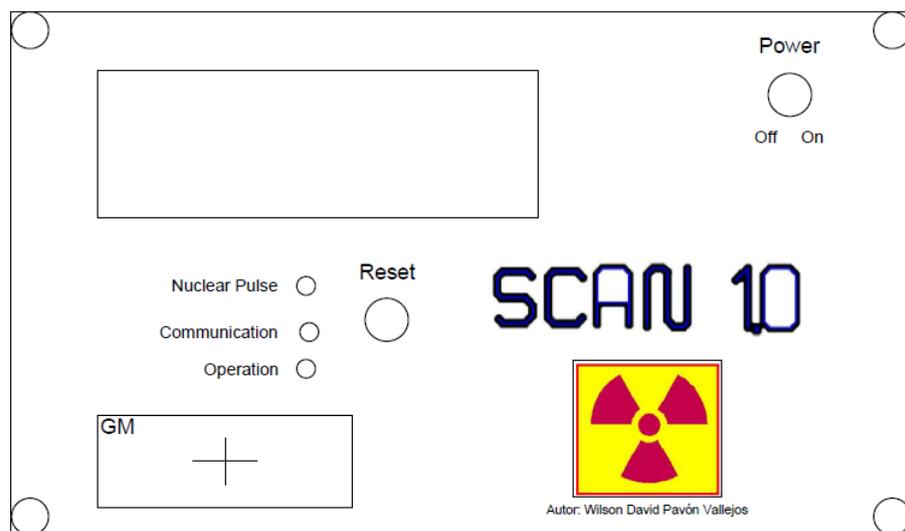


Figura. 76. Señalética dispuesta en el Detector de Radiación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.2. BLOQUE ADQUISICIÓN Y ALMACENAMIENTO

El desarrollo lógico del bloque de Adquisición y Almacenamiento se realiza en base a lo expuesto en el apartado 1.2 Alcance del Proyecto, y para precisar detalles se muestra la Figura. 77, en donde se muestran las partes constitutivas del presente bloque y se puede visualizar la presencia de un computador que tiene la capacidad de monitorear los niveles de radiación a través de una interface humano máquina (HMI), que a la vez de visualizar los datos en tiempo real se los almacena en una base de datos.

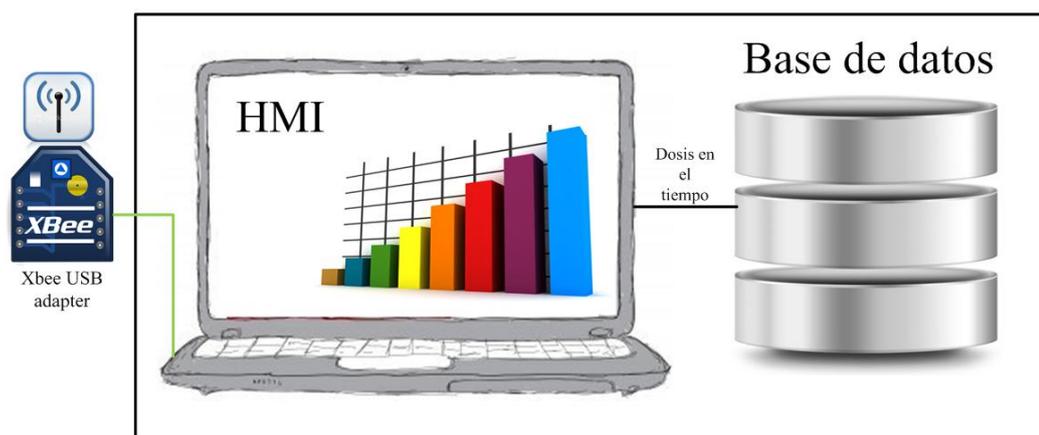


Figura. 77 Bloque de Adquisición y Almacenamiento

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.2.1. Diagramas de flujo

El Anexo 3, corresponde al Diagrama de flujo de Adquisición y Almacenamiento. El diagrama inicia con la definición de los parámetros de

comunicación; y las variables de dosis, cuentas por segundo (CPS) y el factor de conversión entre las dos unidades. Después, verifica que los valores de radiación detectados estén por debajo del nivel de alarma, mírese la Figura. 78.

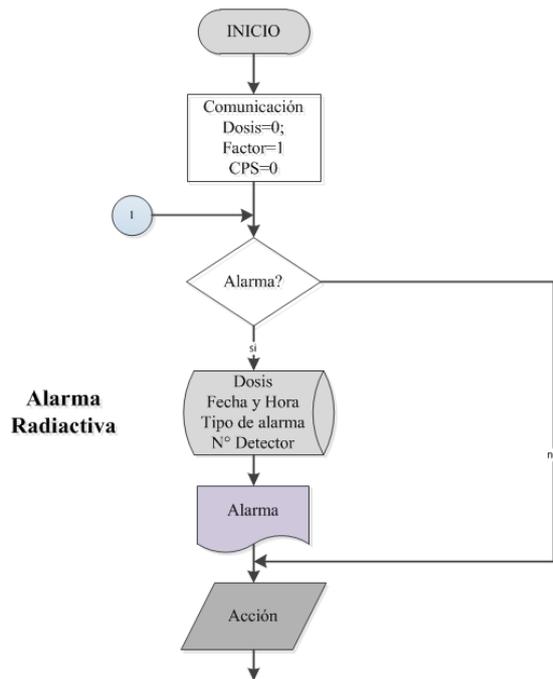


Figura. 78 Definición y Alarma Radiactiva en el Bloque de Adquisición y Almacenamiento

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

A continuación en el diagrama de bloques analizado, se podrá observar que existe dependencia, en el sentido que el usuario decide que desea realizar en la aplicación, y pueden ser:

- La comunicación, que permite identificar al dispositivo conectado, por medio del número de detector y número de nodo.

- En la acción de detección en Tiempo real, se recibe las cuentas de los pulsos nucleares en CPS, desde el detector cada segundo. Con esto, realiza el análisis estadístico de la radiación y muestra los datos calculados.
- La Pausa, servirá para inhabilitar cualquier acción previa.
- La Descarga tiene por objetivo recibir todos los datos almacenados en la memoria EEPROM del detector; informando al usuario la exposición total almacenada en el dispositivo.
- La acción Alarma permite modificar sus límites, que puede ser Alta o Alta Alta.
- En Reporte, la aplicación toma todos los datos almacenados y reporta la exposición en todo el período con el respectivo análisis estadístico.

3.2.2. Diseño de la Interface Humano Máquina HMI

El HMI se define como el punto en el que seres humanos y computadores se ponen en contacto, transmitiéndose mutuamente tanto información, órdenes y datos como sensaciones, intuiciones y nuevas formas de ver las cosas (Rodríguez, 2013). Sin embargo, por otro lado, la interfaz es también un límite a la comunicación, es así como en muchos casos la interfaz se convierte en una barrera debido a un pobre diseño y una escasa atención a los detalles de la tarea a realizar.

Si la interfaz está bien diseñada, el usuario encontrará la respuesta que espera a su acción; si no es así, puede ser frustrante para el usuario, que habitualmente tiende

a culparse a sí mismo por no saber usar el objeto. Además, un buen programa con una pobre interfaz tendrá una mala imagen, y al contrario, una buena interfaz puede realzar un programa mediocre (Rodríguez, 2013). Las reglas generales para el desarrollo de una interface humano máquina se muestran en la Figura. 79.

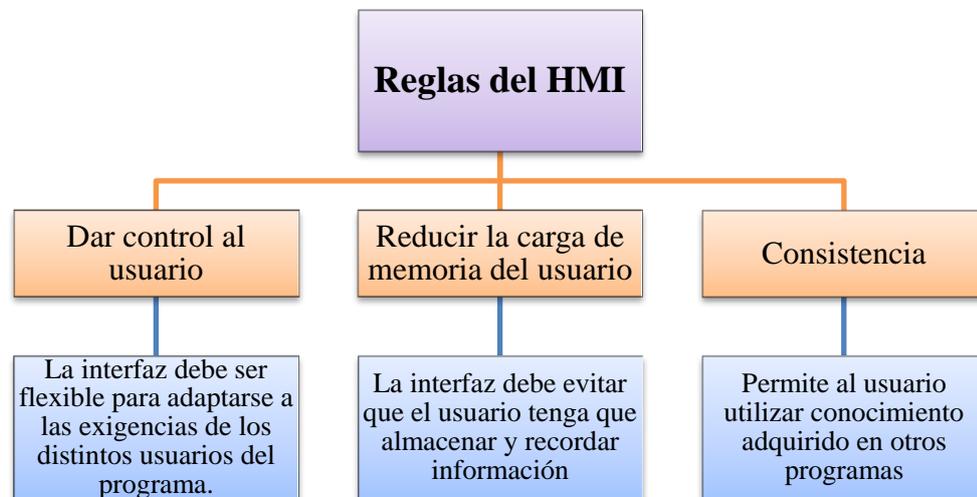


Figura. 79 Reglas en el HMI

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

La interface del Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma, por las características de la aplicación se encarga del Monitoreo, bajo esta premisa la interface tiene la habilidad de obtener y mostrar datos del Sistema en tiempo real. Estos datos se pueden mostrar como números, texto o gráficos que permitan una lectura más fácil de interpretar. Tómese en cuenta las consideraciones de diseño tomadas en cuenta en el HMI indicada en la Figura. 80.

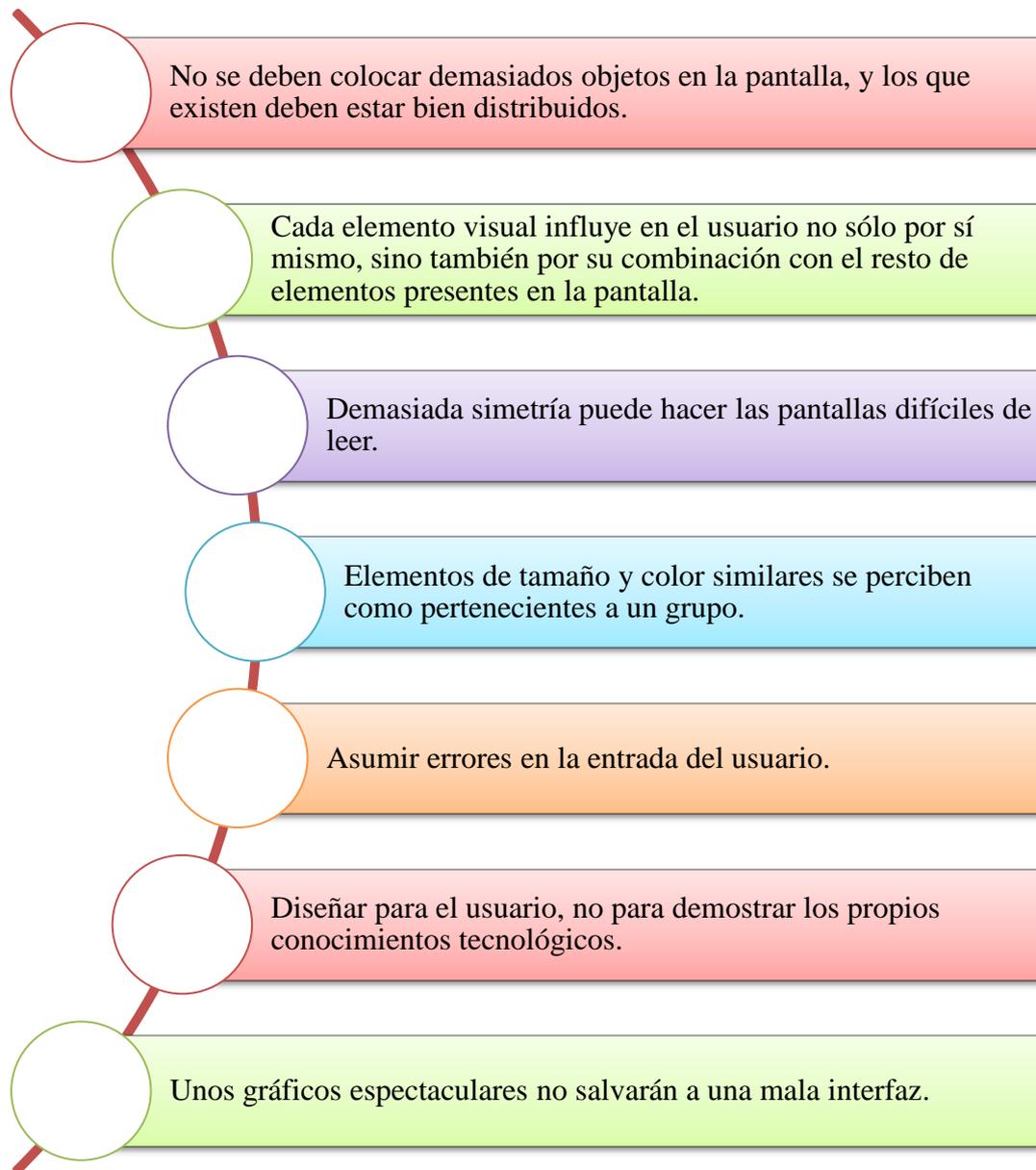


Figura. 80 Consideraciones tomadas en cuenta en el HMI del Sistema

Fuente: (Rodríguez, 2013)

La pantalla principal de la interface del Sistema tiene la distribución de la Figura. 81, tomándose en cuenta todas las características y recomendaciones antes

expuestas. Mírese en la Figura. 82 en donde se presenta la interface resultado de la aplicación.



Figura. 81 Distribución de la pantalla del sistema SCAN 1.0

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

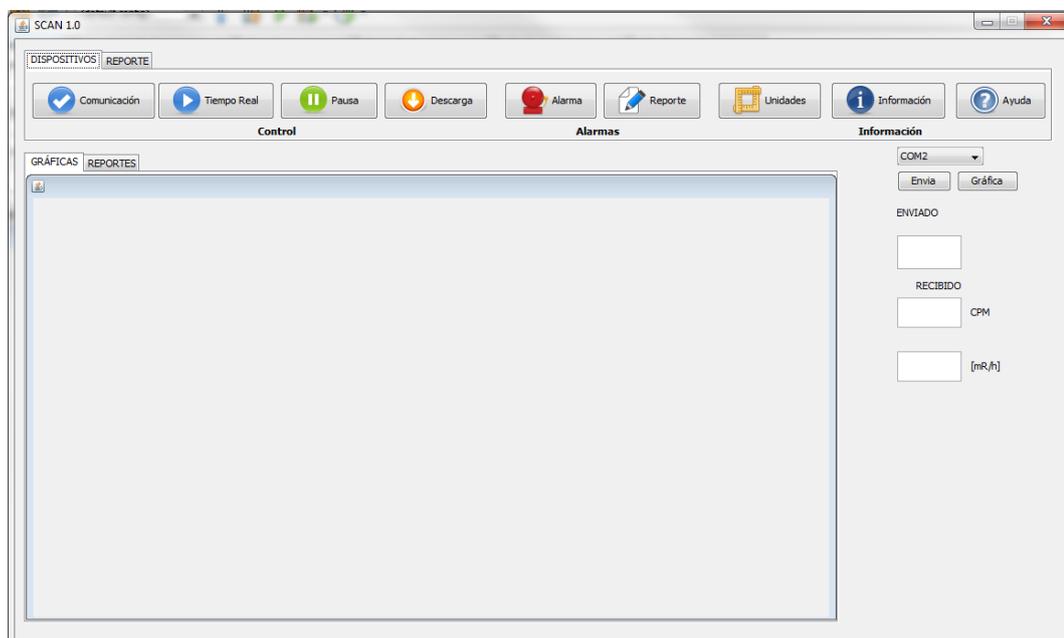


Figura. 82 Resultado del diseño del HMI del Sistema

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.2.2.1. Plataforma de programación JAVA

La elección la plataforma Java para la elaboración del bloque de Adquisición y Almacenamiento, se base en que este código es interpretado por la máquina virtual de Java del entorno de ejecución (JRE) y así se consigue la portabilidad en distintas plataformas. Otras características interesantes de este lenguaje de programación es que el sistema es: orientado a objetos, multi-hilo, robusto y ofrece toda la funcionalidad de un lenguaje potente.

Existen distintos entornos de desarrollo de aplicaciones Java. Este tipo de productos ofrecen al programador un entorno de trabajo integrado para facilitar el proceso completo de desarrollo de aplicaciones, desde el diseño, la programación, la documentación y la verificación de los programas. Para la aplicación se eligió el entorno NetBeans, mostrado en la Figura. 83.



Figura. 83 Entorno de desarrollo de aplicación Java

Fuente: NetBeans IDE 7.3.1

3.2.3. Base de Datos

En el libro Fundamentos de Sistemas de Bases de Datos (Elmasri & Navathe, 2007), se define la base de datos como: “Una base de datos es una colección de datos relacionados. Con la palabra datos nos referimos a los hechos (datos) conocidos que se pueden grabar y que tienen un significado implícito”. Una base de datos se diseña, construye y rellena con datos para un propósito específico, es un conjunto de datos relacionados entre sí los cuales son almacenados y clasificados de forma estructurada en una tabla para su posterior uso.

Para responder a las necesidades de Base de Datos del Sistema de Detección, es necesario analizar el diagrama del Anexo 3, en donde se muestra las actividades ordenadas que debe cumplir todo el Sistema, incluyendo las invocaciones de lectura y escritura de la base de datos. La base de datos se implementó en base al modelo entidad-relación, para ello se ha reconocido tres tipos de entidades: Detector, Alarmas y Dosis; las mismas con sus respectivos atributos. El modelo entidad-relación de la base de datos mostrado en la Figura. 84, que se utilizó como base para genera el código para crear la base de datos.

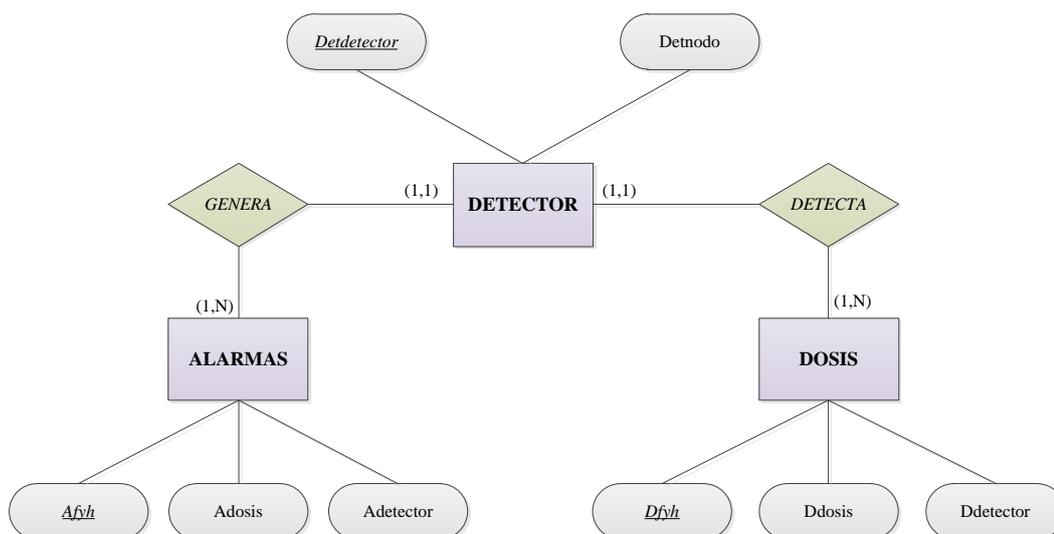


Figura. 84 Modelo entidad-relación de la Base de Datos

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3.2.3.1. Gestor de Base de Datos MySQL

El diagrama de la Figura. 84, será implementado en un Sistema Gestor de Base de Datos (SGBD), el mismo que es elegido por las características y beneficios que preste al sistema. MySQL es el SGBD elegido, por ser muy conocido y ampliamente usado por su simplicidad y notable rendimiento, es una opción atractiva tanto para aplicaciones comerciales precisamente por su facilidad de uso y tiempo reducido de puesta en marcha. Esto y su libre distribución en Internet bajo licencia GNU le otorgan como beneficios adicionales contar con un alto grado de estabilidad y un rápido desarrollo (Casillas & Gibert, 2010).

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

En el presente Capítulo se presenta la implementación del Sistema de Detección de Monitoreo y Radiación Gamma, y los resultados de las pruebas de funcionamiento del mismo, con el interés de validar el sistema y comprobar que los objetivos planteados se han alcanzado. Los equipos utilizados en la realización de las pruebas del Sistema se muestran en el Anexo 7.

4.1. PRUEBAS DEL DETECTOR DE RADIACIÓN

4.1.1. Implementación del Detector de Radiación

El Detector de Radiación finalizado se muestra en la Figura. 85 que indica la parte frontal y la señalética establecida. Mientras que el circuito impreso terminado

se muestra en la Figura. 86 y en la Figura. 87, que expone el anverso y reverso, respectivamente de la tarjeta electrónica.



Figura. 85. Cara frontal del Detector de Radiación

Fuente: Fotografía tomada por (Autor de la Investigación)

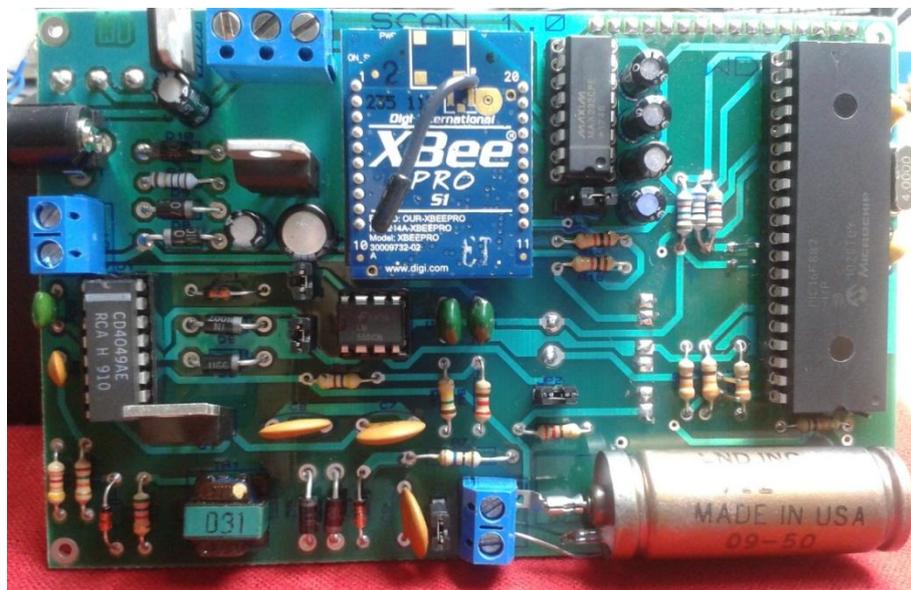


Figura. 86. Elementos internos del Detector de Radiación I

Fuente: Fotografía tomada por (Autor de la Investigación)

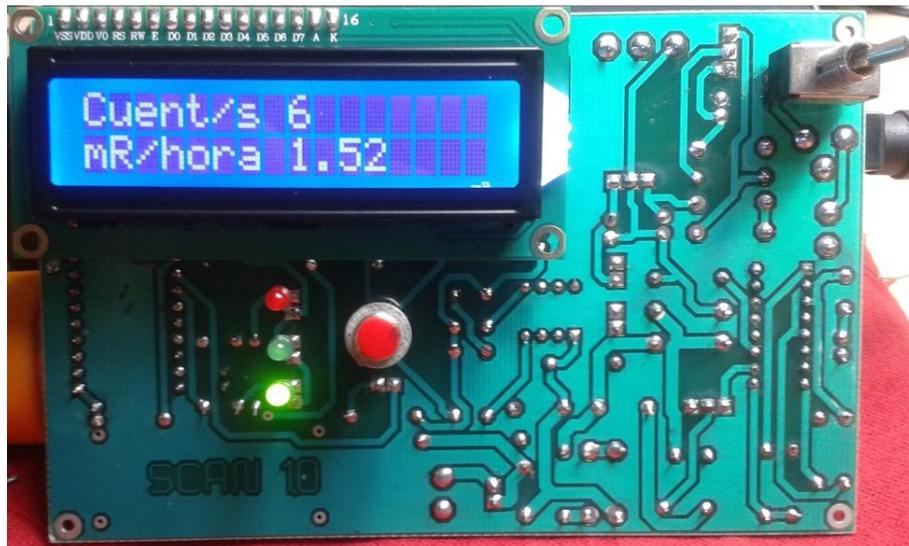


Figura. 87. Elementos internos del Detector de Radiación II

Fuente: Fotografía tomada por (Autor de la Investigación)

4.1.2. Fuente de Alto Voltaje

Para la medición de la salida de este bloque se utilizó una punta para alto voltaje, la que permite atenuar en 1000 la señal medida, el voltaje medido está en la Figura. 88 que muestra que la fuente está otorgando al tubo GM un voltaje de 491.4 [V].



Figura. 88. Medición de la salida de la fuente de Alto Voltaje de Corriente directa con una punta de alto voltaje con atenuación de 1000

Fuente: Fotografía tomada por (Autor de la Investigación)

Y el rizado que existe en esta fuente se mide en la Figura. 89, mírese que el voltaje pico-pico es de 112 [mV], recordando la utilización de la punta para alto voltaje, el rizado es de 11.2 [V], que corresponde al 2.2% del valor total de la fuente de alto voltaje.

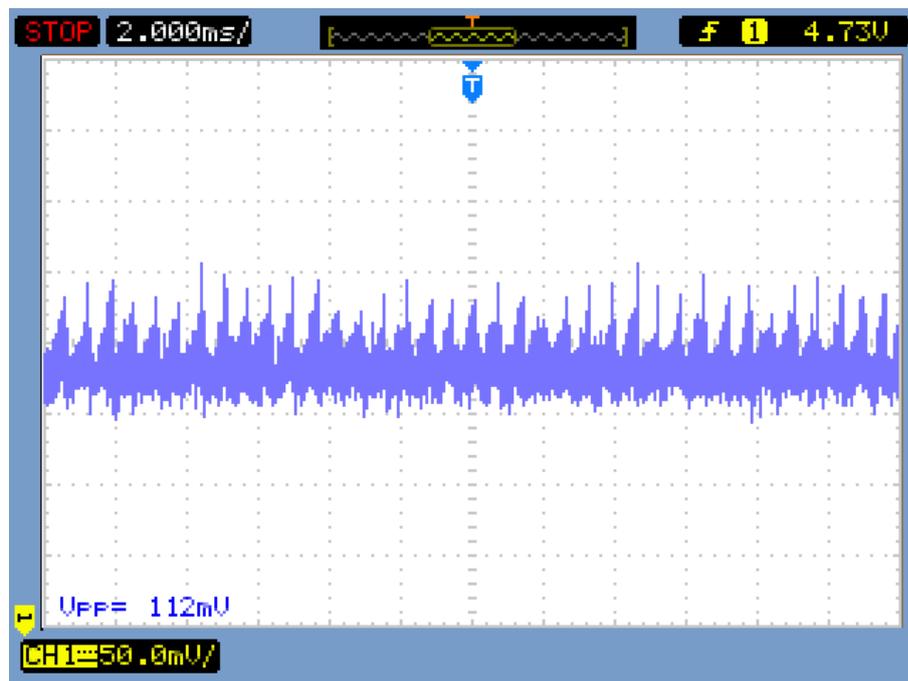


Figura. 89. Rizado de la fuente de Alto Voltaje

Fuente: Medición tomada por (Autor de la Investigación)

4.1.3. Acondicionamiento de Pulsos Nucleares

El circuito de acondicionamiento de pulsos nucleares, tiene por objetivo mejorar la señal proveniente del cátodo del tubo GM, en la presente prueba se muestran los voltajes de salida provenientes de los circuitos: tubo GM, inversor y el

multivibrador monoestable. Todas las gráficas son del Detector de Radiación en presencia de una fuente radiactiva.

La Figura. 90, compara el pulso nuclear a la salida del tubo GM (inferior) y el pulso a la salida del circuito inversor (superior); se puede observar que las amplitudes de onda son de 28 [V] y 5 [V], respectivamente. Obsérvese que la forma de onda del a salida del tubo GM es totalmente alejada de una señal digital, y después del circuito inversor se logra modificarla y ajustarla a una onda cuadrada, pero inversa e irregular.

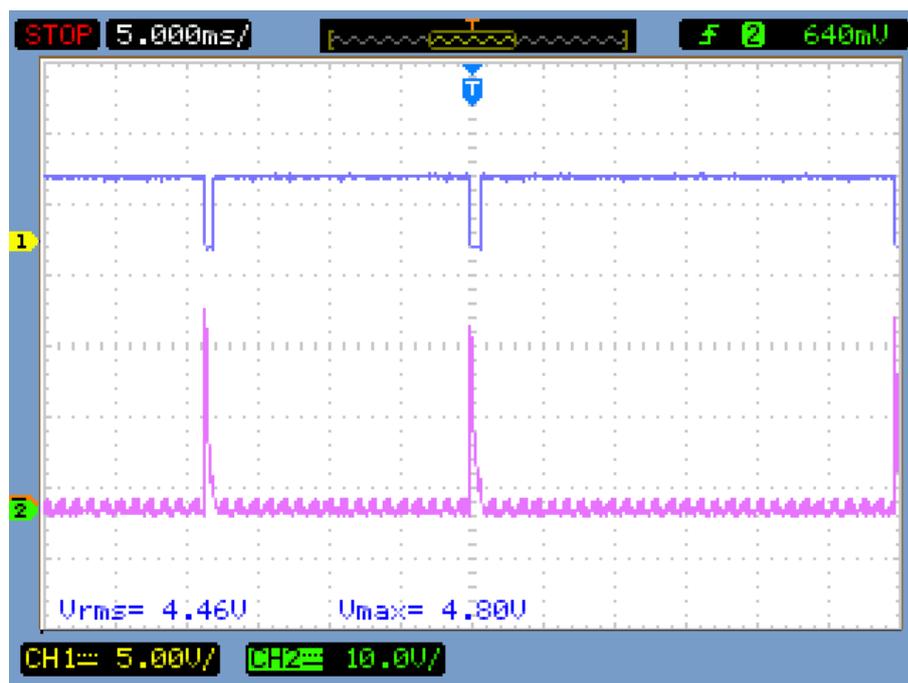


Figura. 90. (Superior) Voltaje de salida del circuito inversor, (Inferior) Voltaje de salida del Tubo GM

Fuente: Medición tomada por (Autor de la Investigación)

La Figura. 91, compara el pulso nuclear a la salida del tubo GM (inferior) y el pulso a la salida del circuito multivibrador monoestable (superior); obsérvese la sincronía de las dos señales, no existe desfase para garantizar la medida. Considérese que la señal superior es la que ingresa al micro controlador con una amplitud de 5 [V] positivos, comprobando la transformación desde el pulso nuclear a un pulso digital para el conteo, garantizado precisión.

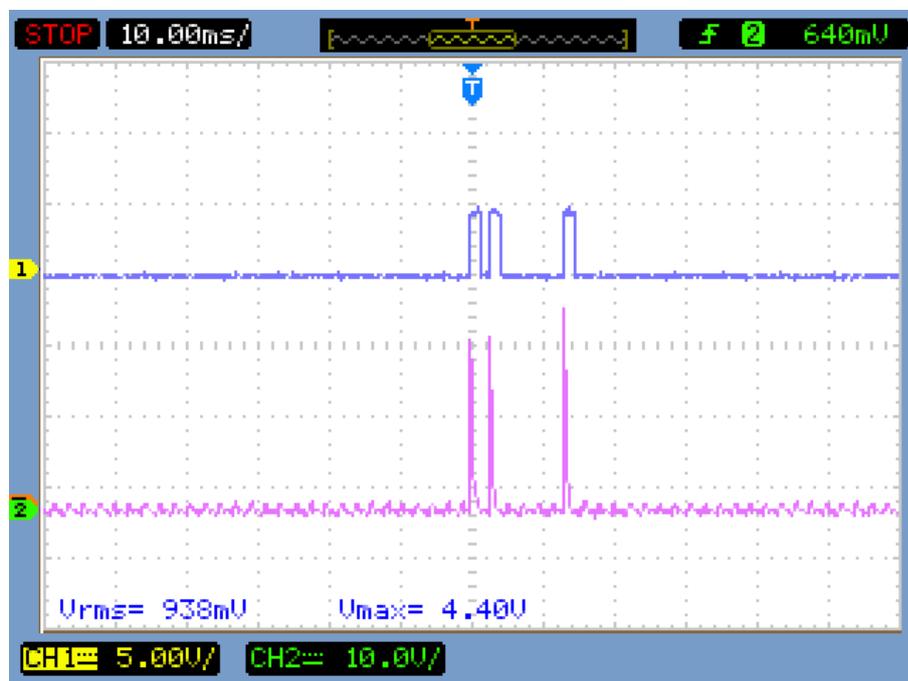


Figura. 91. (Superior) Voltaje de salida del circuito multivibrador monoestable, (Inferior) Voltaje de salida del Tubo GM

Fuente: Medición tomada por (Autor de la Investigación)

La Figura. 92, compara el pulso a la salida del circuito multivibrador monoestable (superior) y el pulso a la salida del circuito inversor (inferior),

obsérvese la modificación de un pulso negativo con ruido a una salida totalmente digital para el conteo y determinación de pulsos.

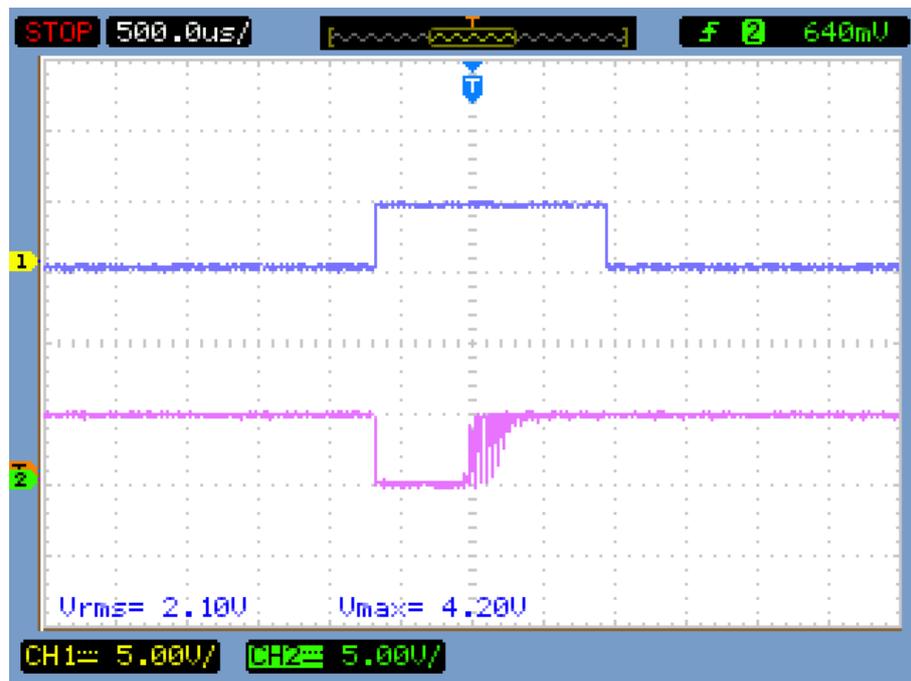


Figura. 92. (Superior) Voltaje de salida del circuito multivibrador monoestable, (Inferior) Voltaje de salida del circuito inversor

Fuente: Medición tomada por (Autor de la Investigación)

La transformación total que aporta el circuito de acondicionamiento de pulsos nucleares se puede observar Figura. 93, en donde se observa un pulso nuclear (Inferior) con una amplitud de 30 [V] irregular y no apto para conteo en un sistema digital TTL. Y se lo transforma en un pulso digital apto y regular para ingresarlo a la entrada de un micro controlador. Obsérvese que las dos señales están en fase y se ha logrado reducir al mínimo el ruido del pulso nuclear.

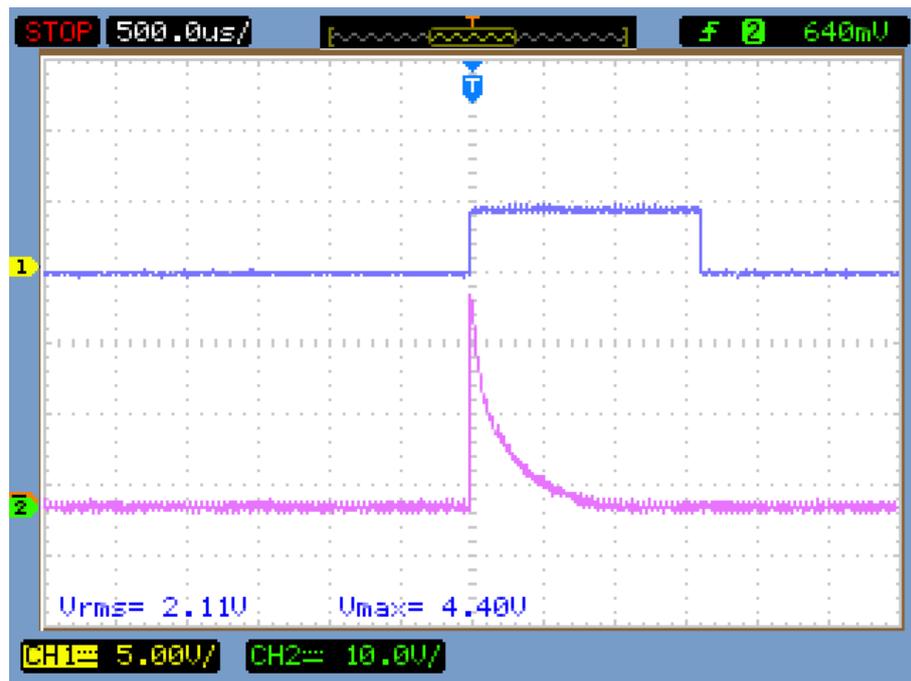


Figura. 93. Comparación de entrada (Inferior) y salida (Superior) del circuito acondicionador de pulsos nucleares

Fuente: Medición tomada por (Autor de la Investigación)

4.1.4. Sistema Micro procesado

La dosis de exposición que mide el Detector de Radiación, como se ha expuesto, depende del tiempo, sus unidades son cuentas por segundo y cuentas por minuto. De ahí la importancia de ser precisos en la medición del tiempo, para ello se diseña el temporizador para que proporcione el intervalo de tiempo para contar los pulsos nucleares.

En las Figura. 94 y Figura. 95 se comprueba la medición del tiempo del temporizador, la que muestra una escala de 100 [mseg] y se puede comprobar que el Detector de Radiación está totalmente coincidente con la escala en el tiempo.



Figura. 94. Simulación de Temporizador para conteo de pulsos

Fuente: Medición tomada por (Autor de la Investigación)

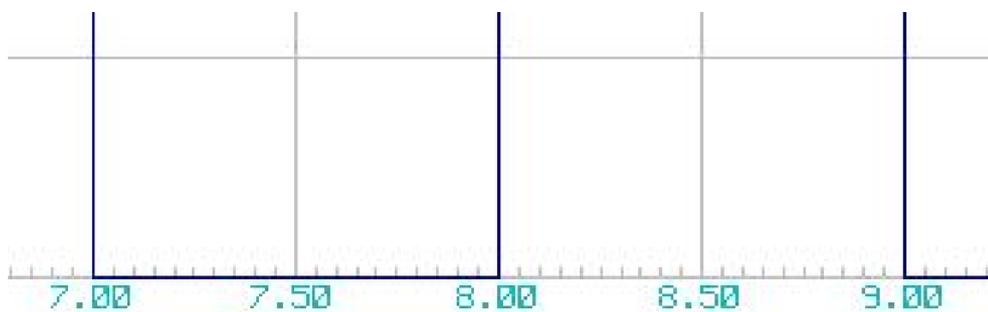


Figura. 95. Detalle de la simulación del temporizador

Fuente: Medición tomada por (Autor de la Investigación)

A continuación, Figura. 96, se presenta la interface de visualización del Detector de radiación, mostrando la medida de exposición en cuentas por segundo y mR/h.

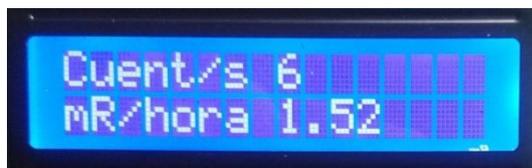


Figura. 96. Interface de visualización de datos por LCD

Fuente: Fotografía tomada por (Autor de la Investigación)

4.1.5. Alimentación Eléctrica

La prueba que se realiza para validar la alimentación eléctrica es la medición de voltaje en la salida de los dos circuitos constitutivos. Como se ha definido el circuito conversor AC-DC es un dispositivo convencional, las pruebas son realizadas con el dispositivo de la Figura. 97, marca Delta Electronics (Delta Electronics, 2013) que tiene un voltaje de 12 [V] y proporciona máximo 1.25 [A].



Figura. 97. Conversor AC-DC convencional utilizado

Fuente: Fotografía tomada por (Autor de la Investigación)

La salida del circuito de conversión AC-DC, es la mostrada en la Figura. 98, la señal tiene un voltaje de 12.4 [V] y un rizado menor a 100 [mV].

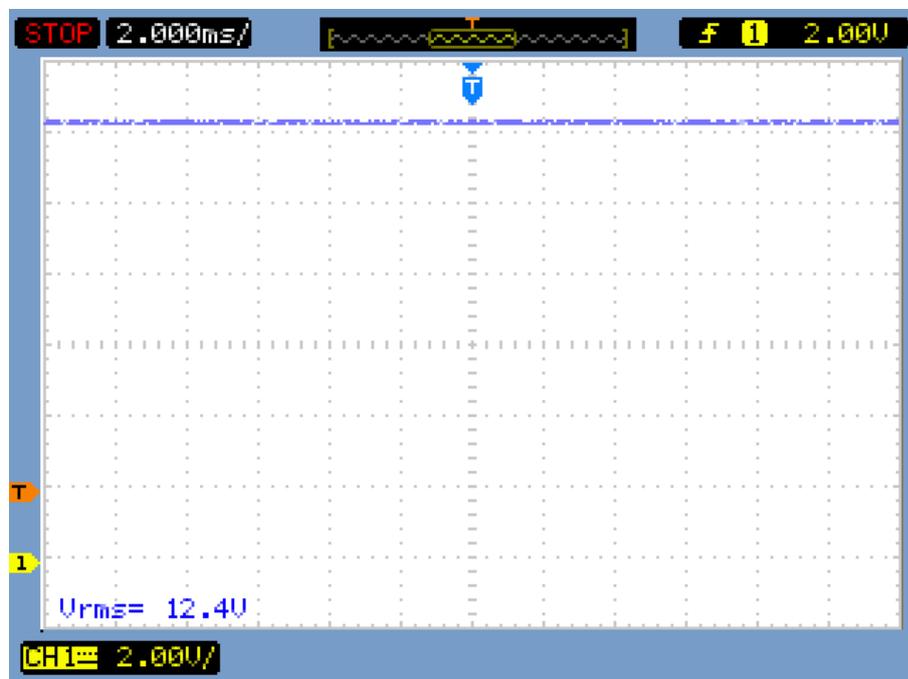


Figura. 98. Medición del voltaje de salida del conversor AC-DC

Fuente: Medición tomada por (Autor de la Investigación)

Mientras que la salida total de la fuente de alimentación, Figura. 99, mide 4.99 [V], lo que se traduce en un error de 0.01 [V], y tiene un rizado menor de 100 [mV] todo esto con la fuente de alimentación con carga, con que se logra el objetivo del circuito de alimentación eléctrica.

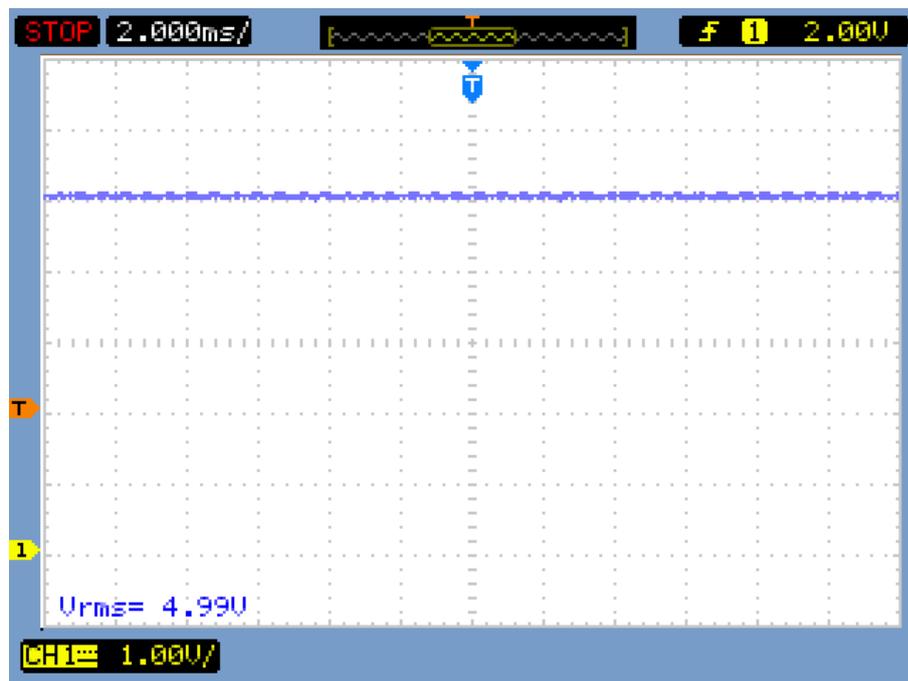


Figura. 99. Medición de voltaje de salida de la regulación

Fuente: Medición tomada por (Autor de la Investigación)

4.1.6. Determinación de la Curva Plateau y tiempo muerto

En la Figura. 100, se muestra el resultado de la prueba de la curva Plateau, como se puede observar, la gráfica relaciona el voltaje aplicado con las cuentas por segundo que detecta el tubo GM expuesto a una fuente de radiación a distancia fija.

Se observa claramente la diferencia entre las regiones de ionización, Geiger Müller y de descarga continua y podemos observar que con el voltaje de 500 [V], se está asegurando que el tubo se encuentre correctamente polarizado y apto para captar radiación.

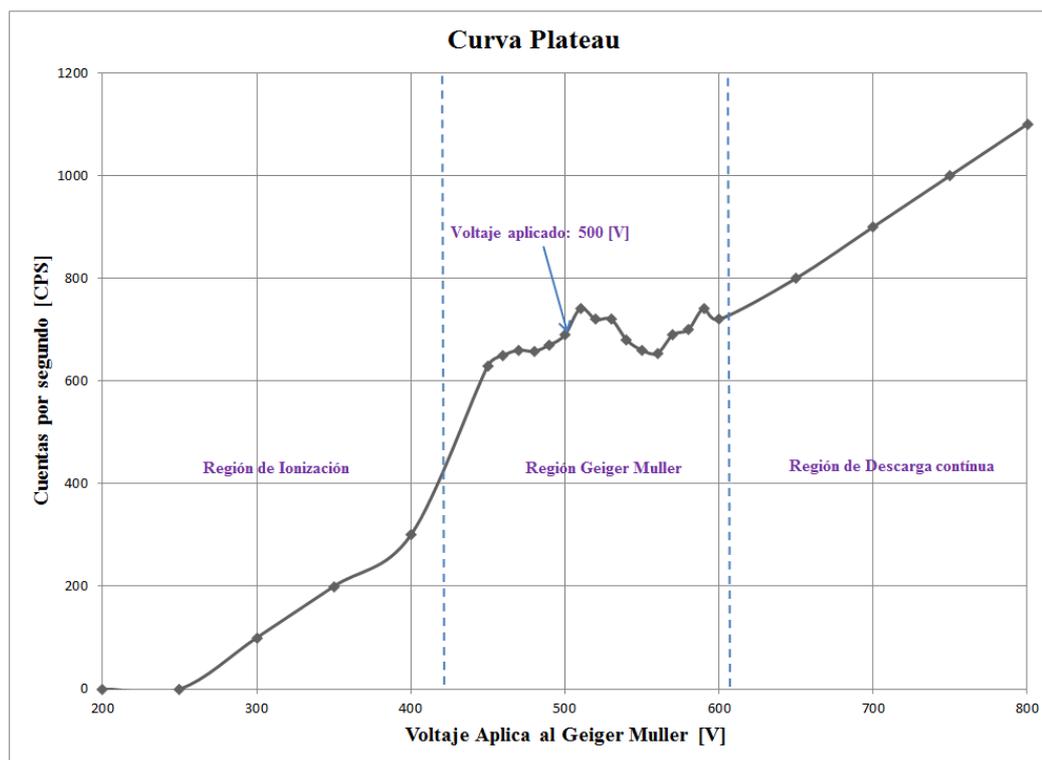


Figura. 100. Prueba de la curva Plateau del Geiger Müller LND 712

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

En la determinación del tiempo muerto, se realiza la medición física del ancho del pulso nuclear a la salida del tubo GM, la Figura. 101 muestra esta gráfica obsérvese la forma característica del pulso nuclear y su decaimiento que indica la recombinación de los electrones, durante este tiempo el tubo Geiger Müller es incapaz de lograr captar otro pulso. El tiempo que dura esta transición es de aproximadamente 800 [useg], que corresponde al tiempo muerto del GM.

Por otro lado, el tiempo muerto del Detector de Radiación se determina por el tiempo que demora en completar la muestra para el análisis estadístico, este tiempo para el Detector de Radiación es de 10 segundos, considerándose la toma de diez datos consecutivos para el análisis mencionado.

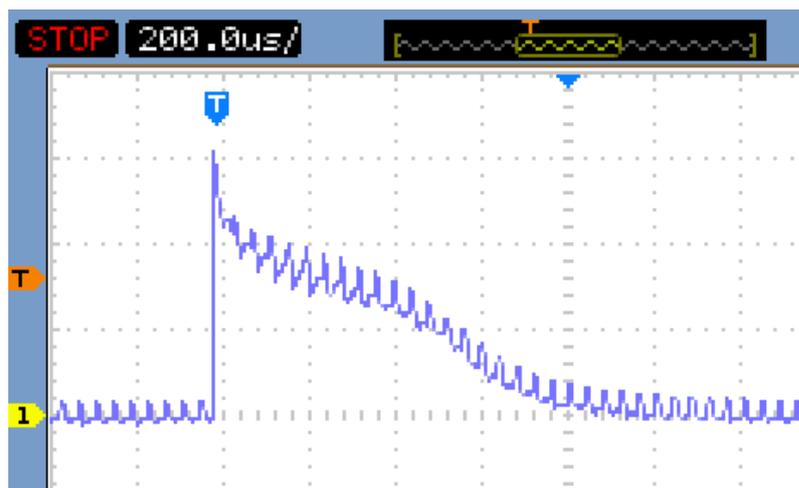


Figura. 101. Medición del ancho del pulso nuclear y el tiempo muerto

Fuente: Medición tomada por (Autor de la Investigación)

4.1.7. Pruebas de Medición del Detector de Radiación

A continuación se realizan las pruebas para validar el funcionamiento del Detector de Radiación. Para ello, se utilizan fuentes de radiación de referencia, pertenecientes al Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. Las actividades radiactivas de estas fuentes al 15 de Diciembre del 2013 se muestran en la Tabla. 22; la primera, Figura. 102, es una fuente de baja actividad destinada a la calibración de bajas escalas de los detectores de radiación convencionales; al

contrario, la segunda tiene gran actividad y esta confinada a un bunker, utilizada para calibración de detectores en todas las escalas, Figura. 103.

Tabla. 22 Decaimiento de la fuente de Cs-137

Fabricante modelo	Isótopo	Actividad inicial (mCi)	Fecha inicial	Diferencia Días	Actividad final (mCi)	Exposición Máxima (mR/h)
AMERSHAM Cs - 137 CDR 562	Cs-137	0,249	Nov 2006	2578	0,2119	6,84
BUCHLER - OB6 /943-29	Cs-137	20000	Feb 1994	34382	12683,01	67388,7

Fuente: Fuente (SCAN, 2005)



Figura. 102. Fuente de radiación AMERSHAM Cs -137 CDR 562

Fuente: Fotografía tomada por (Autor de la Investigación)



Figura. 103. BUCHLER - OB6 /943-29

Fuente: Fotografía tomada por (Autor de la Investigación)

La primera prueba, tiene el objetivo de verificar la medición de radiación a baja exposición, por medio de la fuente AMERSHAM. Los resultados obtenidos de esta prueba se presentan en la Tabla. 23, se ha tomado como referencia seis distancias y para cada una de ellas se han tomado 27 mediciones y colocando en la columna valor real el promedio de las mediciones obtenidas. Esta prueba arroja un error promedio de -1,42%, el mismo que está dentro de la recomendación del OIEA que permite un error máximo de $\pm 10\%$ (International Atomic Energy Agency, 2000).

**Tabla. 23 Resultado de las mediciones con la fuente AMERSHAM Cs -
137 CDR 562**

DISTANCIA [m]	VALOR EXPERIMENTAL [mR/h]	VALOR REAL [mR/h]	ERROR	ERROR [%]
1,00	0,07556	0,06846	-0,10	-10,36%
0,75	0,13400	0,12171	-0,10	-10,10%
0,50	0,30167	0,27384	-0,10	-10,16%
0,25	1,10067	1,09538	0,00	-0,48%
0,20	1,67100	1,71153	0,02	2,37%
0,10	5,46200	6,84610	0,20	20,22%
		Promedio	-0,01	-1,42%

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

En la Figura. 104, se muestra una imagen de la primera prueba del Detector de Radiación con la fuente AMERSHAM. La distancia es tomada desde el centro del tubo Geiger Müller al centro de la fuente radiactiva.



Figura. 104. Primera prueba de validación del Detector de Radiación

Fuente: Fotografía tomada por (Autor de la Investigación)

Graficando todos los puntos obtenidos de la primera prueba se obtiene la Figura. 105.

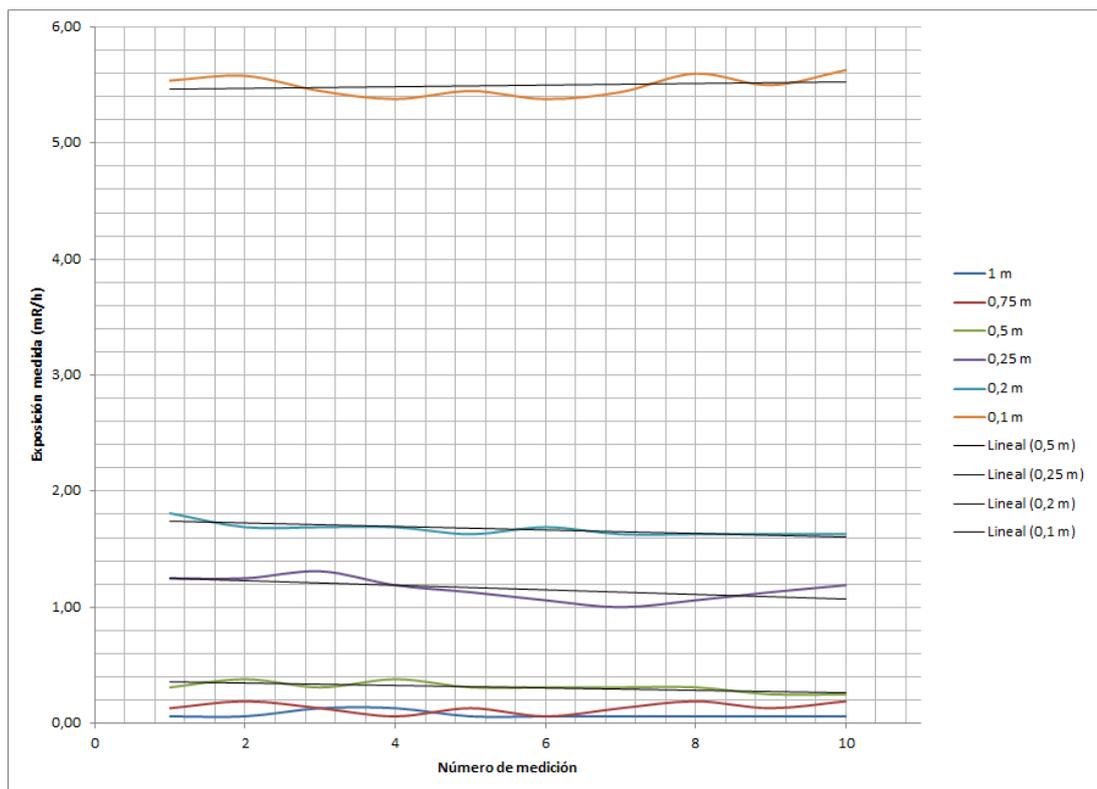


Figura. 105. Datos obtenidos de la Primera prueba de validación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

De la anterior figura, se puede observar la variación de la medición, debido a la naturaleza estadística de la radiación; mírese el aumento progresivo de la exposición mientras se acerca la fuente al dispositivo de medición. En la Figura. 106, se grafican la distancia en comparación del promedios de la medición, de aquí puede observarse que el comportamiento de la radiación se ajusta a una curva exponencial, y también obsérvese la precisión de la medida con el valor real obtenido.

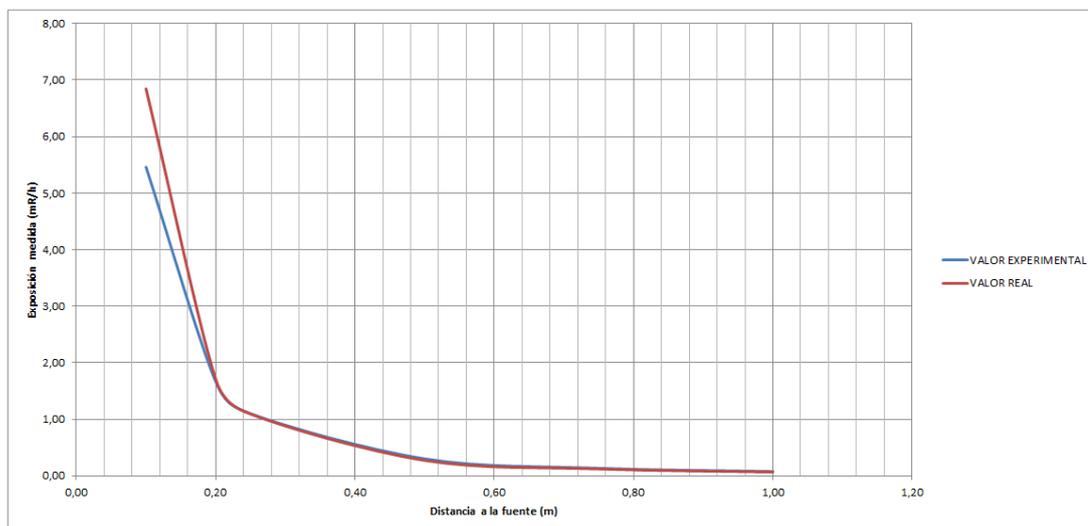


Figura. 106. Comparación entre valor real y valor experimental

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

La segunda prueba, consisten en determinar experimentalmente el **rango de medición del Detector** de Radiación, se compara entre el pulso nuclear y la salida después del circuito de acondicionamiento, de dicha prueba se obtiene la Figura. 107. El pulso nuclear a la salida del GM, dura aproximadamente 800 [*useg*], y la salida del acondicionamiento de pulsos nucleares tiene un ancho de pulso de 1.62 [*mseg*]. A partir de estos datos y sabiendo que la señal que entra al

microcontrolador es la de salida del acondicionamiento de pulsos nucleares. Se realiza el cálculo en la Ecuación. 51, determinándose que se puede medir hasta 617 pulsos sin que se superpongan y se pierda la información.

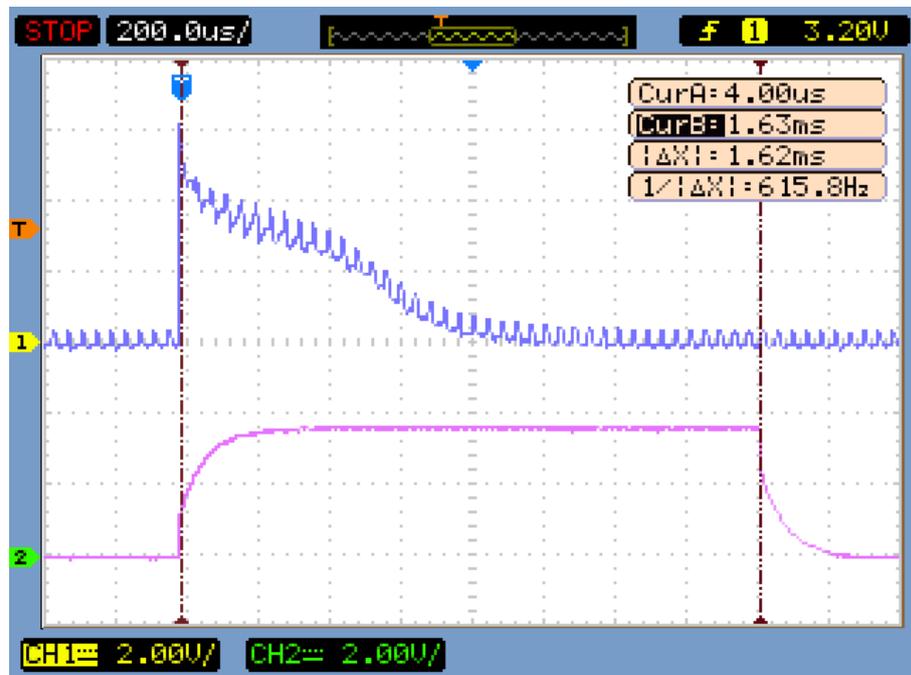


Figura. 107. Medición de (Superior) Voltaje de salida del circuito multivibrador monoestable, (Inferior) Voltaje de salida del Tubo GM

Fuente: Medición por (Autor de la Investigación)

$$\text{Número máximo de pulsos por segundo} = \frac{1 \text{ seg}}{1.62 \frac{\text{mseg}}{\text{pulso}}}$$

$$\text{Número máximo de pulsos por segundo} = 617.28 \frac{\text{pulsos}}{\text{seg}}$$

Ecuación. 51. Cálculo del número máximo de pulsos por segundo

Con la determinación del número máximo de pulsos por segundo y su relación con unidades internacionales de exposición a la radiación dado por el fabricante, descrito en la sección 3.1.1., y con el factor de corrección determinado anteriormente se determina el Rango Teórico de medida del detector, Ecuación. 52.

$$\text{Límite inferior} = 0.0625 \frac{mR}{h}$$

$$\text{Límite superior} = 617 \frac{\text{pulsos}}{\text{seg}} * f. \text{ conversión} * f. \text{ corrección}$$

$$\text{Límite superior} = 617 * 0.0625 = 38.56 \text{ mR/h}$$

Ecuación. 52. Rango Teórico de medida del Detector de Radiación

Pero para determinar el rango del Detector de Radiación experimentalmente se ha tomado varias mediciones, las que se muestran en la Figura. 108, en donde se gráfica el número de cuentas con el valor de exposición obtenido; mírese que la diferencia entre el valor real y el valor experimental es mínima entre 0 y 10 [mR/h], al contrario que va aumentando paulatinamente cuando estamos por encima de los 10 [mR/h]. De ahí que el rango Real del Detector de Radiación se lo expone en la Ecuación. 53.

$$\text{Límite inferior} = 0.0625 \frac{mR}{h}$$

$$\text{Límite superior} = 10 \frac{mR}{h}$$

Ecuación. 53. Rango de medida del Detector de Radiación

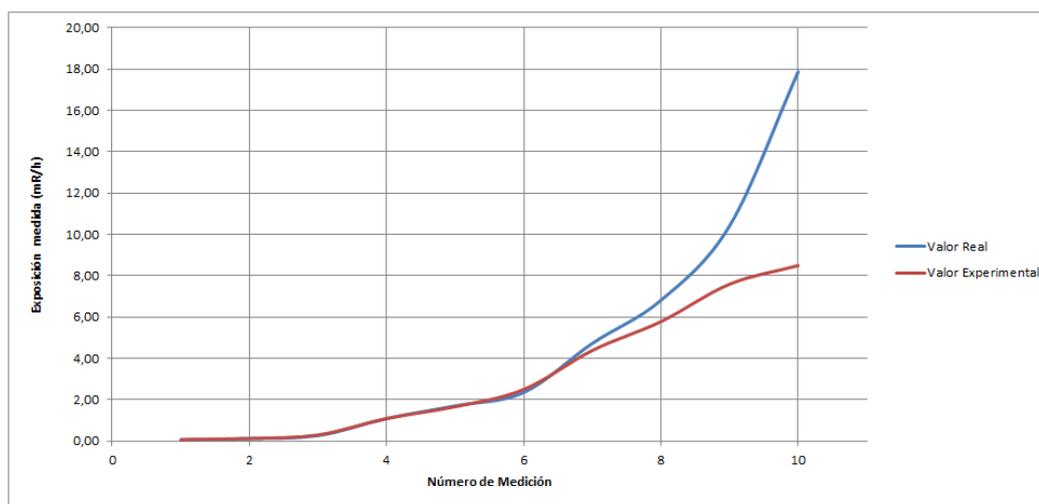


Figura. 108. Determinación del rango de medida del Detector

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

Aunque en el manual de procedimiento denominado, “calibración de equipos de medición de radiación ionizante” de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares en la sección 5.2 Realización, literal b dice: “Ingresar a la sala y colocar el equipo en el pedestal frente a la fuente de Cesio-137, tal que el plano de referencia sea perpendicular al eje del haz de radiación”; es importante comprobar si existe diferencia entre una medición perpendicular o paralela, así en la Figura. 109 se compara dos mediciones con la fuente de radiación dispuesta en las posiciones mencionadas, nótese la igualdad en la medición directa de la medición.

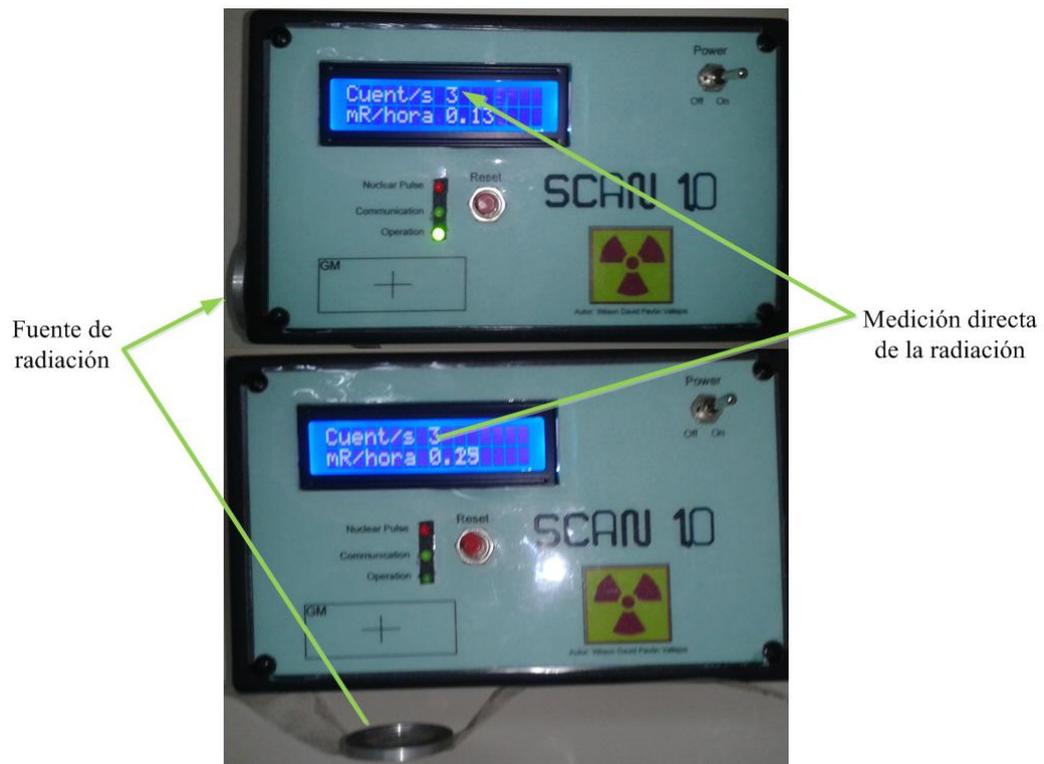


Figura. 109 medición paralela (sup.) y medición perpendicular (inf.) con el haz de radiación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

La tercera y última prueba de validación del Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma, consiste en comprobar la exactitud y la linealidad en todo el rango de medición; para ello se ha tomado los datos expuestos en la Figura. 110, los valores corresponden al 25, 50 y 75% del rango medida, de cada uno de ellos se ha tomado 27 valores y se ha calculado el promedio.

De la siguiente tabla se realiza la Figura. 111, la Figura. 112 y la Figura. 113 las mismas que comparan las diferentes mediciones experimentales obtenidas con los límites inferiores y superiores permitidos, en las tres figuras obsérvese que ninguna medición sale del mencionado rango.

ESCALA:		(0 - 10) mR/h			FUENTE:			OB6		
V.REFERENCIA	Lecturas (25%)			Lecturas (50%)			Lecturas (75%)			
	2,360			4,736			6,820			
N- LECT.	DIST (m)	ATEN (mm).	UNIDAD	DIST (m)	ATEN (mm).	UNIDAD	DIST (m)	ATEN (mm).	UNIDAD	
		4,25	40.0	mR/h	3	40.0	mR/h	2,5	40.0	mR/h
1	2,50	2,30	2,70	4,30	4,50	4,20	5,70	5,70	5,90	
2	2,40	2,40	2,50	4,40	4,40	4,20	5,80	5,90	5,80	
3	2,50	2,50	2,50	4,40	4,30	4,30	5,90	5,80	5,80	
4	2,40	2,50	2,40	4,40	4,40	4,20	5,80	5,70	5,90	
5	2,50	2,50	2,50	4,60	4,50	4,40	5,80	5,90	5,80	
6	2,60	2,40	2,50	4,50	4,40	4,20	6,00	5,90	5,80	
7	2,50	2,80	2,40	4,60	4,40	4,40	5,70	5,90	6,40	
8	2,40	2,70	2,40	4,70	4,30	4,30	5,60	5,90	6,30	
9	2,40	2,80	2,60	4,60	4,40	4,30	5,50	5,80	5,10	
PROMEDIO	2,50370			4,39259			5,81852			

Figura. 110 Datos obtenidos originales de la tercera prueba de validación, calibración

Fuente: (SCAN, 2002)

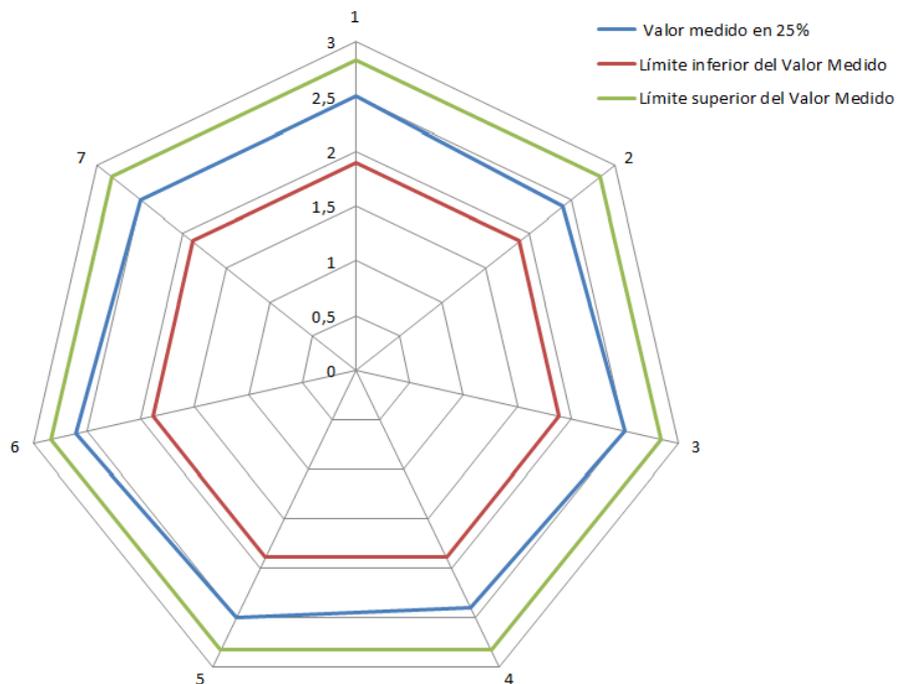


Figura. 111. Comparación de los valores experimentales y límites permitidos en el 25% del rango del Detector

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

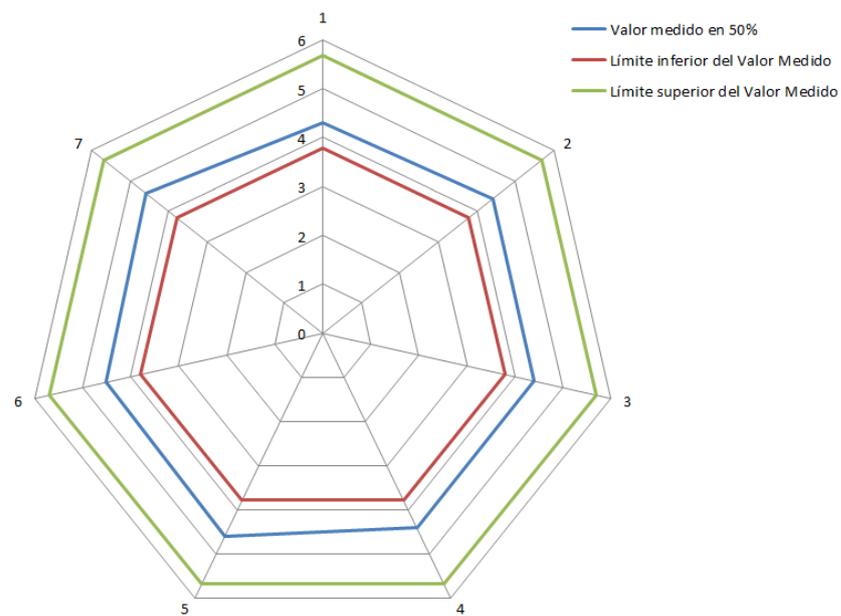


Figura. 112. Comparación de los valores experimentales y límites permitidos en el 50% del rango del Detector

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

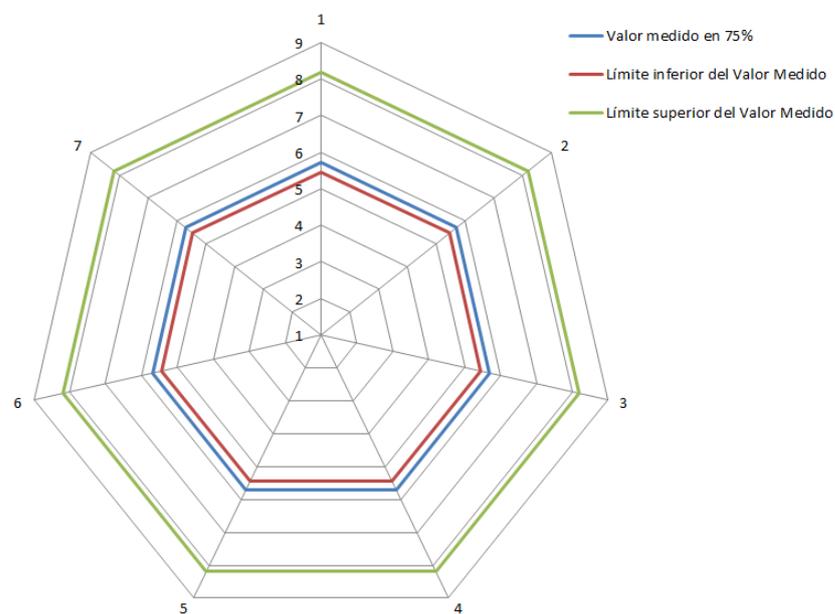


Figura. 113. Comparación de los valores experimentales y límites permitidos en el 75% del rango del Detector

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

La tercera prueba arroja también la linealidad de la medición en el rango de funcionamiento, Figura. 114. De donde se obtiene una linealidad de 0,9982, la que corrobora la linealidad del Sistema.

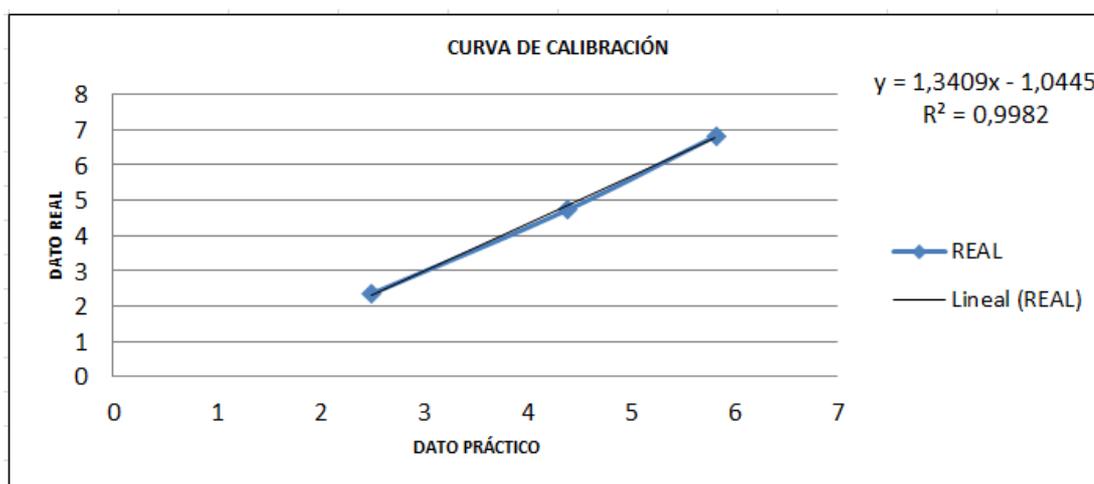


Figura. 114. Determinación de la Linealidad del Sistema

Fuente: (SCAN, 2002)

Se adjunta en el Anexo. 10, el certificado de calibración del Detector de Radiación otorgado por el Laboratorio de Patrones Secundarios de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares, obteniéndose un Factor del Instrumento de 1,08. Con lo que legalmente este dispositivo constituye un elemento para Protección Radiológica. Se expone la Figura. 115, que es la imagen in situ de la tercera prueba realizada.



Figura. 115. Imagen in situ de la tercera prueba de validación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

4.2. MANUAL DE USUARIO

Para utilizar el sistema se requiere de un computador que tenga entre sus componentes, características mínimas detalladas en la Tabla. 24.

Tabla. 24 Características del computador para instalación del sistema

Componente	Característica mínima
CPU	32bit: con sistema operativo XP, con un procesador Intel Pentium 4 o AMD Athlon Dual Core, 1.6 GHz.
Memoria RAM	512 MB RAM
Disco duro	1 GB libre para la instalación
Monitor	1024 x 768 con color verdadero
Dispositivo apuntador	MS-Mouse compatible
Puerto	USB

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

Posteriormente, para iniciar la medición de la radiación se debe seguir los siguientes pasos:

1. Conecte la XStick a un puerto USB del computador y reconozco el puerto serial asignado a la comunicación, o escoja el modo de comunicación, refiérase a la sección 3.1.6 Interface de Comunicación, Figura. 116.



Figura. 116. Módulo XStick

Fuente: XStick (Digi International Inc., 2013)

2. Encienda el Detector de Radiación, después de haber escogido si va a funcionar conectado a una fuente externa o a las baterías integradas, Figura. 117.



Figura. 117. Encienda el Detector de Radiación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

3. Inicie la aplicación en el ícono SCAN 1.0 ubicado en el escritorio del computador, Figura. 118.



Figura. 118. Ícono de la aplicación SCAN 1.0

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

- Después de iniciar la aplicación, escoja el puerto en donde está conectado el Detector de Radiación, Figura. 119.



Figura. 119. Selección del Puerto Serial

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

- Comprueba la comunicación con el Detector de Radiación en el botón "comunicación", si no hay problemas se desplegará el número del detector, Figura. 120.



Figura. 120. Comunicación con el detector

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

- Para iniciar la lectura de la radiación en "Tiempo Real" seleccione la opción correspondiente, Figura. 121.



Figura. 121. Lectura en Tiempo Real

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

- En la barra de notificaciones, se desplegará el nombre de las acciones realizadas y los mensajes de advertencia del programa, Figura. 122.



Figura. 122. Barra de Notificaciones

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

8. Podrá tener la información de la exposición en Cuentas por Minuto [CPM] y en [mR/h], Figura. 123.

Exposición

1	CPM
0,025	[mR/h]

Figura. 123. Lectura de la Exposición a la Radiación

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

9. Si todo está correcto se verá la Figura. 124, la lectura en tiempo real se está desarrollando sin problemas, Figura. 124.

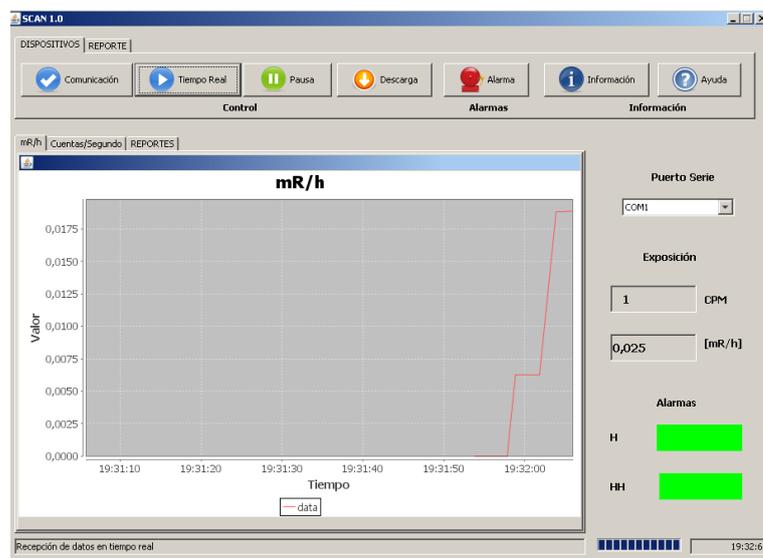


Figura. 124. Interface SCAN 1.0

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

10. En la opción alarma se puede modificar los umbrales de las mismas, que son dos: alarma en alto y alarma en alto alto. Cuando una de las dos se activa el indicador correspondiente, Figura. 126, se pondrá en color rojo indicando que el valor correspondiente se ha sobrepasado, Figura. 125 y Figura. 126.



Figura. 125. Modificación de umbrales de las alarmas

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

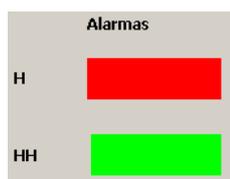


Figura. 126. Indicadores visuales de alarmas

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

11. Para almacenar un valor de interés de la exposición, se selecciona la opción almacenar la que almacena la exposición, fecha/hora y el detector que realiza la medición, Figura. 127.



Figura. 127. Almacenamiento de exposición

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

12. Las gráficas que se pueden observar, son dos: la primera, compara la hora y fecha de detección con la exposición en $[mR/h]$, y la segundo, compara la hora y fecha de detección con la exposición en Cuentas por Segundo $[CPS]$,
Figura. 128.

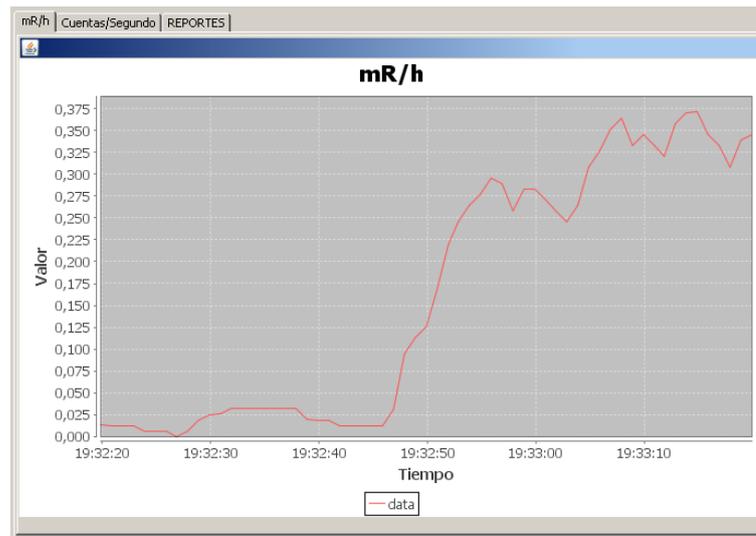


Figura. 128. Gráfica de exposición, tiempo vs. mR/h

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

13. Selecciona la opción Reporte para desplegar todos los datos almacenados en la base de datos, Figura. 130.



Figura. 129. Selección de Reporte

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

ID	Modelo	Serial	Nodo
Fecha y Hora	Dosis	Detector	
Sat Nov 02 15:38:28 COT 2013	10	10	
Sat Nov 02 15:38:29 COT 2013	10	10	
Sat Nov 02 15:56:59 COT 2013	0	10	
Sat Nov 02 15:57:10 COT 2013	0	10	
Tue Dec 03 15:29:51 COT 2013	7	10	
Tue Dec 03 15:29:54 COT 2013	9	10	
Tue Dec 03 15:29:56 COT 2013	13	10	
Tue Dec 03 15:29:58 COT 2013	5	10	
Tue Dec 03 15:29:59 COT 2013	14	10	
Tue Dec 03 15:30:01 COT 2013	11	10	
Tue Dec 03 15:32:31 COT 2013	16	10	
Tue Dec 03 15:32:32 COT 2013	9	10	
Tue Dec 03 15:32:33 COT 2013	10	10	
Tue Dec 10 17:52:50 COT 2013	1	10	
Tue Dec 10 17:52:53 COT 2013	2	10	
Tue Dec 10 17:52:59 COT 2013	0	10	
Tue Dec 10 17:53:03 COT 2013	1	10	
Tue Dec 10 17:53:05 COT 2013	1	10	
Tue Dec 10 17:54:32 COT 2013	2	10	
Tue Dec 10 17:54:38 COT 2013	3	10	
Tue Dec 10 19:27:07 COT 2013	0	10	
Tue Dec 10 19:27:00 COT 2013	0	10	

Figura. 130. Reporte de exposición

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

14. Las gráficas de la interface son de interés para el análisis de la exposición en tiempo real y las alarmas permitirán alertar cuando sea peligroso y atente contra la seguridad humana, Figura. 131.

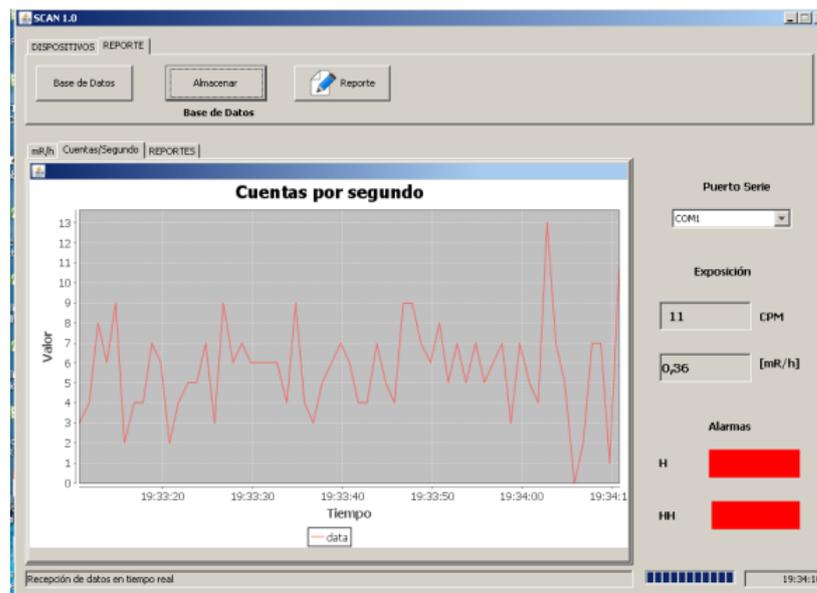


Figura. 131. Interface de usuario funcionando

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

4.3. COSTOS DEL PROYECTO

A continuación se realiza el análisis del costo individual del Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma, Tabla. 25, en tres tipos de Sistemas dependiendo de las necesidades del cliente.

Tabla. 25 Análisis de costos de Sistema

Costo del Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma					
Cantidad	Descripción	C. Unitario	Sistemas		
			Básico	Medio	Completo
1	Elementos electrónicos	\$ 12,60	\$ 12,60	\$ 12,60	\$ 12,60
5	Integrados comunes	\$ 0,80	\$ 4,00	\$ 4,00	\$ 4,00
3	Diodos de Potencia	\$ 9,00	\$ 27,00	\$ 27,00	\$ 27,00
1	Transformador	\$ 45,00	\$ 45,00	\$ 45,00	\$ 45,00
1	Micro Controlador	\$ 8,00	\$ 8,00	\$ 8,00	\$ 8,00
1	PCB	\$ 54,00	\$ 54,00	\$ 54,00	\$ 54,00
1	Caja del Proyecto	\$ 8,00	\$ 8,00	\$ 8,00	\$ 8,00
2	Baterías	\$ 6,00	\$ 12,00	\$ 12,00	\$ 12,00
1	Señalética	\$ 5,00	\$ 5,00	\$ 5,00	\$ 5,00
1	Adaptador de voltaje	\$ 20,00	\$ 20,00	\$ 20,00	\$ 20,00
1	Xbee	\$ 84,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 84,00
1	Xbee Xtick	\$ 140,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 140,00
1	Tubo GM	\$ 100,00	\$ 100,00	\$ 100,00	\$ 100,00
16	Mano de Obra Ensamblado (horas)	\$ 2,43	\$ 38,88	\$ 38,88	\$ 38,88
1	Costo de Diseño	\$ 148,45	\$ 148,45	\$ 148,45	\$ 148,45
1	Licencia Programa	\$ 66,00	\$ 0,00	\$ 66,00	\$ 66,00
Costo Total			\$ 482,93	\$ 548,93	\$ 772,93

Fuente: Elaborado por (Autor de la Investigación)

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

Con la ejecución del proyecto se cumple cabalmente con los objetivos propuestos del diseño de un Sistema de Detección y Monitoreo de Radiación Gamma para medir la exposición a la radiación del personal ocupacionalmente expuesto del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable.

El estudio del arte de las radiaciones ionizantes permite ampliar el conocimiento de la detección de la radiación, para aprovechar el comportamiento físico y eléctrico de la ionización en el tubo Geiger Müller.

El diseño de la Fuente de Alto Voltaje concluyó, que su salida tiene una precisión de $\pm 1.6\%$, excelente estabilidad y un mínimo rizado. Y el resultado de la fuente de alimentación con carga, arroja un error de 0.01 [V], y tiene un rizado menor de 100 [mV] mejorando la estabilidad general del sistema.

La precisa medición de radiaciones ionizantes se logra evitando el desfase y reduciendo el ruido del pulso nuclear, esto se logra por medio del circuito de acondicionamiento de pulsos nucleares. También la medición de radiación es dependiente del tiempo, y es necesaria una correcta temporización desde el circuito micro controlador para el conteo de pulsos, teniendo un error en tiempo de 0.01%.

Con resultados finales de las mediciones se obtuvo un factor de calibración de 1.08 con lo que se cumple el procedimiento establecido para instrumentos Detectores de Radiación. Por consiguiente, se recibió el certificado de calibración del Laboratorio legalmente constituido para emitirlo.

El Sistema permite tener un instrumento de alta tecnología y de producción nacional inalámbrico y portable; que puede ser utilizado en los módulos de medicina nuclear y otras instituciones que necesiten medir la exposición ambiental de rayos gamma en un rango desde 0.0625 mR/h y hasta 10mR/h.

El Costo del Sistema representa solo una fracción de los Sistemas comerciales establecidos con capacidades similares, lo que permitirá expandir el proyecto y reproducirlo como detector de radiación para instalaciones, en donde se trabaje con fuentes de radiación.

RECOMENDACIONES

Se recomienda probar diferentes análisis estadísticos más complejos implementados en el sistema micro procesado para mejorar, aún más, la medición de Radiación Ionizante.

Para los siguientes prototipos se recomienda implementar la fuente de 3.3 V para los módulos XBee, reducir el tamaño del circuito impreso utilizando elementos superficiales e incluir potenciómetros para modificar el alto voltaje y el factor de calibración en el detector.

Se recomienda mejorar el manejo de la carga y descarga del circuito de acople de las baterías que proporcionan energía al Detector de Radiación para que este proceso sea de forma automática.

La comunicación inalámbrica establecida en el Sistema permite versatilidad en el manejo de datos, debido a la capacidad de manejar redes de detectores de radiación, con lo que se recomienda explotar dichas posibilidades de comunicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACPRO. (17 de mayo de 2009). *Física de las radiaciones*. Obtenido de http://www.acpro.es/legis/fisica_radiaciones.html
- Arias, J. (9 de Julio de 2008). *Universidad de Valladolid*. Recuperado el 29 de Septiembre de 2013, de <http://www.ele.uva.es/~jesus/inversores.pdf>
- Armas Brito, P. (1987). *Tesis: Radiaciones ionizantes, estudio y protecciones*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Astronoo. (21 de diciembre de 2006). *Radiactividad o radioactividad*. Obtenido de <http://www.astronoo.com/es/articulos/radioactividad.html>
- BBC. (5 de noviembre de 2008). *Detección de radiación usando el tubo Geiger Muller*. Recuperado el 1 de agosto de 2013, de http://www.bbc.co.uk/bitesize/standard/physics/health_physics/nuclear_radiation/revision/5/
- Boylestad, R., & Nashelky, L. (2009). *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. México: Prentice Hall.
- Cádenas, R. (Febrero de 2009). *Monografías*. Recuperado el 29 de Septiembre de 2013, de <http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/disenio-digital-ingenieria/disenio-digital-ingenieria.pdf>
- Casillas, L., & Gibert, M. (2010). *Bases de Datos en MySQL*. Catalunya: Universidad de Catalunya.
- CEKIT. (2000). *Diseño y Fabricación de Circuitos Impresos*.
- CENAPRED. (2005). *Manual del Participante: Protección Radiológica para instructores del Pere*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

- CISCO. (5 de Marzo de 2010). *Console Cable*. Obtenido de <http://nosovdn-cisco.blogspot.com/2012/03/console-cable.html>
- Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica. (1979). *Reglamento de Seguridad Radiológica*. Quito: Presidencia de la República del Ecuador.
- Craig, B. (2004). *ZigBee*. ZigBee Allinace.
- Delta Electronics. (2013). *Conversor AC-DC*. Obtenido de <http://www.deltaww.com/Products/CategoryListT1.aspx?CID=0201&PID=344&hl=en-US&Name=ADP-40PH%20AB>
- Digi International Inc. (2013). *XBee/XBee-Pro RF Modules*. Minnetoka: Digi International.
- Dispositivos Digitales. (20 de 10 de 2013). *La Comunicación Serie*. Obtenido de <http://perso.wanadoo.es/pictob/comserie.htm>
- Dolnicar, J. (2000). Capacitación para el uso de la instrumentación nuclear. *Usos no energéticos de la tecnología nuclear*, 10.
- D'Souza, S. (2004). *Transformerless Power Supplies*. Microchiop Technolgy Inc.
- Duque, E., & Henao, C. (2010). *Manejo de una memoria SD/MMC con un PIC16F87x*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Educar Chile. (29 de Enero de 2007). *Diseño de Circuitos Impresos*. Recuperado el 2 de Septiembre de 2013, de http://ww2.educarchile.cl/UserFiles/P0029/File/Objetos_Didacticos/ELO_03_TEL/Recursos_para_la_Actividad/Diseno_de_Circuitos_Impresos.pdf
- Elmasri, R., & Navathe, S. (2007). *Fundamentos de Sistemas de Bases de Datos*. Georgia: Pearson.
- ENRESA. (4 de julio de 2012). *Los residuos radiactivos: naturaleza y percepción pública*. Obtenido de http://www.enresa.es/publicaciones_y_audiovisuales/documentacion/doc/60_plan_general_de_residuos_radiactivos/anexo_a

- Figuroa, J. (s.f.). *Comunicaciones Inalámbricas*. Sangolqui: Club de Robótica de la ESPE.
- Flakus, F. N. (1995). Detección y medición de la radiaciones ionizantes: historia sucinta. *OIEA Boletín*, 31-36.
- Foro de la Industria Nuclear Española. (30 de junio de 2009). *Rincón Educativo*.
Obtenido de
http://www.rinconeducativo.org/radiacio/2radiaciones_ionizantes_y_no_ionizantes.html
- García Breijo, E. (2008). *Compilador C CCS y simulador Proteus para microcontroladores PIC*. México: Alfaomega.
- García, V. (3 de agosto de 2012). *El transistor MOSFET*. Recuperado el 18 de agosto de 2013, de HISPAVILA:
<http://www.hispavila.com/3ds/atmega/mosfets.html>
- Hebel, M., & Bricker, G. (2010). *Getting Started with XBee RF Modules*. Estados Unidos: Parallax inc.
- Huertas, C., & Hueso, F. (2008). *Análisis de las desintegraciones de una fuente radioactiva: Ra-226*. Valencia: Universidad de Valencia.
- IAEA. (octubre de 2002). Nuclear Electronics. Seibersdorf, Austria.
- Images. (2 de junio de 2013). *Geiger Muller Tube Specifications*. Obtenido de
<http://www.imagesco.com/geiger/spec.html>
- International Atomic Energy Agency. (2000). *Safety Report Series No.16*. Vienna: IAEA.
- Jiménez Reyes, M., & Bulbulian, S. (8 de febrero de 2012). *El descubrimiento de la radiactividad natural*. Obtenido de
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/120/htm/sec_4.htm
- Knoll, G. F. (2000). *Radiation Detection and Measurement*. Michigan: Wiley.

- LND, INC. (15 de junio de 2013). *Detector LND 712*. Obtenido de <http://www.lndinc.com/products/pdf/711/>
- LND, INC. (s.f.). *712 End Window-Alpha-Beta-Gamma Detector*. New York: LND.
- Martinez, M. (17 de enero de 2010). *Recursos de Tecnología para el aula*. Recuperado el 3 de agosto de 2013, de <http://tecnologia-jesumolina.blogspot.com/2008/10/energa.html>
- Microchip Technology Inc. (2007). *PIC16F882/886/887 Data Sheet*. EUA: Microchip Technology Inc.
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (5 de junio de 2013). *MEER*. Obtenido de <http://www.energia.gob.ec/subsecretaria-de-control-y-aplicaciones-nucleares/>
- Muhammad, R. (1995). *Electrónica de Potencia*. México: Prentice Hall.
- Murrillo Ortiz, R., & López Pinales, P. (2007). *Tesis: Diseño y caracterización de un sistema de detección de partículas alfa, mediante un fotodiodo tipo PIN*. Zacatecas: Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Noriega, S. (2003). *Universidad Nacional de la Plata*. Recuperado el 29 de Septiembre de 2013, de <http://www.ing.unlp.edu.ar/islyd/apgeneradoresdeclock2003.pdf>
- Palacios, E., & Lopez, L. (2004). *Microcontrolador PIC16F84A Desarrollo de Proyectos*. México: Alfaomega.
- Peretti, G., & Romero, E. (2000). *Diseño de un contador Geiger con capacidad de autoverificación integrada*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- Ponsa, P., & Granollers, A. (s.f.). *Diseño de Pantalla*. Barcelona: Universitat Politecnica de Catalunya.
- Ramírez Jiménez, F. (2010). Instrumentación electrónica nuclear. *Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la ciencia y la Tecnología en México*, 3, 23-24.

- Reyes, C. (2006). *Microcontroladores PIC*. Quito: Automasis.
- Rodríguez, P. (20 de Octubre de 2013). *Diseño de Interfaces Hombre - Máquina (HMI)*. Obtenido de <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r94806.PDF>
- Salas, R., & Pérez, J. (2007). *Técnicas de diseño, desarrollo y montaje de circuitos impresos*. Recuperado el 29 de Septiembre de 2013, de Universidad de los Andes: http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/26205/1/tecnicas_diseno.pdf
- Salinas Rojas, P. (2008). *Manual de uso del programa de diseño de circuitos*. Caldas Colombia: SENA.
- SCAN. (2002). *Curso Básico de Protección Radiológica*. Quito: Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica (CEEAA).
- SCAN. (2005). *Acta final de fuentes de calibración*, . Quito: Laboratorio de Patrones Secundarios.
- SENPLADES. (2009). *Plan Nacional para el Buen Vivir 2009-2013: Construyendo un Estado Pluricultural e Intercultural*. Quito: República del Ecuador.
- STMicroelectronics. (1998). *IRF830*. Italia: STMicroelectronics.
- Suabia, B. (13 de febrero de 2011). *Eppur Si Muove*. Recuperado el 2 de agosto de 2013, de <http://arodrice.blogspot.com/2011/02/rontgen-y-el-descubrimiento-de-los.html>
- Texas Instruments. (2003). *Positive Voltaje Regulators*. Dallas: Texas Instruments Incorporated.
- Texas Instruments. (2004). *CD4049*. Dallas: Texas Instruments.
- Toledo Acosta, R., Arteché Díaz, R., & Mesa Pérez, G. (2001). *Nuevo dosímetro de zona programable para la medición y monitoreo operacional de la radiación gamma externa*. Habana: Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear.

- Tsoufanidis, N. (1995). *Measurement and Detection of Radiation*. EEUU: Taylor & Francis.
- Universidad Complutense de Madrid. (20 de junio de 2010). *Facultad de Ciencias Físicas*. Recuperado el 1 de agosto de 2013, de <http://nuclear.fis.ucm.es/LABORATORIO/guiones/Caracterizaci%F3ndeGeiger.pdf>
- Universidad de Chile. (28 de enero de 2010). *Radiactividad*. Obtenido de http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/ap/ciencias_quimicas_y_farmaceuticas/ap-fisquim-farm2/c3.1.html
- Universidad de Chile. (10 de junio de 2013). *Radiactividad*. Obtenido de http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/ap/ciencias_quimicas_y_farmaceuticas/ap-fisquim-farm2/c3.1.html
- Universidad de Córdoba. (3 de octubre de 2010). *Tutorial de la Radioactividad*. Obtenido de http://web.archive.org/web/20100715000000*/http://rabfis15.uco.es/ermuna.net/tutorial/cuidados.htm
- Universidad de Navarra. (20 de Marzo de 2007). *TECNUN*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2013, de http://www.tecnun.es/asignaturas/SistElec/Practicas/PR_SIS_01.pdf
- Universidad de Santiago de Compostela. (6 de junio de 2013). *Detección de radiación ionizante*. Obtenido de <http://fpaxp1.usc.es/~campus/doc/Geiger-Muller.pdf>
- Universidad de Sevilla. (27 de Febrero de 2012). *Departamento de Tecnología Electrónica*. Recuperado el 29 de Septiembre de 2013, de http://www.dte.us.es/tec_inf/itis/tcomp/Tema5/Tema5.pdf
- Universidad de Valencia. (2013). *Laboratorio de Física Nuclear y de Partículas*. Valencia: Facultad de física.
- VISHAY. (2012). *Power MOSFET IRF640*. VISHAY.