

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades



**Megaproyecto LAGO UVG Fase 2: Implementación de un
diseño para dar autonomía y autosostenibilidad a un detector
de radiación cósmica Chérenkov en el volcán Atitlán,
Suchitepéquez y actualización de tecnología FPGA**

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por
Juan Diego Benítez Cáceres
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica;
Cristian Daniel de León Castillo
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en Ciencias de la
Administración;
Juan Luis García Zarceño y Diego Javier Sosa Torres
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en C.C. de la Computación y
T.I.;
María José López Ayala, José Pablo Ortega Grajeda y Daniela Izabel Pocasangre Arévalo
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica;
René Patricio Marroquín Fuentes
para optar al grado académico de Licenciado en Química;
y Christian Saidin Ramírez Mollinedo
para optar al grado académico de Licenciado en Física

Guatemala

2018

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades



**Megaproyecto LAGO UVG Fase 2: Implementación de un
diseño para dar autonomía y autosostenibilidad a un detector
de radiación cósmica Chérenkov en el volcán Atitlán,
Suchitepéquez y actualización de tecnología FPGA**

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por
Juan Diego Benítez Cáceres
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica;
Cristian Daniel de León Castillo
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en Ciencias de la
Administración;
Juan Luis García Zarceño y Diego Javier Sosa Torres
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería en C.C. de la Computación y
T.I.;
María José López Ayala, José Pablo Ortega Grajeda y Daniela Izabel Pocasangre Arévalo
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica;
René Patricio Marroquín Fuentes
para optar al grado académico de Licenciado en Química;
y Christian Saidin Ramírez Mollinedo
para optar al grado académico de Licenciado en Física

Guatemala

2018

Vo.Bo.:



Ing. Luis Mijangos

Directores de Departamentos:



MSc. Zaida Urrutia



MSc. Carlos Esquit



MBA. Raúl Fernando Dacaret



MSc. Douglas Barrios



Lic. Ángel Ramirez

Fecha de aprobación:

Guatemala, 10 de diciembre de 2018

Agradecimientos

Queremos agradecer a todas las personas que, debido a su gran ayuda y apoyo, permitieron que este proyecto se concluyera con éxito. Nos fue de grandísima ayuda para poner en marcha el proyecto y para poderlo terminar. Hubo dificultades que, gracias a su apoyo, pudimos superarlas.

Primeramente quisiéramos darle un gran agradecimiento a José Monzón (Don José) y a Francisco Carrillo (Chico), ya que sin ellos hubiera sido imposible lograr con éxito la totalidad del proyecto. Siempre estuvieron dispuestos a llevarnos y subirnos hacia la reserva, que implicaba un viaje de 8 horas, tomando en cuenta lo complicado que era el camino para subir hacia la reserva. No cualquier persona con familia dedica un día de fin de semana completo, y eso muestra el gran apoyo que Don José y Chico nos ofrecieron.

También extendemos un gran agradecimiento hacia UVG Campus Sur, especialmente a Melvin, Verni Pérez y Fernando Rivera, quienes siempre estuvieron desde temprano apoyándonos durante las visitas hacia dicho Campus, y también cuando fue necesario realizar algún arreglo de la antena o la computadora mientras estábamos fuera del Campus.

Agradecemos también al Departamento de Física, especialmente a nuestro coordinador, Luis Mijangos, quien siempre nos estuvo apoyando para cumplir nuestros objetivos y nos atendió a cada uno de nosotros cuando necesitábamos de su ayuda. A Zaida Urrutia y a Olga Castellanos (Olguita), quienes siempre nos estuvieron ayudando con todos los trámites para poder realizar los viajes hacia la reserva y UVG Campus Sur; y a Byron Alay, quien siempre nos proporcionó los instrumentos necesarios para las pruebas en el laboratorio de física.

Agradecemos profundamente a nuestros asesores de trabajo de graduación, quienes nos ayudaron de manera incondicional para lograr el éxito en el módulo de cada uno de nosotros: Angelika Rebecca Hasselmann Arana (asesora de René Marroquín), Heberth Stuardo Campos (asesor de Cristian De León), José Antonio Bagur Nájera (asesor de José Pablo Ortega), Karen Salomé Caballero Mora (asesora de Christian Ramírez), Luis José Pinillos Motta (asesor de Juan Diego Benítez), Luis Roberto Furlán Collver (asesor de Daniela Poca-sangre), Lynette García Pérez (asesora de Diego Sosa), Pablo Roberto Oliva Fonseca (asesor de María José López) y Sergio Eduardo Molina Castellanos (asesor de Juan Luis García).

Y, muy importante, un súper agradecimiento a la colaboración LAGO y a todos sus miembros que nos brindaron la ayuda y apoyo cuando lo necesitamos, incluso en tiempos fuera de horario normal. La comunidad, sin duda alguna, muestra un gran apoyo hacia cualquier miembro de ella. Fue un honor habernos permitido formar parte de ella, y esperamos que nuestro trabajo les sea de ayuda. Extendemos un especial agradecimiento a Horacio Arnaldi, miembro de la colaboración LAGO en Bariloche, Argentina, quien brindó total apoyo para ambos detectores de manera incondicional.

Agradecimientos	IV
Lista de figuras	XIX
Lista de cuadros	XXII
Resumen	XXIII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
4.1. Objetivos generales del megaproyecto	7
4.2. Objetivos específicos por módulo	7
4.2.1. Módulo de calibración, análisis e interpretación de datos	7
4.2.2. Módulo de fabricación de planchas centelleadoras de PVT	8
4.2.3. Módulo de potencia	8
4.2.4. Módulo de transmisión de datos	8
4.2.5. Módulo de control central	8
4.2.6. Módulo de actualización de tecnología	9
4.2.7. Módulo de análisis en <i>Big Data</i>	9
4.2.8. Módulo de infraestructura de datos	9
4.2.9. Módulo de gestión de proyecto	9
5. Astrofísica de partículas	11
5.1. Modelo estándar	11
5.2. Efecto fotoeléctrico	12
5.3. Procesos radiativos	12
5.3.1. Dispersión de rayos X y efecto Compton	12
5.3.2. Aniquilación y producción de pares	14

5.3.3. Decaimiento β e interacciones débiles	15
5.4. Rayos cósmicos	17
5.4.1. Espectro de RC	18
5.5. Destellos de rayos gamma (GRBs)	21
5.6. Neutrinos	22
6. Detectores y técnicas de detección	23
6.1. Radiación Chérenkov	23
6.2. Tubos fotomultiplicadores	26
6.2.1. Corriente oscura	28
6.2.2. Multiplicación de electrones	28
7. Teoría de propagación del error	31
7.1. Error de medición	31
7.2. Incertidumbre de funciones de variables independientes	32
7.3. Incertidumbre de funciones de variables dependientes	32
8. Latin American Giant Observatory	35
8.1. Introducción	35
8.2. Detectores de radiación Chérenkov en agua	36
8.3. Detectores de LAGO	37
8.4. Electrónica de los detectores de radiación	38
9. Pruebas de luz	41
9.1. Introducción	41
9.2. Necesidad de una prueba de filtraciones de luz	41
9.3. Fotografía	42
9.3.1. Sensibilidad	42
9.3.2. Obturación	43
9.3.3. Diafragma	43
9.4. Diseño experimental de prueba con cámara	43
9.5. Análisis de fotografía	47
9.6. Propuesta de prueba con arduino	48
9.6.1. Montaje y diseño	48
9.7. Resultados	49
10. Decrecimiento Forbush y efecto de los sismos en la radiación cósmica	51
10.1. Decrecimiento Forbush	51
10.1.1. Propuesta de análisis de datos	52
10.2. Efectos de los movimientos telúricos en la radiación cósmica	52
10.2.1. Propuesta de análisis de datos	53
11. Estructura completa del sistema de detección en volcán Atitlán	55
12. Sistema de potencia	57
12.1. Sistema solar fotovoltaico	57
12.2. Diseño del sistema	58
12.2.1. Estimación del consumo de potencia	58
12.2.2. Ubicación de la reserva	58

12.2.3. Elementos del SSF aislado	58
12.2.4. Cálculos para dimensionamiento de cada elemento	59
12.3. Resumen del sistema solar fotovoltaico adquirido	62
12.4. Diseño de sistema de protección contra rayos según norma NFPA 780	63
12.5. Evaluación del riesgo del rayo	63
12.6. Evaluación de la necesidad de un sistema de protección contra rayos	66
12.7. Componentes utilizados en el SPCR	68
13. Adquisición de datos con Nexys 2 y Raspberry Pi	69
13.1. Sistema operativo Raspbian Jessie	69
13.2. Paquete de adquisición y librería FPGA	69
13.3. Voltaje de polarización, nivel de disparo y adquisición de pulsos	73
13.4. Suite de adquisición de datos ACQUA	75
13.5. Resultados obtenidos del sistema de adquisición	75
14. Instrumentación electrónica	77
14.1. Sensor de presión y temperatura	77
14.2. Módulo de GPS	78
14.3. Sensor de humedad	80
14.4. Sensores de corriente	81
14.5. Integración de sensores	82
14.6. Resultados obtenidos de la instrumentación electrónica	82
15. Sistema de comunicación	85
15.1. Red	86
15.1.1. Modelo ISO/OSI	87
15.1.2. Local-Area Networks (LAN)	88
15.1.3. Enlace punto a punto	91
15.1.4. Red CLARA	93
15.2. Antena	93
15.2.1. Eficiencia de una antena	93
15.2.2. Ganancia de potencia de una antena	94
15.2.3. Diagrama de radiación	94
15.2.4. Zona de Fresnel	94
15.3. AirGrid [®] M de Ubiquiti Networks [®]	95
15.3.1. Ubiquiti Networks [®] airMax TDMA	96
15.3.2. Modulación	96
15.3.3. Especificaciones físicas y eléctricas	97
15.3.4. Especificaciones de red	97
15.3.5. Diagrama de radiación	97
15.3.6. Power Over Ethernet (PoE)	98
15.3.7. AirOS 6	99
15.4. Metodología	99
15.4.1. Determinación de ubicación de los equipos de red	99
15.4.2. Adquisición de radiofrecuencia	100
15.4.3. Diseño de enlace	101
15.4.4. Montaje de equipo de red	101
15.4.5. Configuración de equipo de red situado en reserva biológica “El Quetzal”	102

15.4.6. Configuración de equipo de red situado en Universidad del Valle de Guatemala (Campus Sur)	105
15.4.7. Configuración de red	106
15.4.8. Pruebas de envío	106
15.4.9. Pruebas de envío desde volcán Atitlán hacia UVG Sur	109
15.4.10. Pruebas de envío desde UVG Sur hacia UVG Central	110
15.4.11. Pruebas de envío a repositorio del proyecto LAGO	110
15.5. Resultados	111
15.5.1. Características del enlace	111
15.5.2. Ubicación de equipos inalámbricos	111
15.5.3. Análisis del espectro	111
15.5.4. Desempeño de equipos inalámbricos	113
15.5.5. Conectividad entre UVG Campus Sur y UVG Campus Central	115
15.5.6. Envío de datos desde UVG Central a repositorio del proyecto LAGO	116
16. Módulo de control a distancia del detector	117
17. Sistema de monitoreo remoto	119
17.1. Montaje de servidor FTP en Raspberry Pi	119
17.1.1. Configuración del router	120
17.1.2. Conexión a la red	121
17.1.3. Configuración de servidor FTP	122
17.1.4. Configuración de detección de movimiento	123
17.2. Pruebas de funcionamiento	124
17.2.1. Envío de archivo a Raspberry Pi	125
17.2.2. Envío de archivos por detección de movimiento	125
18. Calibración, caracterización y análisis de datos	127
18.1. Caracterización y calibración de un PMT	127
18.1.1. Calibración de un PMT	127
18.1.2. Fotoconversión y colección de electrones	127
18.1.3. Espectro de cargas	128
18.1.4. Diseño experimental de la caracterización	129
18.1.5. Topología del montaje experimental	132
18.1.6. Condiciones de luz	133
18.1.7. Alimentación del PMT	133
18.1.8. Lectura de datos	134
18.1.9. Generador de pulsos	134
18.2. Muon vertical equivalente (VEM)	138
18.2.1. Definiciones útiles para el cálculo del VEM	138
18.2.2. Descripción del cálculo del VEM	141
18.2.3. Cálculo del error en el VEM	143
18.3. Calibración del WCD por método del VEM	144
18.4. Flujo vertical de muones	145
18.5. Resultados	145
18.5.1. Cálculos y error	145
18.5.2. Cálculo del VEM y calibración del VEM	146
18.5.3. Flujo vertical de muones	147

18.6. Análisis de datos por medio de <i>Big Data</i>	148
18.6.1. Algoritmos	148
18.6.2. Análisis exploratorio	149
18.6.3. Análisis de datos	150
18.6.4. Comparación de algoritmos	152
18.7. Visualización de análisis de datos	153
18.7.1. Requisitos funcionales	153
18.7.2. Diseño e integración	153
18.7.3. Ecosistema	154
18.7.4. Dashboard	155
19. Infraestructura de datos	157
19.1. Diseño de arquitectura	157
19.2. Software y hardware	158
19.2.1. Hardware	158
19.2.2. Software	162
19.3. Ingesta de datos	167
19.3.1. UVG Sur - UVG Central	169
19.3.2. UVG Central - cluster	169
19.4. Limpieza y estructurado de datos	170
20. Nuevo sistema de adquisición de datos	173
20.1. Sistemas de adquisición de datos	173
20.1.1. Adquisición de datos	173
20.1.2. Matriz de compuertas programables (FPGA)	173
20.1.3. Microprocesador	175
20.1.4. Red Pitaya®	176
20.1.5. Digilent Nexys 2	179
20.1.6. Señales analógicas	180
20.1.7. Proesamiento de señales digitales	181
20.1.8. Sensores	184
20.1.9. Protocolo I2C	186
20.1.10. Protocolo SPI	186
20.2. Metodología nuevo sistema de adquisición de datos	187
20.2.1. Familiarización con Red Pitaya®	187
20.2.2. Instalación de la versión oficial LAGO	187
20.2.3. Instalación de Vivado HLx 2016.4	187
20.2.4. Generación del bitstream	189
20.2.5. Instalación del software en memoria microSD	190
20.2.6. Configuración de fecha y hora	191
20.2.7. Instalación de dependencias	192
20.2.8. Pruebas del sensor de presión y temperatura	192
20.2.9. Adquisición de datos	194
20.2.10. Generación de señales	196
20.2.11. Consumo de energía	198
20.3. Resultados nuevo sistema de adquisición de datos	199
20.3.1. Medición de pulsos provenientes del WCD Kinich Ahau	199
20.3.2. Medición de pulsos provenientes del generador de funciones	200

20.3.3. Pulsos negativos	201
20.3.4. Señales analógicas	202
20.3.5. Formato de archivo generado al realizar una adquisición de datos	203
20.3.6. Señal de control para placa de alto voltaje	204
20.3.7. Caracterización de fuente de alto voltaje EMCO C20	204
20.3.8. Mediciones de presión, temperatura y altitud	206
20.3.9. Energía y potencia consumida	206
21. Centelleadores	213
21.1. Centelleadores inorgánicos	214
21.2. Centelleadores orgánicos	214
21.3. Proceso de centelleo	215
21.3.1. Transferencia de energía resonante de Förster (FRET)	216
21.3.2. Fluorescencia	217
21.4. Relación entre energía absorbida y fotones emitidos	218
21.5. Agentes dopantes en centelleadores	219
21.5.1. Moléculas fluorescentes (Flúors)	219
21.5.2. Técnicas para dopar centelleadores	219
21.6. Cuidados de los centelleadores orgánicos	220
21.7. Metodología	221
21.7.1. Resumen de cada procedimiento	221
21.7.2. Descripción de variables	224
22. PMI y las buenas prácticas de gestión de proyectos en LAGO	227
22.1. PMI: Project Management Institute	227
22.2. Definición de proyecto	228
22.3. Ciclo de vida en proyectos	228
22.4. Áreas de conocimiento de la dirección de proyectos	229
22.4.1. Gestión de la integración del proyecto	229
22.4.2. Gestión del alcance del proyecto	231
22.4.3. Gestión del tiempo del proyecto	234
22.4.4. Gestión de los costos del proyecto	237
22.4.5. Gestión de la calidad del proyecto	239
22.4.6. Gestión de los recursos humanos del proyecto	241
22.4.7. Gestión de las comunicaciones del proyecto	242
22.4.8. Gestión de los riesgos del proyecto	243
22.4.9. Gestión de las adquisiciones del proyecto	245
22.4.10. Gestión de los interesados en el proyecto	246
23. Conclusiones	247
23.1. Módulo de calibración, análisis e interpretación de datos	247
23.2. Módulo de fabricación de planchas centelleadoras de PVT	247
23.3. Módulo de potencia	248
23.4. Módulo de transmisión de datos	248
23.5. Módulo de control central	248
23.6. Módulo de actualización de tecnología	249
23.7. Módulo de análisis en <i>Big Data</i>	249
23.8. Módulo de infraestructura de datos	250

23.9. Módulo de gestión de proyecto	250
24.Recomendaciones	253
24.1. Módulo de calibración, análisis e interpretación de datos	253
24.2. Módulo de fabricación de planchas centelleadoras de PVT	253
24.3. Módulo de potencia	254
24.4. Módulo de transmisión de datos	254
24.5. Módulo de control central	254
24.6. Módulo de actualización de tecnología	255
24.7. Módulo de análisis en <i>Big Data</i>	255
24.8. Módulo de infraestructura de datos	256
24.9. Módulo de gestión de proyecto	256
25.Bibliografía	259
26.Anexos	267
26.1. Diagrama de conectividad del proyecto	267
26.2. Ejemplo de archivo de datos obtenido con el detector	268
26.3. Información sobre sistema operativo Raspbian Jessie	269
26.4. Repositorio del megaproyecto	269
26.5. Repositorio del dashboard	269
26.6. Radio situado en UVG Campus Sur	270
26.7. Radio situado en reserva biológica “El Quetzal”	270

Lista de figuras

1.	Diseño experimental para la producción de Rayos X. Extraído de [8].	13
2.	Diagrama de la dispersión de Compton Extraído de [9]	13
3.	Diagrama de un electrón pasando cerca de un núcleo atómico y produciendo Bremsstrahlung, extraído de [8].	14
4.	a) Diagrama esquemático del positronio, b) Lo que sucede después de la aniquilación, Extraído de Extraída de [9].	15
5.	a) y b) decaimientos β expuestos anteriormente, c) y d) decaimientos de hadrones, normalmente se encuentran en rayos cósmicos y e) decaimiento de un muón,[11].	17
6.	Victor Hess iniciando su acenso a 5000m, del lado derecho se muestra un electroscopio, instrumento que usó Hess en sus mediciones en las alturas. Extraído de [13].	18
7.	Gráfico de espectro de energía donde se puede apreciar la rodilla, tobillo y corte Extraído de [12]	19
8.	Diagrama de una lluvia extensa clasificada por componentes, extraído de [16]	20
9.	Diagrama de un GRB y su comportamiento a lo largo de su recorrido, extraído de [13].	22
10.	Avión desplazándose a menor velocidad (izquierda), igual velocidad (centro) y mayor velocidad (derecha) del sonido, Extraído de [20]	24
11.	Esquema de la producción de radiación Cherenkov, Extraído de[20]	25
12.	Proceso de detección de un fotón y partes de un tubo fotomultiplicador. Extraído de [21].	27
13.	Detector Cherenkov en agua del Observatorio Pierre Auger [12].	37
14.	Imagen de la configuración de un detector de luz Chérenkov en agua (WCD), como los usados en LAGO. [14].	38

15.	Izquierda: Histograma de cargas de un estudio independiente en el que no se tiene luz extra [35]. Derecha: Histograma de cargas para una hora de datos tomados antes de la prueba de luz, donde el detector tiene filtraciones de luz, extraído de [13] estudio hecho con el mismo tanque donde se realizan las pruebas de luz presentadas. Se observa una rodilla entre 200 y 600 ADCq en el histograma de la derecha, ausente en el de la izquierda.	42
16.	Screen shot de la aplicación a instalar	43
17.	Menú de la cámara Canon T6 donde se muestra el Wi-Fi activado	44
18.	Menú de la cámara Canon T6 donde se muestra la conexión para un smart phone (teléfono inteligente)	44
19.	Listado de conexiones WI-FI encontradas por un celular donde la primera es la conexión de la cámara.	45
20.	Página principal de la aplicación de Canon en un smart phone.	45
21.	Fotografía de la ubicación de la cámara para pruebas de luz	46
22.	Diagrama de la ubicación de la cámara para pruebas de luz	46
23.	Fotografía donde se pueden apreciar las filtraciones de luz que posteriormente serán cubiertas	47
24.	Fotografía donde se puede mirar muy oscuro el interior del tanque esto se debe a que existen filtraciones de luz y se necesita recubrir	47
25.	Fotografía donde ya no hay filtraciones de luz visibles	48
26.	Modelo del circuito empleado para hacer la prueba, existen más configuraciones pero esta es la más sencilla	48
27.	Histograma de cargas semilog, posterior a las pruebas de luz y a la eliminación de filtraciones visibles de luz	49
28.	Gráfica de incremento porcentual de la intensidad de flujo de rayos cósmicos contra tiempo, donde se puede observar el decrecimiento Forbush entre los días 29 de octubre y 1 de noviembre.[40]	52
29.	Diagrama de la estructura completa del detector.	56
30.	Interconexión del sistema solar fotovoltaico aislado seleccionado.	59
31.	Elementos del sistema solar fotovoltaico instalado en la Reserva UVG: regulador MPPT, panel solar y baterías de gel.	62
32.	Instalación de SPCR en Reserva UVG	68
33.	Ejemplo de encabezado de archivo de datos .dat.	72
34.	Pulso obtenido y almacenado en archivo de datos .dat.	74
35.	Gráfico del pulso obtenido.	76
36.	Empaquetado del sensor de presión y temperatura.	78
37.	Módulo GPS RPI Add-on V2.0.	79
38.	Datos obtenidos del GPS si la instalación fue correcta.	79
39.	Empaquetado del módulo de humedad y temperatura DHT11.	80
40.	Conexión de módulo DHT11 con Raspberry Pi. Obtenido de [53].	81
41.	Empaquetado del sensor de corriente ACS712 con filtro en la señal de salida.	81
42.	Fotografía de la placa perforada sobre el módulo GPS en Raspberry Pi.	83
43.	Diagrama de interconexión de la red sensores.	83

44.	Diagrama de sistema de comunicación	85
45.	Espectro electromagnético	86
46.	Elementos de una red	87
47.	Modelo ISO/OSI	87
48.	Topologías de una red	88
49.	Cable coaxial	89
50.	Cable de par trenzado (UTP)	89
51.	Fibra óptica	89
52.	Conector BNB y N	90
53.	Conectores RJ-11 y RJ-45	90
54.	Pines de conector RJ45	91
55.	Partes de una antena parabólica	93
56.	Ejemplo de diagrama de radiación de una antena parabólica	94
57.	Zona de Fresnel	95
58.	AirGrid® M	95
59.	Diagrama de radiación ángulo azimutal de AirGrid® M	97
60.	Diagrama de radiación ángulo de elevación de AirGrid® M	98
61.	Power over Ethernet	98
62.	Perfil de elevación	100
63.	Presupuesto de enlace inalámbrico	101
64.	AirGrid® M5 23dBi	101
65.	AirGrid® M con kit de montadura	102
66.	Pantalla de inicio airOS6	103
67.	Pestaña Main - Radio situado en reserva biológica	103
68.	Pestaña Wireless - Radio situado en reserva biológica	104
69.	Pestaña Network - Radio situado en reserva biológica	104
70.	Pestaña Advanced - Radio situado en reserva biológica	105
71.	Pestaña Main - Radio situado en UVG Sur	105
72.	Configuración de red	106
73.	Mapa de elevación – Prueba hacia el edificio de apartamentos Neo	106
74.	Mapa de elevación – Prueba hacia el Mirador de San Lucas Sacatepéquez	107
75.	Cálculo ángulo de elevación	107
76.	Cálculo ángulo de orientación	108
77.	Ubicación de radio en UVG Campus Sur	108
78.	Ubicación de radio reserva biológica “El Quetzal”	108
79.	Luces LED incorporadas en AirGrid® M	109
80.	Potencia de la señal y CCQ en airOS6	109
81.	Carga de archivo de ejemplo a repositorio LAGO	110
82.	Enlace punto a punto	111
83.	Analizador de espectros	112
84.	Radio trabajando en frecuencia central de 5.8GHz	112
85.	Radio trabajando en frecuencia central de 5.77GHz	113
86.	Ancho de banda vs. Distancia	114
87.	Archivo de 2GB enviado desde reserva a UVG Campus sur	114
88.	Archivo de 0.86GB enviado desde reserva a UVG Campus sur	114
89.	Comando mtr desde reserva hacia computadora UVG Campus Sur	114
90.	Ancho de banda de enlace con envío de video en tiempo real	115
91.	Calidad de enlace con envío de video en tiempo real	115

92.	Comando ping desde UVG Sur a UVG Central	116
93.	Prueba de envío de datos desde UVG Campus Central a repositorio de LAGO	116
94.	Interfaz de la cámara IP encontrada en el buscador	120
95.	Configuración de parámetros de cámara: resolución, brillo y contraste.	122
96.	Configuración de la cámara a red inalámbrica	122
97.	Configuración del servidor FTP en la Cámara Wi-Fi	123
98.	Configuración de control de movimiento: sensibilidad e intervalos de captura .	124
99.	Almacenamiento de archivos si se detecta movimiento cada 10 segundos . . .	124
100.	Fotografía de la reserva tomada en la posición final de la cámara IP	125
101.	Calibración del PMT obtenida por la primera generación del proyecto LAGO-UVG [14]	128
102.	Gráfica de espectro de carga de un PMT [21]	129
103.	Vista lateral del PMT R5912 [22]	130
104.	Diagrama de pines del tubo fotomultiplicador extraída de [21]	130
105.	Fotografía de la tarjeta de desarrollo Genesys 5 con FPGA, se utiliza para generar el pulso	131
106.	Gráfico de intensidad contra longitud de onda del led azul usado en la caracterización	131
107.	Topología del montaje experimental.	133
108.	Esquemático del circuito regenerativo. Obtenido de [80].	135
109.	Circuito para moldear pulsos. Obtenido de [80].	136
110.	Pulso generado con medición de ancho a media amplitud.	137
111.	Secuencia de pulsos generada.	138
112.	Archivo usual de datos de un WCD de LAGO datos obtenidos del detector ubicado en la Universidad del Valle de Guatemala	142
113.	Pulso usual de datos de un WCD de LAGO, la integral de esta curva es la carga integrada para el caso discreto, únicamente es la suma de los datos. Gráfico hecho con los datos del detector ubicado en la Universidad del Valle de Guatemala	143
114.	Histograma de carga usual de un WCD [13]	143
115.	Gráfico de VEM a lo largo del tiempo por 48 horas de medición	144
116.	Histograma de cargas semilogarítmico del detector K'inich Ahau ahora ubicado en el volcán Atitlán	146
117.	Gráfico de Vems por tiempo del detector K'inich Ahau ahora ubicado en el volcán Atitlán	146
118.	Histograma de VEMs recolectados durante 300 horas K'inich Ahau ahora ubicado en el volcán Atitlán con Media=470, Desviación estándar=14 y kurtosis=-0.44	147
119.	Gráfico de flujo de muones verticales en el tiempo	148
120.	Pulsos capturados	150
121.	Histograma ADCq	150
122.	Histograma log ₁₀ (ADCq)	151
123.	Savitzky-Golay: Histograma 2D conteo derivadas por área	151
124.	Media Móvil Simple: Histograma 2D Conteo Derivadas por Área	152
125.	Comparación ejecución normal vs ejecución paralelamente distribuida	152
126.	Dashboard: diagrama entidad relación de resultados	154

127.	Dashboard: Vista principal, menú para selección por tabs	155
128.	Dashboard: Selección por fecha	155
129.	Dashboard: Histograma 2D conteo derivadas por area	156
130.	Dashboard: Vista de Login	156
131.	Dashboard: Amplitud de Pulso vs Tiempo hasta Amplitud Máxima	156
132.	Distribución de equipo dentro del rack	160
133.	Infraestructura final desarrollada	161
134.	Infraestructura final desarrollada	162
135.	Vista de los repositorios servidor por un servidor http.	163
136.	Vista del login de Ambari	164
137.	Dashboard de Ambari	164
138.	KPIS dentro del dashboard de Ambari	165
139.	Servicios ubicados en cada uno de los nodos del cluster	167
140.	Flujo de envío de información	169
141.	Conteo de datos dentro de cluster	172
142.	EDatos	172
143.	Placa de desarrollo Mojo FPGA hecha por Adafruit.com	174
144.	Sección Synthesis de Vivado	175
145.	Sección Implementation de Vivado	175
146.	Sección Program and Debug de Vivado	175
147.	Microprocesador	176
148.	Placa Red Pitaya	176
149.	Arquitectura de la Red Pitaya	177
150.	Interfaz de Ubuntu	178
151.	Tarjeta Nexys 2	179
152.	Señal sinusoidal	180
153.	Generador de funciones BK Precision 4033	181
154.	Generador de funciones BK Precision 4011A	181
155.	Esquema de convertidor analógico-digital	182
156.	Señal sinusoidal al ser muestreada por impulsos	183
157.	Muestreo de señal sinusoidal	183
158.	Esquema de convertidor digital-analógico	184
159.	Sensor BMP180	185
160.	Keweisi KWS-10VA	185
161.	Esquema de protocolo I2C	186
162.	Esquema de protocolo SPI	186
163.	Instalación Vivado	188
164.	Finalización proyecto Vivado	189
165.	Finalización proyecto Vivado	190
166.	Red Pitaya encendida	190
167.	Ping a Red Pitaya	191
168.	Comunicación por SSH	191
169.	Prueba de sensor de temperatura BMP180	192
170.	Prueba de sensor de temperatura BMP180	192
171.	Comandos de LAGO disponibles	193
172.	Configuración fuente de alto voltaje	194

173.	Circuito de control para fuente EMCO C20	195
174.	Configuración trigger	196
175.	Pulso positivo generado	196
176.	Pulso negativo generado	197
177.	Señal sinusoidal positiva generada	197
178.	Señal triangular positiva generada	198
179.	Medición de corriente y voltaje en la placa Red Pitaya	198
180.	Medición de corriente y voltaje en Raspberry Pi 2	199
181.	Medición salida Kinich Ahau (Osciloscopio Red Pitaya)	199
182.	Medición pulso positivo con trigger de 10	200
183.	Medición pulso positivo con trigger de 75	200
184.	Medición pulso positivo con trigger de 125	201
185.	Medición pulso negativo con trigger de 300	201
186.	Medición de señal sinusoidal positiva con trigger de 0	202
187.	Medición de señal triangular positiva con trigger de 0	202
188.	Medición de señal triangular positiva con trigger de 0	203
189.	Medición de señal triangular positiva con trigger de 0	204
190.	Voltaje de salida vs voltaje de entrada	205
191.	Corriente de consumo vs voltaje de entrada	205
192.	Medición de temperatura y presión con sensor BMP180	206
193.	Consumo de corriente Red Pitaya en estado de espera	210
194.	Potencia Red Pitaya en estado de espera	210
195.	Consumo de corriente Raspberry Pi 2 en estado de espera	210
196.	Potencias Raspberry Pi 2 y sistema completo en estado de espera	211
197.	Consumo de corriente Red Pitaya realizando adquisición de datos	211
198.	Potencia Red Pitaya realizando adquisición de datos	211
199.	Consumo corriente Raspberry Pi 2 realizando adquisición de datos	212
200.	Potencias Raspberry Pi 2 y sistema completo realizando adquisición de datos	212
201.	Ejemplos de centelleadores orgánicos comerciales, [111]	214
202.	Espectro de emisión de los centelleadores EJ-200, EJ-204, EJ-208 y EJ-212, de Eljen Technologies, [111]	216
203.	Representación del mecanismo de operación de un centelleador orgánico, [114]	216
204.	Cambios registrados en el proyecto.	231
205.	Estructura de desglose de trabajo del proyecto.	234
206.	Diagrama de hitos del proyecto.	236
207.	Proyección mensual del presupuesto.	238
208.	Diagrama de flujo de funcionamiento del detector de la reserva 'El Quetzal'.	240
209.	Diagrama de flujo de funcionamiento del detector en la universidad.	240
210.	Plantilla de hojas de control.	240
211.	Diagrama de Ishikawa del detector de la universidad.	241
212.	Técnicos externos al equipo ejecutor de LAGO.	242
213.	Organigrama de los ejecutores del proyecto.	242
214.	Resumen de los interesados del proyecto.	246
215.	Diagrama de red del proyecto LAGO Universidad del Valle de Guatemala	267
216.	Encabezado de un archivo del detector en el volcán Atitlán.	268

217. Dos pulsos obtenidos por el sistema de adquisición de datos.	268
218. Ejemplo de la lectura del estado actual del detector.	269
219. Radio en UVG Campus Sur	270
220. Radio en reserva biológica	270

Lista de cuadros

1.	Configuración de la cámara para la prueba	46
2.	Requerimientos de consumo de potencia para detector de radiación Cherenkov	58
3.	Consumo de energía diario con margen de seguridad	60
4.	Resumen de sistema solar fotovoltaico adquirido en el mercado local	63
5.	Coeficientes relativos a la estructura de la edificación según NFPA 780 Tabla L.4.3	64
6.	Coeficientes de determinación estructural según NFPA 780 Tabla L.5(a)	65
7.	Coeficientes de determinación del contenido de la estructura según NFPA 780 Tabla L.5(b)	65
8.	Coeficientes de ocupación de la estructura según NFPA 780 Tabla L.5(c)	65
9.	Coeficientes de determinación de consecuencias del impacto de un rayo según NFPA 780 Tabla L.5(d)	66
10.	Materiales empleados en el sistema de protección contra rayos	68
11.	Comandos para adquisición de datos.	71
12.	Registros configurables para adquisición de datos.	72
13.	Pulso obtenido con el detector en el volcán Atitlán.	76
14.	Medios de propagación	86
15.	Modulación AirGrid® M5	96
16.	Especificaciones físicas y potencia, AirGrid® M5	97
17.	Especificaciones AirGrid® M5	97
18.	Pie de página GTM-6	100
19.	Propiedades del enlace	111
20.	Ancho de banda obtenido con AirGrid® M5.	113
21.	Cuadro comparativo entre implementaciones.	137
22.	Cálculo de valores con incertidumbres del detector ubicado en el volcán Atitlán	145
23.	Máscara código binario a canal	149
24.	Muestra tabla de resultados carpeta febrero 1	153
25.	Resultado comparación resultado del VEM	153
26.	Cantidad de recursos por computador	160

27.	Cantidad total de recursos	160
28.	Denominación pines puerto E2	194
29.	Voltaje de salida vs voltaje de entrada fuente EMCO C20	204
30.	Corriente de consumo vs voltaje de entrada	205
31.	Potencia consumida por Red Pitaya sin ejecución de programas	206
32.	Potencia consumida por Red Pitaya mientras se realiza la adquisición de datos	207
33.	Consumo de energía Red Pitaya	207
34.	Potencia consumida por Raspberry Pi 2 sin ejecución de programas	208
35.	Potencia consumida por Raspberry Pi 2 mientras se realiza la adquisición de datos	209
36.	Consumo de energía del sistema trasladado	212
37.	Diferencia de consumos de energía sistema trasladado y sistema Red Pitaya .	212
38.	Composición de centelleadores comunes [110]	215
39.	Reactivos y equipo utilizado en cada parte del procedimiento, primera parte. .	222
40.	Reactivos y equipo utilizado en cada parte del procedimiento, segunda parte. .	223
41.	Variables definidas para la síntesis de hojas de óxido de nano-grafeno	224
42.	Variables definidas para la oxidación de p-xileno a ácido tereftálico.	224
43.	Variables definidas para la síntesis del cloruro de tereftaloilo	225
44.	Variables definidas para la síntesis del POPOP	225
45.	Variables definidas para la producción del centelleador por método de extru- sión, primera parte.	225
46.	Variables definidas para la producción del centelleador por método de extru- sión, segunda parte.	226

El Proyecto LAGO (Latin American Giant Observatory) es una iniciativa latinoamericana que pretende establecer una red de detectores de radiación Vavilov-Chérenkov a lo largo del continente americano. Esto se realiza con el fin de detectar eventos cósmicos a diferentes latitudes para luego utilizar los datos con fines académicos. El presente compendio muestra el trabajo realizado en la segunda fase del Megaproyecto LAGO UVG, cuyo objetivo principal era el traslado del detector construido en la primera fase hacia las faldas del volcán Atitlán, además de la construcción de un segundo tanque con tecnología más avanzada y el análisis de datos de ambos detectores. El resultado principal del proyecto es el detector funcional ubicado en las faldas del volcán Atitlán, alimentado a través de un sistema de paneles solares y que permite su acceso remoto y envío de datos a través de un enlace punto a punto desde el sitio en el volcán hasta UVG Campus Sur, para luego recuperar los datos en el Campus Central y realizar su limpieza y posterior análisis. También se implementó el nuevo sistema de adquisición de datos y se realizaron pruebas con el nuevo tubo fotomultiplicador para la construcción del segundo detector.

El Proyecto LAGO es una iniciativa latinoamericana que pretende establecer una red de detectores de radiación Vavílov-Cherenkov a lo largo de toda la región. Está conformado por estudiantes e investigadores de diferentes universidades e institutos de investigación dedicados a la astrofísica de partículas. Los detectores de radiación se encuentran en sitios en Argentina, México, Colombia, Bolivia y Guatemala, entre otros. Juntos forman el observatorio de eventos cósmicos más grande del mundo [1].

La radiación Cherenkov es un fenómeno por el cual las partículas fundamentales atraviesan un medio en el cual su velocidad es mayor a la velocidad de la luz en ese mismo medio, provocando destellos de luz azul en forma de fotones. Para detectarlos se utilizan instrumentos de alta sensibilidad y equipo electrónico de alta velocidad destinado al procesamiento de datos. La cantidad de datos generada es abrumadora, por lo que su análisis es un problema típico de lo que se conoce como *big data*. Además, a mayor altura sobre el nivel, las partículas detectadas tienen mayores características energéticas por lo que sitios elevados son el destino ideal para los detectores. Esto lleva a la necesidad de establecer un detector que sea completamente autónomo, capaz de iniciar la adquisición de datos de forma automática y que permita enviarla de forma remota, evitando tener que llegar al sitio para extraerla.

Los datos recolectados se utilizan para un sinnúmero de estudios. Su principal enfoque está en el monitoreo de la actividad solar, puesto que es el sol la principal fuente de radiación cósmica de la tierra. Los detectores también funcionan como equipo de *muongrafía* [2], que es una técnica con la cual se detectan *muones* (un tipo de partícula fundamental) para obtener imágenes de estructuras o cavidades que de otra forma no se podrían alcanzar. En estudios más recientes, se ha investigado el uso de detectores de radiación para analizar el flujo de muones y correlacionarlo con la actividad sísmica de una región, convirtiéndolos en posibles precursores sísmicos. En general, la astrofísica de partículas es un tema de interés actualmente, y estos detectores son ideales para su estudio experimental.

El Megaproyecto LAGO UVG se encuentra actualmente en su segunda fase. La primera fase consistió en “diseñar y construir un detector de radiación Cherenkov de agua para tomar y procesar datos, en la identificación de partículas secundarias provenientes de cascadas extensas de rayos cósmicos que inciden en el detector” [3]. Los resultados obtenidos de la primera fase son un detector de radiación Cherenkov funcional a través de un tubo fotomultiplicador (PMT) Photonis y la tarjeta de desarrollo Nexys 2, que cuenta con el *firmware* de LAGO para la adquisición de datos, mediante la suite de adquisición ACQUA, instalada en una computadora con sistema operativo basado en Linux. El tanque se encuentra en en Campus Central de la Universidad del Valle de Guatemala.

En otros países latinoamericanos ya se tienen instalados detectores de radiación Cherenkov del Proyecto LAGO completamente funcionales. En algunos sitios se tomó la decisión de utilizar otras tarjetas de desarrollo para la adquisición de datos, puesto que no se cuenta con el equipo de hardware propuesto por la iniciativa LAGO por temas económicos o de implementación. Actualmente se está trabajando en la migración a la tarjeta de desarrollo Red Pitaya como parte del estándar del Proyecto.

Las cascadas que son detectadas por los detectores del Proyecto LAGO obtienen una variedad de datos provenientes de distintas partículas cósmicas. Sin embargo, a mayor altitud sobre el nivel del mar, las partículas aún no han decaído en otras más sencillas, por lo que se pueden hacer estudios con mayor alcance utilizando estos datos obtenidos [4]. Por tal motivo, colocar el detector a una mayor altura que la actual conlleva un beneficio en cuanto al desarrollo científico se refiere; además de esto, Guatemala es un destino ideal puesto que tiene puntos con alturas sobre el nivel del mar de más 4000 m, como lo son el volcán Tajumulco y el volcán Tacaná. Esta es la principal motivación para mudar el tanque en actual funcionamiento a las faldas del volcán Atitlán, con el fin de tener un primer acercamiento en un área asegurada -la reserva de la Universidad del Valle de Guatemala-, para que en un futuro se lleve a los destinos antes mencionados. Para lograr esto, es necesario no solo el funcionamiento del tanque como tal, sino tener la potencia eléctrica en el área, transmitir datos hacia el Campus Central de la Universidad del Valle de Guatemala, y controlar el tanque de forma remota, además del monitoreo en tiempo real del estado actual de este.

Por otro lado, existe la necesidad de obtener una resolución más alta en la detección de datos del tanque -de al menos el doble de la actual-, ya que esto permite discernir entre lo que es ruido (detección de un electrón) y lo que es un pulso (detección de un muon) con mayor precisión de lo que se tiene con la tarjeta de desarrollo Nexys 2. Por esto es necesario construir un nuevo detector con tecnología con mayor frecuencia de muestreo, obtenida con la tarjeta de desarrollo Red Pitaya, la cual utiliza un nuevo tubo fotomultiplicador.

4.1. Objetivos generales del megaproyecto

- Trasladar, calibrar y caracterizar el detector de radiación Cherenkov situado actualmente en la Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central, hacia las faldas del volcán Atitlán para medir cascadas extensas de rayos cósmicos.
- Construir un segundo detector de radiación Cherenkov con tecnología más avanzada que permita realizar una obtención de datos con mejor resolución que el detector actual.
- Analizar los datos obtenidos con los detectores para explorar el potencial de los mismos para el estudio de la actividad sísmica local y decrecimiento *forbush*, así como precursores sísmicos.

4.2. Objetivos específicos por módulo

4.2.1. Módulo de calibración, análisis e interpretación de datos

- Investigar y adaptar el proceso de calibración de un detector Cherenkov de agua por el método del VEM.
- Diseñar y hacer pruebas de filtraciones de luz dentro del detector de radiación Cherenkov en agua.
- Proponer un diseño experimental para caracterizar un tubo fotomultiplicador a la respuesta de un solo fotoelectrón.
- Recolectar literatura acerca del monitoreo solar y sísmico mediante el uso de rayos cósmicos.

4.2.2. Módulo de fabricación de planchas centelleadoras de PVT

- Sintetizar y purificar el POPOP a partir de la síntesis de una amida, seguido de una ciclación.
- Insertar los agentes dopantes, p-terfenil y POPOP, en pellets de polivinil tolueno
- Dar al centelleador las dimensiones deseadas (30x30x5 cm) y pulir su superficie.

4.2.3. Módulo de potencia

- Dimensionar e implementar un sistema fotovoltaico aislado para autonomizar la alimentación del detector de radiación en las faldas del volcán Atitlán.
- Analizar el perfil de producción y consumo de potencia a través del tiempo para proyección del funcionamiento del sistema fotovoltaico.
- Diseñar e instalar un sistema de pararrayos bajo la norma NFPA 780 para proteger la electrónica del detector.
- Instalar un sistema de grabación para envío de frames a estación remota para control y seguridad del detector Cherenkov.

4.2.4. Módulo de transmisión de datos

- Implementar un sistema de comunicación capaz de transmitir datos generados por un detector de radiación Cherenkov situado en la reserva biológica “Refugio Del Quetzal” hacia la Universidad del Valle de Guatemala (Campus Sur) para luego ser re-transmitidos a la Universidad del Valle de Guatemala (Campus Central).
- Establecer un enlace de comunicación inalámbrico, “punto a punto” entre la reserva biológica “Refugio Del Quetzal” y la Universidad del Valle de Guatemala (Campus Sur), que servirá como punto de enlace a la Universidad del Valle de Guatemala (Campus Central) donde se recibirán los datos generados por el detector de radiación Cherenkov.
- Configurar los equipos inalámbricos utilizados en el enlace para llevar a cabo la obtención de datos de forma eficiente.
- Analizar y evaluar el desempeño de los equipos inalámbricos a utilizar realizando pruebas en varios puntos de la ciudad de GuVatemala.

4.2.5. Módulo de control central

- Implementar el sistema completo de adquisición de datos de la iniciativa LAGO en la microcomputadora Raspberry Pi junto con la tarjeta de desarrollo Nexys 2.
- Diseñar e implementar el módulo de control del tanque a trasladar al volcán Atitlán, el cual permitirá establecer los parámetros de detección de este, e iniciar y desactivar la actividad del detector de forma remota.

- Implementar toda la instrumentación electrónica necesaria para la lectura de datos del detector actual -presión, temperatura, geolocalización-, y para el monitoreo del estado del detector -temperatura, humedad-.
- Diseñar un método experimental para caracterizar el nuevo tubo fotomultiplicador (PMT) a través de la prueba de fotoelectrones [5].

4.2.6. Módulo de actualización de tecnología

- Migrar la tecnología actual de LAGO de Nexys 2 hacia Red Pitaya e implementarla en el nuevo detector a construir.
- Mejorar la resolución de los datos del detector de radiación Chérenkov.
- Implementar los sensores directamente en la placa Red Pitaya para la medición de presión atmosférica y temperatura del ambiente.
- Diseñar e implementar las rutinas necesarias para el manejo del PMT.

4.2.7. Módulo de análisis en *Big Data*

- Analizar los datos obtenidos con el detector de radiación Cherenkov utilizando algoritmos tradicionales y algoritmos funcionalmente distribuidos.
- Comparar el rendimiento de algoritmos tradicionales y distribuidos para el análisis de los datos producidos por el sensor.
- Implementar un tablero analítico de acceso web para poder calibrar y analizar cada uno de los indicadores de cada lote de datos.

4.2.8. Módulo de infraestructura de datos

- Diseñar una arquitectura tipo cluster que reciba datos de una implementación del proyecto LAGO en base a un software de libre distribución como Apache Hadoop de Hortonworks.
- Implementar la arquitectura basada en equipos ya existentes de la Universidad del Valle de Guatemala.
- Ingesta y limpieza de datos provenientes del tanque ubicado en la Universidad del Valle de Guatemala y del tanque ubicado en la Reserva Quetzal al cluster.
- Diseño e implementación de modelo de datos.

4.2.9. Módulo de gestión de proyecto

- Facilitar la continuidad del programa LAGO en Guatemala elaborando el diario de lecciones aprendidas y la documentación según los criterios del PMI.

- Garantizar la calidad en la implementación de una Red Pitaya en un detector Cherenkov, por medio del diagrama de Ishikawa, un cuadro de verificación de inspección y un diagrama flujo de funcionamiento.

En este capítulo se presenta una descripción corta acerca de los fenómenos involucrados en la física de rayos cósmicos. Se describe brevemente el Modelo Estándar de las partículas elementales, las características de los distintos tipos de astropartículas y los fenómenos radiativos que ocurren en los chubascos o lluvias atmosféricas extendidos.

5.1. Modelo estándar

El modelo estándar (ME) de partículas elementales resume todo lo que se sabe de las fuerzas electromagnéticas, nuclear débil y fuerte, pero aún no la gravitacional. El ME es una teoría cuántica de campos relativistas, este incorpora la mecánica cuántica con la relatividad especial. Este modelo es una teoría Gauge y presenta las fuerzas como interacciones entre partículas llamadas bosones, para la fuerza electromagnética son fotones, los bosones W y Z son mediadores de las interacciones débiles y el gluón que es el mediador de las interacciones nucleares fuertes, estos bosones Gauge conforman una familia de partículas elementales, pero no es la única, en el ME también existen los leptones y quarks. Los leptones únicamente se encuentran en las interacciones electromagnéticas y las interacciones débiles, mientras que en las interacciones fuertes también participan los quarks. Existen seis sabores (tipos) de quarks los cuales son: up, down, strange, charm, bottom y top y también existen seis leptones, el electrón, muon, tauón con sus neutrinos correspondientes [6]. En pocas palabras el modelo estándar es un paradigma teórico, el cual es el más aceptado por la comunidad científica, este describe todas las partículas y sus interacciones [7].

5.2. Efecto fotoeléctrico

En 1905 Albert Einstein produjo tres grandes artículos, uno de ellos merecedor de un premio Nobel, en dicho artículo Einstein describía su descubrimiento acerca del efecto fotoeléctrico. Este es un fenómeno nacido a partir de la incongruencia entre la teoría ondulatoria de la luz y la de los cuantos de luz de Max Planck. El efecto fotoeléctrico consiste en que al iluminar una superficie metálica con luz visible, esta libera partículas cargadas siempre y cuando la frecuencia de la radiación incidente es mayor a cierto valor umbral [8].

Al ver esto junto con la hipótesis de la cuantización de Planck, Einstein dio un paso más diciendo que la energía de un rayo de luz se extiende desde una fuente puntual y no se distribuye continuamente en el espacio si no que consiste en un número finito de cuantos de energía que están localizados en puntos del espacio, y no se dividen, únicamente pueden ser absorbidos o emitidos en su totalidad. Einstein también propuso que la luz además de considerarse como un fenómeno ondulatorio también debe considerarse como un fenómeno corpuscular, es decir, considerarse como partícula. También se llamó al fotón como el cuanto, de luz, con una energía que respeta la siguiente ecuación [9]:

$$E = h\nu \tag{1}$$

donde h es la constante de Planck y ν es la frecuencia, Einstein sugirió que al iluminar un material el fotón da su energía a un solo electrón de dicho material. Si la energía de este fotón supera un valor de energía propio del material, el electrón se desprende y sale disparado con una energía cinética K , este electrón recibe el nombre de fotoelectrón y respeta la siguiente ecuación [9]:

$$E = \phi + K \tag{2}$$

donde K es la energía cinética y ϕ es la energía que se le debe de dar al electrón para separarse del material.

5.3. Procesos radiativos

5.3.1. Dispersión de rayos X y efecto Compton

Los Rayos X fueron descubiertos en 1895 por Wilhelm Roentgen. Él encontró que si se dispara un haz de electrones a gran velocidad a un blanco metálico produce un nuevo tipo de radiación extremadamente penetrante, a esta radiación se le llamó rayos X (ver la Figura 1). Posteriormente Compton estudio esta dispersión e hizo un avance en esta línea de investigación al no trabajar únicamente con dispersión de rayos X [8]. También se puede calcular la longitud de onda mínima y esta depende únicamente del voltaje del tubo, ver la siguiente ecuación 3:

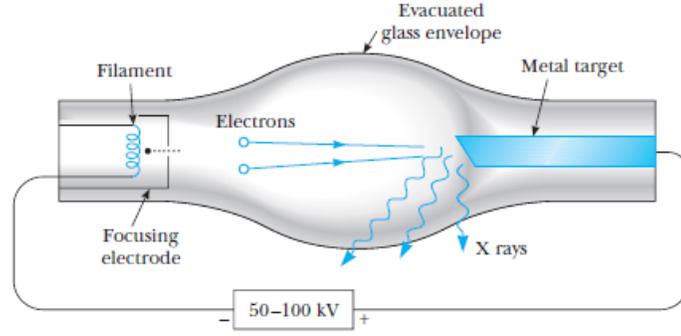


Figura 1: Diseño experimental para la producción de Rayos X. Extraído de [8].

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eV} \quad (3)$$

En 1923 Compton propuso que el fotón se dispersa por solo un electrón en lugar de todos los electrones en el material, es decir que el fotón le da energía suficiente al electrón para salir disparado del átomo. Compton además propuso que las leyes de la conservación de la energía y del impulso se aplican como en cualquier colisión elástica entre dos partículas, se tiene que tomar en cuenta que el momento de una partícula que viaja a la velocidad de la luz (fotón) está dada por [9]:

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (4)$$

Se trata al fotón como una partícula de energía y momento definido, la dispersión toma lugar en el plano xy como se aprecia en la Figura 2, las componentes del momento se conservan con lo cual se puede deducir la expresión para la longitud de onda del fotón dispersado. La ecuación para dicha longitud de onda es [9]:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta) \quad (5)$$

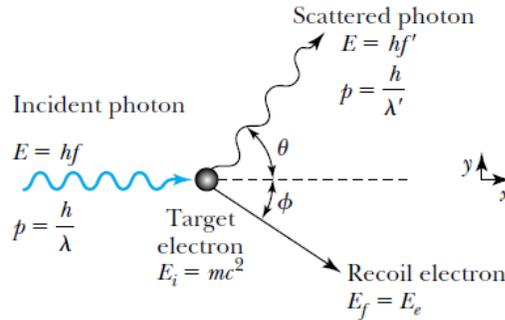


Figura 2: Diagrama de la dispersión de Compton Extraído de [9]

Cuando un fotón es producido por la desaceleración de un electrón el proceso recibe el nombre de Bremsstrahlung, o radiación de frenado. Normalmente pasa cuando un electrón pasa cerca de un núcleo atómico el campo magnético desvía al electrón y emite la radiación de frenado se puede apreciar en las Figura 3 [9].

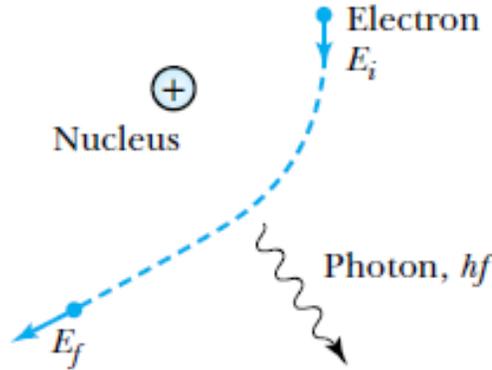


Figura 3: Diagrama de un electrón pasando cerca de un núcleo atómico y produciendo Bremsstrahlung, extraído de [8].

En algunos casos el electrón incidente con cierta energía puede ser frenado totalmente por una sola colisión radiactiva, por lo tanto toda su energía será emitida en forma de un solo fotón. Este tipo de colisiones es poco frecuente y da lugar a la parte más energéticas del espectro [10]. La producción del electrón por Bremsstrahlung es caracterizado por una carga con un momento \mathbf{p} con una emisión de radiación electromagnética y se describe por la siguiente ecuación [9]:

$$A + e^-(p_0) \rightarrow A + e^-(p_1) + \hbar\omega \quad (6)$$

La energía máxima del electrón producido por el Bremsstrahlung es:

$$E_{max} = \frac{hc}{E_e} \quad (7)$$

5.3.2. Aniquilación y producción de pares

Si de un fotón se puede crear a un electrón, en la interacción correspondiente también debería crearse una partícula con carga positiva para conservar la carga total. La predicción teórica de la existencia de dicha partícula la hizo Paul Dirac. En 1932 C. D. Anderson observó una posible carga positiva relacionada con dicha partícula, proveniente de los rayos cósmicos, a esta partícula se le llamó positrón. Esta es prácticamente igual que el electrón pero con carga positivo. Experimentos han demostrado que un fotón puede convertirse en un electrón y un positrón en un proceso que se llama producción de pares que respeta la siguiente expresión [9].

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^- \quad (8)$$

Ahora bien, si se considera la producción de pares adentro de un átomo donde el campo eléctrico del núcleo es grande, y de acuerdo con la conservación de la energía, tenemos que la energía del fotón se convierte en la masa en reposo del electrón y el positrón, y la energía cinética de estos. Entonces se observa la siguiente relación: [9]:

$$h\nu > 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV} \quad (9)$$

Cuando un electrón y un positrón se acercan en un tiempo muy corto, ambas partículas se aniquilan y producen un fotón. Esto puede ocurrir si un positrón atraviesa muy rápido algún material e interactúa con los electrones del átomo. La probabilidad de la colisión entre el positrón y el electrón aumenta por la atracción eléctrica. El electrón y el positrón al atraerse, forman una configuración similar a la del átomo, llamada positronio, en la cual el positrón y el electrón orbitan el centro de masa del sistema, como se puede apreciar en la Figura 4 [9].

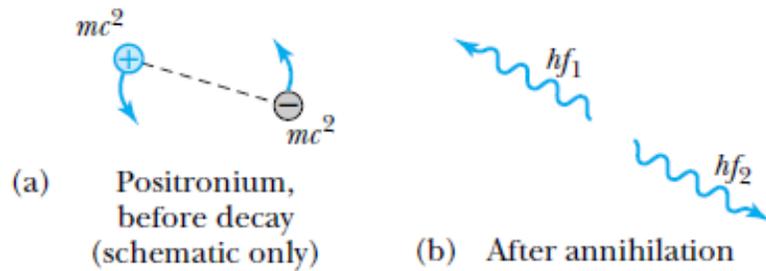


Figura 4: a) Diagrama esquemático del positronio, b) Lo que sucede después de la aniquilación, Extraída de [9].

El proceso donde ambas partículas se aniquilan se llama aniquilación de pares, que respetan la siguiente reacción [9].

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma \quad (10)$$

Si se considera la ecuación de conservación de la energía tenemos que:

$$h\nu_1 + h\nu_2 \simeq 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV} \quad (11)$$

5.3.3. Decaimiento β e interacciones débiles

El decaimiento nuclear β es una de las muchas facetas de la fuerza nuclear débil. Además de las interacciones nucleares, una variedad de fenómenos que involucran hadrones y leptones

comparten el mismo origen. La reacción básica que envuelve las interacciones débiles en el núcleo puede caracterizarse por el decaimiento de un neutrón y un protón.[11].

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e \quad (12)$$

$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu_e \quad (13)$$

Las siguientes transiciones son ejemplos de otros decaimientos, estas interacciones se pueden encontrar en los rayos cósmicos que se mencionarán más adelante.

$$\pi^{+} \rightarrow \begin{cases} \mu^{+} + \nu_{\mu} \\ e^{+} + \nu_e \end{cases} \quad (14)$$

$$\pi^{-} \rightarrow \begin{cases} \mu^{-} + \bar{\nu}_{\mu} \\ e^{-} + \bar{\nu}_e \end{cases} \quad (15)$$

$$\Sigma^{-} \rightarrow n + \pi^{-} \quad (16)$$

$$\kappa^{+} \rightarrow \begin{cases} \pi^{+} + \pi^0 \\ \pi^{+} + \pi^{-} + \pi^{+} \end{cases} \quad (17)$$

En un nivel fundamental, el decaimiento β es el de un neutrón. La siguiente ecuación se escribe en términos de quarks [11].

$$(udd) \Rightarrow (ud) + e^{-} + \bar{\nu}_e \quad (18)$$

De forma similar el decaimiento β para un protón en una producción de positrones, se transforma en un quark-up se cambia por un quark-down de la siguiente manera [11].

$$u \rightarrow d + e^{+} + \nu_e \quad (19)$$

Las distintas reacciones nucleares mencionadas anteriormente se pueden observar gráficamente en la Figura 5.

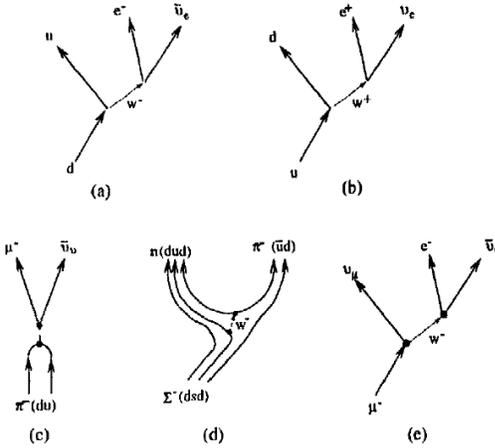


Figura 5: a) y b) decaimientos β expuestos anteriormente, c) y d) decaimientos de hadrones, normalmente se encuentran en rayos c3smicos y e) decaimiento de un mu3n,[11].

El decaimiento nuclear beta es un proceso en el cual un n3cleo que est3 hecho de Z protones y N neutrones decae en un n3cleo con el mismo n3mero de nucleones A pero con $(Z \pm 1, N \mp 1)$ en el decaimiento β^- se tiene que [11].

$$A(Z, N) \rightarrow A(z + 1, N - 1) + e^- + \bar{\nu}_e \quad (20)$$

Ahora bien, la transformaci3n de un neutr3n nuclear en un proton3, el decaimiento β^+ se expresa en la siguiente ecuaci3n [11].

$$A(Z, N) \rightarrow A(z - 1, N + 1) + e^+ + \nu_e \quad (21)$$

5.4. Rayos c3smicos

Antes de la aparici3n de los grandes aceleradores de part3culas, la 3nica fuente de part3culas de alta energ3a eran los rayos c3smicos [12]. Cada segundo la tierra est3 siendo bombardeada por miles de part3culas de altas energ3as que golpean las capas superiores de la atm3sfera. Estas part3culas son los rayos c3smicos, el origen de los m3s energ3ticos es desconocido. Su investigaci3n comenz3 a inicios del siglo pasado. Los primeros indicios de su existencia se dieron en 1912 cuando Victor Hess y Werner Kolh3rster descubrieron que la radiaci3n ionizante aumentaba su intensidad con la altura, dicho aumento se produc3a a partir de 1500m s.n.m, llegando a ser 16 veces mayor a unos 5000m s.n.m. Esto indicaba que el flujo de esta radiaci3n era provocado por algo en el espacio exterior [13]. Posteriormente la tecnolog3a fue evolucionando y los instrumentos para la detecci3n de part3culas fueron mejorando hasta llegar el d3a de hoy. En la Figura 6 se pueden ver fotograf3as sobre V3ctor Hess iniciando el ascenso en el globo. Del lado derecho se muestra un esquema del aparato que us3 en sus mediciones, un electroscopio.

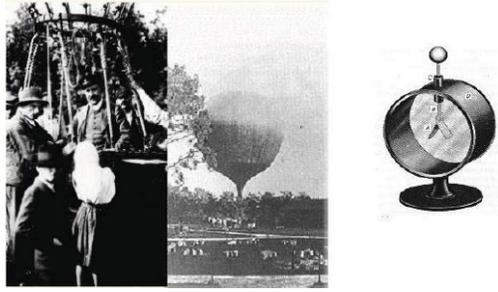


Figura 6: Victor Hess iniciando su acenso a 5000m, del lado derecho se muestra un electroscopio, instrumento que usó Hess en sus mediciones en las alturas. Extraído de [13].

Se les llama rayos cósmicos (RC) a las partículas que provienen del espacio exterior, excepto a los fotones y neutrinos. Los RC son en su mayoría núcleos atómicos que se originan fuera del sistema solar y llegan a la Tierra, al llegar a la atmósfera, el RC, como partícula primaria interacciona con las moléculas de esta y se produce una lluvia de partículas secundarias [12]. Los RC primarios tienen un rango de energía desde 10^5 eV hasta 10^{20} eV. El origen de los más energéticos aún es un problema abierto. Los modelos de aceleración proponen que estas partículas alcanzan altas energías por efecto de aceleradores naturales en el universo [14].

5.4.1. Espectro de RC

Se define como espectro de rayos cósmicos al flujo de partículas como función de su energía. En el rango de las energías más bajas $E_p < 10^{10}$ eV, el espectro de energía está completamente dominado por el viento solar, y los campos magnéticos en la heliosfera y en la magnetósfera. A energías más altas es un hecho que el espectro diferencial de energía puede ser correlacionado con una ley de potencia de la siguiente forma [12];

$$\left(\frac{dN}{dE_p} \right) \propto E_p^\alpha \quad (22)$$

Donde α es el índice espectral, y es aproximadamente igual a -3, o bien el flujo cae 3 órdenes de magnitud por cada década de energía del RC primario. En el espectro se puede observar tres regiones en las que se produce un cambio en el valor del índice espectral. A estas regiones, en orden creciente, se las denomina: rodilla, tobillo y corte respectivamente esto se puede apreciar en la Figura 7 [12].

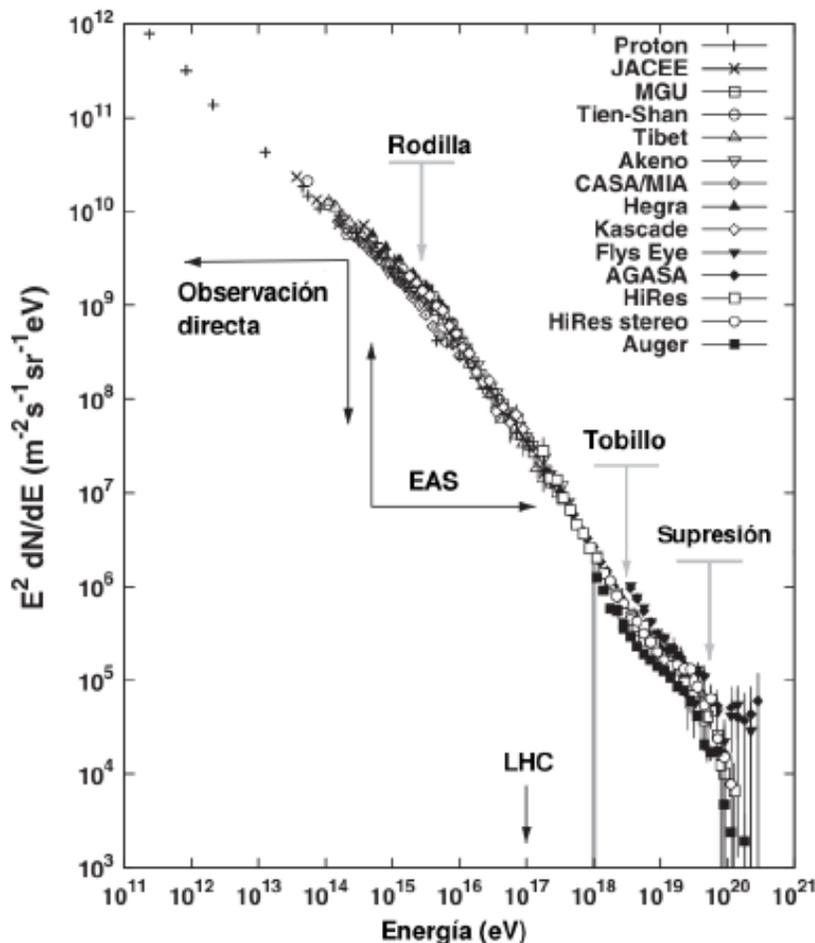


Figura 7: Gráfico de espectro de energía donde se puede apreciar la rodilla, tobillo y corte Extraído de [12]

Actualmente se discute la existencia de una segunda rodilla debido a que varios observatorios han percibido otro cambio de α . Cada característica observada tiene diversas explicaciones físicas relacionadas a mecanismos de aceleración o con la composición química de los rayos cósmicos o bien con interacciones durante la propagación en el medio intergaláctico. La mayoría relaciona la rodilla con un cambio de composición química hacia elementos más pesados [12]. Mientras que el tobillo está relacionado con un cambio de componente galáctica a extragaláctica. El corte al final del espectro, está relacionado con el efecto GZK, que describe la producción de fotopiones debido a la interacción de los RC con los fotones del fondo de microondas (CMB), lo que provoca que los RC pierdan energía drásticamente. Otra teoría al respecto es que los aceleradores extragalácticos dejen de acelerar a tales energías [15].

Una lluvia atmosférica extendida (EAS, por sus siglas en inglés) es la cascada de partículas originada por la interacción de un RC primario con un núcleo constituyente de la atmósfera (ver Figura 8). Al llegar a la superficie terrestre, alcanzan un área de varios cientos de metros cuadrados dependiendo de su energía.

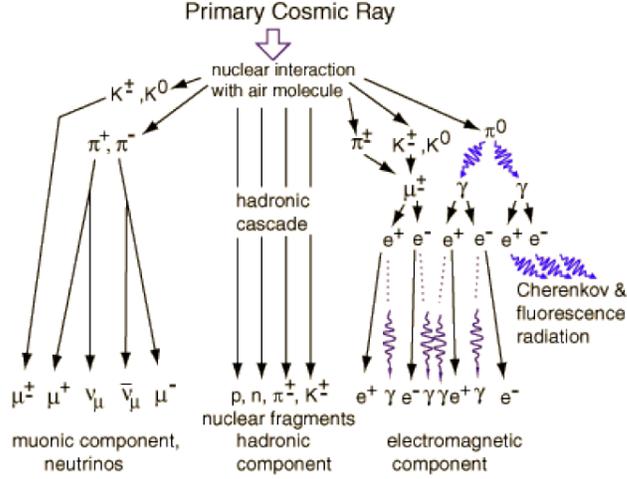


Figura 8: Diagrama de una lluvia extensa clasificada por componentes, extraído de [16]

El factor importante en interacciones con un medio es la cantidad de materia atravesada por lo que la densidad del medio determina la forma de la cascada [12]. La densidad tiene una influencia sobre el flujo de partículas. Esta correlación inversa entre presión atmosférica y flujo debe ser corregida, para ellos se define la profundidad atmosférica $X(l)$ como la masa de aire por unidad de área que atraviesa la partícula desde el infinito hasta la posición l [14].

$$X(l) = \int_1^\infty \rho(l) dl \quad (23)$$

Donde $\rho(l)$ está dada por la ecuación barométrica para la densidad atmosférica con la temperatura $T(h)$.

$$\rho(h) = \rho(h_0) \left(\frac{T(h_0)}{T(h)} \right) \exp \left(- \int_{h_0}^h \frac{Mg(h)}{RT(h)} \right) \quad (24)$$

Donde R es la constante universal de los gases, M la masa molar del aire y $g(h)$ la aceleración debido a la gravedad a una altura h . Por construcción, el valor $X(0)$ se puede obtener de forma directa de la presión atmosférica a nivel del mar con $P_0/g_0 = 1033g/cm^2$ [14]

Estas lluvias son iniciadas por un RC primario, si una lluvia es iniciada por fotones de ultra alta energía, $E_p > 3 \cdot 10^{19} eV$, pueden interactuar en presencia del campo geomagnético produciendo pares y Bremsstrahlung, a unos miles de kilómetros de altura por sobre la superficie terrestre. Como resultado de esa interacción se forma una lluvia con pocos electrones y alrededor de 100 fotones que interactúan con la atmósfera. La evolución de una lluvia iniciada por un fotón o algún electrón o bien positrón, está regida por procesos electromagnéticos. Para cada cascada con estas características existen dos canales de interacción el Bremsstrahlung y la creación de pares, procesos descritos anteriormente. Ambos procesos están acoplados y que existen fotones con suficiente energía como para producir

pares, que a su vez experimentan Bremsstrahlung. Este acoplamiento es la razón principal de la formación de la cascada EM (ver Figura 8) [12].

También existen lluvias iniciadas por un hadrón, las primeras interacciones dan origen a piones cargados y neutros los cuales, en los altos niveles de la atmósfera, tienen una mayor probabilidad de decaer que de interactuar con los escasos átomos presentes. Los piones neutros alimentan la componente EM al producir fotones muy energéticos según las siguientes reacciones [12]:

$$\pi^0 \rightarrow \begin{cases} \gamma + \gamma \\ \gamma + e^+ + e^- \end{cases} \quad (25)$$

Por otro lado, los piones cargados decaen en muones energéticos que dan origen a la componente muónica de la lluvia, la cual es mucho mayor en estas lluvias respecto a las iniciadas por partículas EM, estas reacciones se escribieron anteriormente. Mesones extraños, principalmente kaones, son también fuentes de muones luego de su decaimiento de la siguiente manera [12]

$$\kappa^+ \rightarrow \begin{cases} \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^0 + e^+ + \nu_e \end{cases} \quad (26)$$

5.5. Destellos de rayos gamma (GRBs)

Los GRBs fueron detectados por primera vez en 1967 por los satélites, aunque no fueron publicados hasta 1973. Estos satélites se diseñaron para verificar si se estaba cumpliendo el tratado de no proliferación del armamento nuclear. Los GRBs son eventos cortos que ocurren con una razón promedio de pocos días a través del universo, y que en un breve periodo de tiempo inundan completamente con su radiación casi todo el cielo de rayos gamma. La actual explicación de cómo se produce esta gran liberación de energía es correspondiente a la gran cantidad de energía gravitatoria que es liberada en corto tiempo en una pequeña región del espacio en un evento cataclísmico estelar. Parte de la energía se escapa en los primeros segundos como neutrinos térmicos, otra fracción puede ser emitida como ondas gravitacionales. Este fenómeno podría resultar una gran “bola de fuego” expandiéndose a velocidad relativista, la cual sufre una disipación interna que conduce a rayos gamma (ver Figura 9), que posteriormente se convierten en una onda de choque que desacelera contra el medio externo, produciendo un afterglow que se debilita progresivamente (ver la Figura 9) [13].

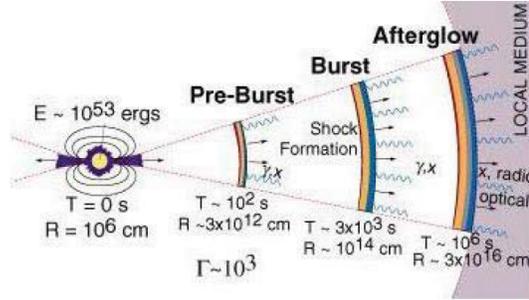


Figura 9: Diagrama de un GRB y su comportamiento a lo largo de su recorrido, extraído de [13].

5.6. Neutrinos

El neutrino representado por la letra griega ν fue postulado por Fermi en el año de 1930, para explicar la aparente no conservación de la energía en el decaimiento β , esto se observó en los productos por el decaimiento de algunos núcleos inestables. Anteriormente se había observado a un núcleo padre decayendo un núcleo hijo y un electrón, esto representaría el decaimiento a dos cuerpos, en cuyo caso el electrón solo tendría un único momento. Sin embargo el electrón en realidad tiene un espectro de momenta, así que la partícula propuesta por Fermi resolvió dicho problema, al igual que la conservación del momento angular. La explicación indicaba que los neutrinos no deberían tener masa, o bien deberían tener una masa muy pequeña [17]. A estos neutrinos más adelante se le llamó neutrino electrónico denotado por ν_e . Posteriormente se estudiaron los productos de las colisiones protón-protón uno de dichos productos es el pion, que decae a su vez en un muon y un nuevo neutrino llamado neutrino muónico, denotado por ν_μ . De forma similar se encontró un tercer tipo de neutrino llamado neutrino tauónico, denotado por ν_τ [18]. En conclusión existen tres tipos de neutrinos cada uno asociado a su familia leptónica o bien se le llama sabor, por ejemplo al neutrino que resulta del decaimiento beta se dice es un neutrino electrónico ν_e por lo que su sabor es que sea electrónico[7].

En el presente capítulo se explica el fenómeno de la radiación Chérenkov, que es el fenómeno con base en el cual se han desarrollado detectores de RC como los que se usan en LAGO. De igual manera se describe el funcionamiento de un PMT.

6.1. Radiación Chérenkov

El efecto Vavilov-Chérenkov (VC) surge cuando una partícula cargada se mueve en un medio dieléctrico con una velocidad “ v ” mayor a la velocidad de la luz en el medio c_n . Donde la velocidad de la luz en el medio se define como [19]:

$$c_n = \frac{c}{n} \tag{27}$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío y n es el índice de refracción del medio [19]. A manera de comprenderlo de una mejor forma se puede estudiar su análogo mecánico, el sonido (ver Figura 10), cuando un avión viaja el sonido también viaja conforme al avión, el sonido se puede visualizar como frentes de onda esféricos, entonces normalmente un avión se encuentra dentro de los frentes de sonido, pero si este se desplaza a una velocidad mayor a la del sonido, se produce una interferencia constructiva constructiva, en esencia este fenómeno es igual al efecto Chérenkov, con la diferencia de que en lugar del frente de choque se cuenta con radiación electromagnética [20]

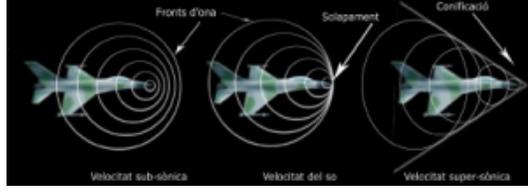


Figura 10: Avión desplazándose a menor velocidad (izquierda), igual velocidad (centro) y mayor velocidad (derecha) del sonido, Extraído de [20]

A continuación, se explicará el fenómeno de la radiación Chérenkov. Cuando se visualizan las ecuaciones de los potenciales de Liénard-Wiechert provocados por una carga (ver ecuaciones 28 y 29) [20].

$$\phi(r, t) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{R - \mathbf{R}\frac{\mathbf{v}}{c}} \right]_{ret} \quad (28)$$

$$\mathbf{A}(r, t) = \frac{\mu_0 q}{4\pi} \left[\frac{\mathbf{v}}{R - \mathbf{R}\frac{\mathbf{v}}{c}} \right]_{ret} = \left[\frac{\mathbf{v}\phi}{c} \right]_{ret} \quad (29)$$

Donde el subíndice ret indica que se tienen que evaluar por expresiones que dependen del tiempo en el instante retardado y si se aplica la regla de la cadena y derivamos tenemos que las ecuaciones para los campos eléctricos y magnéticos para una carga en movimiento, resultan en [20].

$$\frac{4\pi\epsilon_0}{q} \mathbf{E} = \frac{1}{\gamma^2 s^3} \left(\mathbf{R} - \frac{\mathbf{v}R}{c} \right) + \frac{1}{c^2 s^3} \left[\mathbf{R}X \left[\left(\mathbf{R} - \frac{\mathbf{v}R}{c} \right) X \dot{\mathbf{v}} \right] \right] \quad (30)$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mathbf{R}X\mathbf{E}}{Rc} \quad (31)$$

Visualizando las ecuaciones anteriores podemos decir que una carga uniforme en el vacío (para B), no radía, Esto se debe a que la radiación emitida estaría dada por el vector de Poynting (ver ecuación 32), correspondiente al flujo de energía por unidad de área, por unidad de tiempo, que para el vacío tendería a cero, ya que B ($\mu_0 H$) tiende a cero al hacer crecer la distancia R. Sin embargo, para un medio material, H no tiende a cero cuando R crece y S no es cero y la situación puede ser distinta [13]. De manera que una partícula cargada en movimiento, incluso uniformemente, por un medio material transparente, en ciertas condiciones, emite este tipo de radiación. La emisión de radiación Chérenkov es un fenómeno en el que intervienen gran cantidad de átomos del medio, cuyos electrones son acelerados por el campo de la partícula que lo atraviesa, y de este modo emiten radiación. La situación puede ser distinta en un medio dieléctrico [20].

$$\mathbf{S} = \mathbf{E}X\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0 c} E^2 \mathbf{n} \quad (32)$$

Una partícula cargada en movimiento, incluso uniformemente, por un medio material transparente, en ciertas condiciones, emite este tipo de radiación. La emisión de radiación Cherenkov es un fenómeno en la que intervienen gran cantidad de átomos del medio, cuyos electrones son acelerados por el campo de la partícula que lo atraviesa, y de este modo emiten radiación. Esto se debe, por lo tanto, a la radiación emitida por el medio bajo la acción del campo de la partícula que se mueve en él. Si se consideran los campos de la partícula en el medio dieléctrico se puede obtener una explicación cuantitativa del fenómeno [20] Considerando la Figura 11, tenemos un esquema de la forma de la radiación Chérenkov.

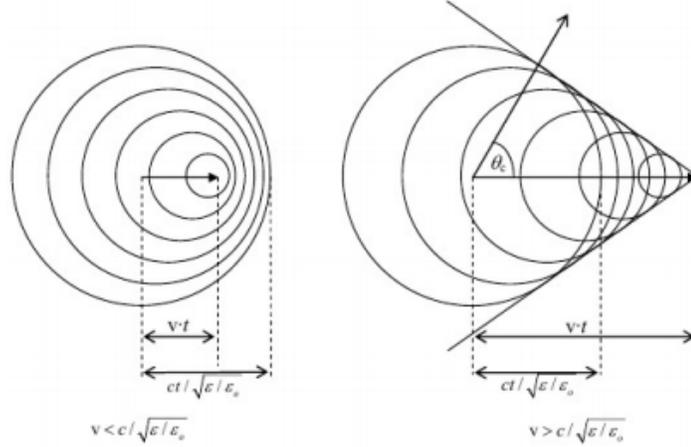


Figura 11: Esquema de la producción de radiación Cherenkov, Extraído de[20]

Se tiene un medio con índice de refracción "n", donde la velocidad de la luz en ese medio es "c/n" y v la velocidad de la partícula. Ahora bien, considere que $v > c/n$ entonces se forma el ángulo de Cherenkov que se mira en la Figura 11; por tanto, usando relaciones trigonométricas obtenemos que [20]:

$$\cos \theta_c = \frac{c}{nv} = \frac{1}{n\beta} \quad (33)$$

En muchos medios la absorción es lo suficientemente grande como para que la radiación de Chérenkov se absorba muy cerca de la trayectoria de la partícula. Se puede obtener una relación entre la frecuencia y el vector de onda de una onda electromagnética, se supondrá isótropo y no magnético entonces se tiene[20].

$$k = \frac{n\omega}{c} \quad (34)$$

La frecuencia de la componente de Fourier del campo de una partícula en movimiento según el eje X, en el medio, está relacionada con la componente-x del vector de ondas mediante $\omega = k_x v$. Como el vector de onda tiene mayor módulo que su componente x se tiene que [20]:

$$v > \frac{c}{n(\omega)} \quad (35)$$

Solo tiene lugar la radiación con una frecuencia si la partícula viaja a la velocidad de fase de las ondas de dicha frecuencia, entonces:

$$k_x = k \cos \theta_c = \frac{n\omega}{c} \cos \theta_c \quad (36)$$

A cada valor del ángulo de Cherenkov le corresponde una radiación de una frecuencia dada, es decir que la partícula emite hacia delante y está distribuida sobre la superficie de un cono de ángulo $2\theta_c$. Normalmente está el medio que se usa para estos estudios es agua ultra pura. Como la velocidad de las partículas es prácticamente la de la luz y para el agua $n=1.33$, un valor usual para el ángulo es de 41.2° . La electrodinámica clásica permite probar que la energía perdida por una partícula al atravesar un espesor L , emitiendo fotones de frecuencia ν es [20]:

$$\frac{dE}{d\nu} = z^2 \alpha \frac{\hbar\nu}{c} L \sin^2 \theta_c \quad (37)$$

Si se supone que L es muy delgado $L=dx$ con el que la expresión se puede integrar y así obtener la pérdida de energía por unidad de recorrido.

$$\frac{dE}{dx} = z^2 \alpha \frac{\hbar}{c} \int \nu \sin^2 \theta_c d\nu \quad (38)$$

6.2. Tubos fotomultiplicadores

Los tubos fotomultiplicadores (PMT) son detectores al vacío muy sensibles a la luz, en el rango visible y ultravioleta. Un PMT logra aumentar la corriente hasta 100 millones de veces, lo que le permite detectar incluso un flujo pequeño de electrones incidentes. . Consiste en una ventana de borosilicato, un fotocátodo, un electrodo para enfocar, un multiplicador de electrones y un ánodo, todo sellado en un vidrio al vacío. Su funcionamiento consiste en que fotones pasan por ventana de vidrio, al chocar con el vidrio (fotocátodo), estos lo excitan, haciendo que se desprendan fotoelectrones por el efecto fotoeléctrico, que luego siguen hacia el tubo de vacío. El electrodo acelera y dirige esta corriente hacia los dínodos a un alto voltaje (así se multiplican los electrones) [13][12]. Finalmente, el flujo total de electrones es colectado por el ánodo, el proceso se puede apreciar en la Figura 12 [21].

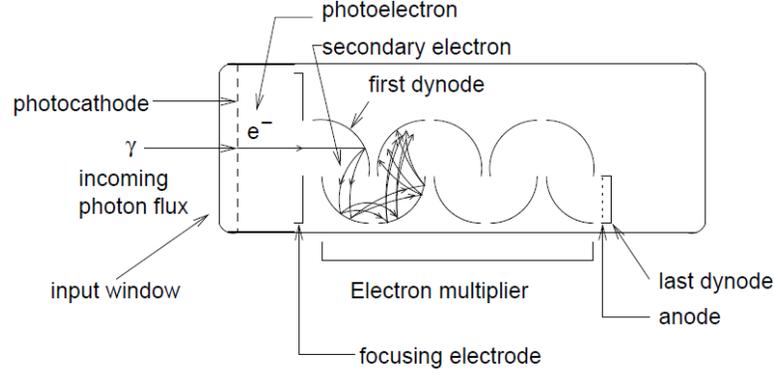


Figura 12: Proceso de detección de un fotón y partes de un tubo fotomultiplicador. Extraído de [21].

Una propiedad importante para los PMTs es su eficiencia cuántica o bien su espectro de radiación, ambos miden la eficiencia del PMT de convertir la energía de los fotones en corriente. La eficiencia cuántica mide el cociente entre la cantidad de fotoelectrones emitidos por el fotocátodo y el número de fotones incidentes. El espectro de radiación mide la corriente de los electrones producidos por el fotocátodo dividido por el flujo de radiación para alguna longitud de onda y se mide en amperes sobre watt, la relación entre la eficiencia cuántica QE_λ y el espectro de radiación R_λ es [13] [12]:

$$QE_\lambda = R_\lambda \frac{E_\lambda}{e} = \frac{R_\lambda hc}{\lambda e} \quad (39)$$

La función del fotocátodo es la de convertir fotones incidentes en electrones por efecto fotoeléctrico. Es un semiconductor que se puede describir como una estructura de banda que consiste en tres partes: i) banda de valencia, ii) brecha de energía iii) banda conductora. La energía que un fotón transfiere es únicamente para un electrón, posteriormente al atravesar toda la banda se multiplican los fotoelectrones, desde aquí se puede definir la cantidad de eficiencia cuántica de una forma más precisa [21].

$$QE_\lambda = \eta(\lambda) = \frac{N_e}{N_\gamma(\lambda)} \quad (40)$$

Donde N_γ es el número de fotones incidentes y N_e es el número de electrones emitidos.

En el multiplicador de electrones tiene lugar la amplificación de la fotocorriente, para ello se usan dínodos que están hechos de algún material que emite electrones cuando otro electrón (electrón primario) de suficiente energía, los electrones, incide en el material, emitidos por los dínodos son llamados electrones secundarios. La teoría que sustenta este fenómeno es similar al del efecto fotoeléctrico excepto que en lugar del fotón incidente es un electrón. Los dínodos están ubicados de tal manera que el campo eléctrico entre ellos. La carga del pulso de salida, es el producto de la cantidad de electrones en el pulso y la carga de dicho electrón, la multiplicación total llamada ganancia está dada por la expresión [21]:

$$G = \prod_{k=1}^N \alpha_k \delta_k \quad (41)$$

Donde G es la ganancia del PMT, δ_k es la emisión secundaria del k-ésimo dínodo α_k la eficiencia de recolección después del k-ésimo dínodo, entre el dínodo k-1 y el dínodo k [21]. En particular, el PMT que se utilizó en el presente trabajo, tiene las siguientes características: marca Hammamatsu R5912 con 10 dínodos y ganancia de $1 * 10^7$ [22].

6.2.1. Corriente oscura

Cuando el PMT no está iluminado, una diminuta corriente fluye a través del PMT, esta corriente es llamada corriente oscura y esta puede provenir de [23]:

1. Emisiones térmicas del cátodo y dínodos
2. Corrientes parásitas o fuga
3. Contaminación radioactiva.
4. Fenómenos de ionización
5. Fenómenos luminosos

Siendo el ruido térmico el componente principal. Esta contribución es descrita por la ecuación de Richarson que es la siguiente [23]:

$$I = AT^2 \exp\left(\frac{-e\phi}{kT}\right) \quad (42)$$

Donde A es constante, ϕ la función de trabajo, T la temperatura y k la contante de Boltzmann

6.2.2. Multiplicación de electrones

Cuando un solo fotón impacta en el fotocátodo sale un fotoelectón por efecto fotoeléctrico y este es enfocado y acelerado por el campo eléctrico, este golpea al primer dínodo y produce una emisión secundaria de electrones. Posteriormente estos electrones son acelerados por una diferencia de potencial existente entre los dínodos y crean una emisión secundaria en el siguiente dínodo. Finalmente una avalancha de electrones es creada en el ánodo y resulta en la señal de salida del PMT. Se debe tomar en cuenta que la emisión secundaria es gobernada por la distribución de Poisson. Además el número de secundarios n_s depende de la energía del electrón incidente de la siguiente manera [24]:

$$n_s = kE^\alpha \quad (43)$$

Donde k y α son constantes, el valor de α se encuentra entre el intervalo de 0.4 a 0.8. También la energía de los secundarios en comparación a la energía del campo eléctrico es menor [24]. La respuesta del sistema de multiplicación de dínodos para un solo fotoelectrón, en principio, es una distribución de Poisson, pero en la amplificación del primer dínodo (> 4) y se puede aproximar mediante una distribución Gaussiana de la siguiente forma [25]:

$$G_1(x) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - Q_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (44)$$

Donde x es la variable carga, Q_1 es la carga promedio en la señal de salida del PMT cuando un solo electrón es colectado por el primer dínodo, σ_1 es la desviación estándar de la distribución de cargas[25].

Para un científico es vital hacer experimentos para comprobar la teoría ya existente y para ello se deben hacer mediciones y cálculos con ellas. Cualquier proceso de medición tiene errores, esto implica que la mayoría de las mediciones son diferentes al valor real y dado que además se deben hacer cálculos con estas mediciones, estos también tienen error y se dice que el error se propaga.

7.1. Error de medición

En la mayoría de casos todas las mediciones son diferentes y es probable que ninguna de ellas sea igual a la medida real, a la diferencia entre el valor medido y el valor real se le llama error en la medición. Este error se compone de dos errores diferentes llamados: error sistemático o sesgo y error aleatorio. El error sistemático es la parte del error que es igual para cada medición, mientras que el error aleatorio es el que varía entre mediciones [26].

Dado que parte del error es aleatorio, es necesario usar estadística, cada medición es una variable aleatoria tomada de una población de valores posibles, la media μ representa esa parte de la medición que es igual para todas, por lo tanto, μ es la suma del valor real más el sesgo. La desviación estandar σ de la población representa la desviación estandar del error aleatorio, la cual es la parte de la medición que varía en cada una [26].

Para entender mejor se deben estudiar dos aspectos importantes, el primero de ellos es la exactitud, que esta determina el sesgo que es la diferencia entre μ de la medición y el valor real, mientras menos sesgo hay, la medición es más exacta. El segundo aspecto es la precisión; está determinada por la coincidencia de las mediciones, entonces mientras menos dispersas son las mediciones más precisas son. Esto se visualiza en el valor de la desviación estándar σ , mientras el valor de σ sea más cercano a 0 entonces menos dispersas son las mediciones.

Comúnmente a σ se le llama incertidumbre aleatoria o simplemente incertidumbre. Por lo tanto una medición debe ser presentada como [26]:

$$\text{valor} \pm \sigma \quad (45)$$

Una de las maneras de reducir el error es tomar varias mediciones independientes y calcular el promedio, en este caso las mediciones son una muestra aleatoria de una población y su promedio es la media de la muestra [26].

Sean X_1, X_2, \dots, X_n mediciones independientes con una media μ e incertidumbre σ entonces la media de la muestra es[26]:

$$\mu_{\bar{X}} = \mu \quad (46)$$

con incertidumbre

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (47)$$

7.2. Incertidumbre de funciones de variables independientes

Muchas veces es necesario calcular un valor que depende de varias mediciones, para ellos se necesita reformular la propagación de error[27] [26].

Sean X_1, X_2, \dots, X_n mediciones independientes cuyas incertidumbres son $\sigma_{X_1}, \sigma_{X_2}, \dots, \sigma_{X_n}$ pequeñas y si $U = U(X_1, X_2, \dots, X_n)$ entonces [27] [26]:

$$\sigma_U \approx \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial U}{\partial x_i} \right]_{x=\mu}^2 \sigma_i^2} \quad (48)$$

Se conoce como la propagación del error.

7.3. Incertidumbre de funciones de variables dependientes

Cuando se tienen dos variables que no son independientes se debe considerar la influencia de una de las variables en el error de la otra, a esta medida se le llama covarianza. Entonces la covarianza generalmente se define de la siguiente manera para dos variables[26]:

Sean X, Y variables aleatorias con medias μ_X y μ_Y , La covarianza entre X y Y es[26]:

$$\text{Cov}(X, Y) = \mu_{(X-\mu_X)(Y-\mu_Y)} \quad (49)$$

La covarianza de dos variables independientes es cero. Una forma alternativa de expresar la ecuación anterior es[26]:

$$Cov(X, Y) = \mu_{XY} - \mu_X \mu_Y \quad (50)$$

Por lo que la covarianza entre variables en una distribución continua se expresa de la siguiente manera [27]:

$$Cov(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} xyf(x, y)dx dy - \mu_X \mu_Y \quad (51)$$

Lo anterior se puede usar para analizar el error de una combinación lineal entre variables dependientes de la siguiente manera [26]:

$$\sigma_{X \pm Y}^2 = \sigma_X^2 + \sigma_Y^2 \pm 2Cov(X, Y) \quad (52)$$

Si se quiere saber el valor esperado de alguna variable o función se debe hacer lo siguiente: se considera una función $y(x)$, ahora bien se expande sobre la media de la siguiente la forma [27]:

$$y(x) \approx y(\mu) + \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} \right]_{x=\mu} (x_i - \mu_i) \quad (53)$$

*notación: el valor esperado de y se denotará como $E[y]$

El valor esperado de primer orden de $y(x)$:

$$E[y(x)] \approx y(\mu) \quad (54)$$

desde que $E[x_i - \mu_i] = 0$ el valor de y^2 es:

$$\begin{aligned} E[y^2(x)] &= y^2(\mu) + 2y(\mu) \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} \right]_{x=\mu} (x_i - \mu_i) + E \left[\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} \right]_{x=\mu} (x_i - \mu_i) \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial y}{\partial x_j} \right]_{x=\mu} (x_j - \mu_j) \right] \\ &= y^2(\mu) + \sum_{i,j=1}^n \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\partial y}{\partial x_j} \right]_{x=\mu} V_{ij} \end{aligned} \quad (55)$$

Donde $V_{ij} = Cov[a, b]$ Entonces la varianza de y es:

$$\sigma_y^2 \approx \sum_{i,j=1}^n \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\partial y}{\partial x_j} \right]_{x=\mu} V_{ij} \quad (56)$$

De forma similar, para un conjunto de funciones, la matriz de convarianza es [27]:

$$U_{kl} = Cov[y_k, y_l] \approx \sum_{i,j=1}^n \left[\frac{\partial y_k}{\partial x_i} \frac{\partial y_l}{\partial x_j} \right]_{x=\mu} V_{ij} \quad (57)$$

En notación matricial se puede reescribir de la siguiente manera:

$$U = AVA^T \quad (58)$$

donde la matriz de derivas A es:

$$A_{ij} = \left[\frac{\partial y_i}{\partial x_j} \right]_{x=\mu} \quad (59)$$

8.1. Introducción

LAGO (Latin American Giant Observatory, por sus siglas en inglés) es un proyecto internacional de países latinoamericanos. Principalmente se ocupa de investigar tres ramas de la astrofísica de partículas las cuales son: El universo en condiciones extremas, clima interplanetario y radiación atmosférica a nivel del suelo. La red de detectores LAGO consiste en tanques de agua a nivel de la tierra sobre diferentes localidades y latitudes a lo largo del continente latinoamericano, abarca desde México hasta el cono sur de América. El proyecto se ha dividido en dos estudios objetivos dependiendo de la altitud del detector. Los detectores en altitudes superiores a 4,500m s.n.m permiten detectar GRB con mayor sensibilidad y los detectores de altitud menor, son utilizados para estudios físicos del sol como el decrecimiento Forbush [14], el decrecimiento Forbush será explicado más adelante.

Los detectores de LAGO pueden utilizarse para medir el flujo de rayos cósmicos en la tierra ya que su modulación es una medición directa de la actividad solar. Los tanques ubicados en universidades también sirven formar a estudiantes en el área de física de partículas y astropartículas [14].

En Guatemala existen dos universidades afiliadas al proyecto LAGO las cuales son la Universidad San Carlos de Guatemala y La Universidad del Valle de Guatemala, la última cuenta con dos detectores de partículas y los estudios se orientan a los monitoreos solares y sísmicos. Se espera que en un futuro se expanda a estudios de estructuras arqueológicas y estudios de volcanes.

8.2. Detectores de radiación Chérenkov en agua

Los detectores Chérenkov en agua son básicamente tanques llenos de agua con uno o varios tubos fotomultiplicadores (PMT, por sus siglas en inglés) incorporados, a manera de que puedan detectar los fotones de la radiación Cherenkov producidos por muones (y otras partículas cargadas) al pasar por el agua.

Se basan en la detección de la radiación Chérenkov, la cual es producida cuando una partícula cargada que se mueve a través de un medio polarizable a una velocidad mayor que la velocidad de la luz en ese medio, a una frecuencia específica. [28] El medio debe poder ser modelado como un sistema casi neutral, en el cual la cantidad de cargas positivas y negativas sea igual, donde los momentos eléctricos y magnéticos son producidos por los átomos o moléculas del medio, y con una frecuencia natural para todo el sistema. El agua, al ser un medio polar, puede considerarse un buen medio para que ocurra la radiación [14].

Hablando del detector en sí, el mismo está conformado por un tanque cilíndrico hecho de resina de polietileno de alta densidad. Se encuentra cubierto de la parte exterior por una capa oscura de polietileno negro o un manto asfáltico, a fin de eliminar cualquier entrada de luz al interior del tanque. El interior de las paredes del tanque está recubierto con una capa de un material conocido como Tyvek, que es un material con una baja absorción de fotones lo cual lo hace un excelente material reflector [12] [14].

El Tyvek como tal tiene una buena resistencia mecánica y casi no transfiere partículas al agua, pues no se degrada al contacto con esta. Aparte, presenta una reflectividad elevada en el espectro visible y UV cercano (90% en visible, 86% a 360 nm y 78% a 320 nm, en aire), regiones en las que se encuentra la emisión de radiación Cherenkov [14]. Gracias a ello, la radiación Chérenkov es reflejada en el interior del tanque. Las direcciones aleatorias de la reflexión hacen imposible correlacionar la dirección de la radiación Chérenkov con la dirección de la partícula que la causó, sin embargo, asegura que se forme un “gas de fotones” en menos de 20 ns, maximizando así la probabilidad de que la radiación sea detectada por el PMT. De esta manera, la luz seguirá siendo reflejada hasta que sea detectada, absorbida por el agua o por el propio Tyvek [28].

En lo que al agua en el interior del tanque se refiere, se prefiere agua de la mayor calidad y pureza posible dado que la presencia de contaminantes aumenta la absorción de fotones, reduciendo así la cantidad de partículas detectadas. Por ejemplo, el agua utilizada en el detector de superficie del Observatorio Pierre Auger (detector formado por 1660 detectores Cherenkov en agua, dispuestos en un arreglo triangular cubriendo así un área de 3000 km^2) es agua ultra pura, con una resistividad superior a los $10 \text{ M}\Omega\text{cm}$ [12].

Por su parte, Núñez et al mencionan que puede utilizarse agua con una turbidez máxima de 10 NTU, con el tratamiento adecuado. Primero, el agua se dejan sedimentar los sólidos que pueda tener el agua por un máximo de tres días, para luego ser eliminados por decantación, filtración o succión de fondo. Luego, se lleva el agua a un pH entre 7.5 y 8, y se agrega algún agente floculante (como sulfato de aluminio) con agitación constante, se deja reposar y se vuelve a decantar, filtrar o utilizar succión de fondo para eliminar los flóculos formados. Finalmente, se añade un agente desinfectante (como cloro granular) a una concentración máxima de 100 ppm [29]. Este es el tratamiento utilizado para el agua del detector Kinich Ahau, en la Universidad del Valle de Guatemala [14].

La siguiente Figura presenta un detector Chérenkov en agua, utilizado por el Observatorio Pierre Auger. El mismo tiene 3.6 m de diámetro y 1.5 m de altura. Cuenta con su propio sistema de alimentación, a través de paneles solares, y tres PMT para la detección de muones. Además, se encuentra interconectado con el resto de detectores por medio de una red inalámbrica local, para el envío de la información [12].



Figura 13: Detector Cherenkov en agua del Observatorio Pierre Auger [12].

8.3. Detectores de LAGO

Los detectores de radiación Chérenkov en agua (WCD) que LAGO usa son tanques cilíndricos de materiales como resina de polietileno. Cada tanque debe estar cubierto de algún material que evite el ingreso de luz externa. La superficie del interior esta recubierta de Tyvek, que es un material altamente reflectivo que no se degrada en contacto con el agua. El tanque se llena de agua lo más pura posible. Como sensor de luz se coloca un tubo fotomultiplicador (PMT, por sus siglas en inglés), normalmente se pone en la tapa superior del tanque y el vidrio de detección se sumerge en el agua [14]. La configuración del tanque se puede apreciar en la Figura 14. En particular, las dimensiones y características del detector que se considera para el presente trabajo, son: diámetro de 0.820 ± 0.005 , altura de 1.140 ± 0.005 , capacidad (600 litros), y un PMT tipo R5912 de 20 pulgadas.

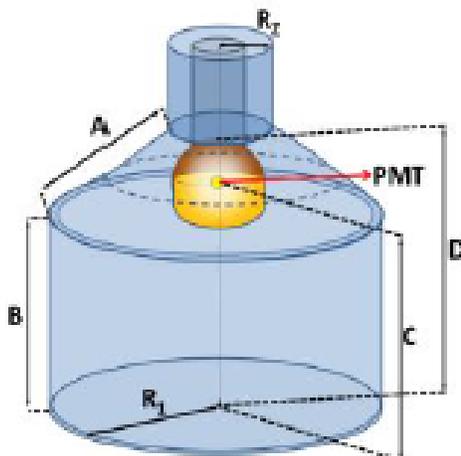


Figura 14: Imagen de la configuración de un detector de luz Cherenkov en agua (WCD), como los usados en LAGO. [14].

8.4. Electrónica de los detectores de radiación

Como se describió en el marco teórico, el resultado de la radiación Cherenkov son destellos de luz de longitudes de onda cercanas al color azul. Estos destellos se emiten en forma de fotones, por lo que es necesario un equipo especial capaz de convertir los fotones en una señal manejable por un equipo de cómputo. Para esto se utiliza lo que se conoce como tubo fotomultiplicador (o PMT por sus siglas en inglés, *photo-multiplier tube*). Los PMT utilizan el efecto fotoeléctrico para convertir fotones que inciden en un lente, en señales eléctricas [30]. Para esto, se utiliza un *fotocátodo*, que no es más que un material semiconductor que, al recibir el impacto de cualquier tipo de radiación electromagnética, desprende electrones. Los PMT están diseñados para amplificar los fotoelectrones emitidos por el fotocátodo a través de una serie de dínodos hasta llegar al último. Con esto se logra una amplificación de hasta 10×10^7 veces la corriente emitida originalmente por un solo fotón [31], convirtiendo a los PMT en instrumentos altamente sensibles. Las señales eléctricas que se leen del PMT son niveles de voltaje, pero estos guardan una relación directa con la carga de los electrones convertidos en el PMT, y dependiendo de la carga se puede determinar qué tipo de partícula emitió la radiación.

Una vez convertido el destello de luz en una señal eléctrica, a través del PMT, es necesario procesarla para que pueda ser analizada posteriormente por un equipo de cómputo. Para esto, se requiere de un convertidor analógico a digital (ADC, por sus siglas en inglés, *analog to digital converter*). Sin embargo, hay que tomar en cuenta que la señal eléctrica generada es un pulso que cumple con ciertas características de tiempo, de acuerdo con [31]. El tiempo de subida del pulso es entre 0.7 y 3 ns, mientras que el tiempo de bajada está entre 1 y 10 ns. El ancho de pulso a media altura (o FWHM por sus siglas en inglés, *Full Width at Half Maximum*), está entre 1.3 y 5 ns. Para convertir los datos de manera óptima, se necesita un ADC con una frecuencia de muestreo lo suficientemente rápida, por lo que el Proyecto

LAGO propone utilizar lo que se conoce como FPGA (*Field Programmable Gate Array* por sus siglas en inglés). Un FPGA es un arreglo de compuertas lógicas hechas con transistores MOSFET que pueden interconectarse a gusto del usuario, a través de un lenguaje descriptor de hardware (HDL por sus siglas en inglés, *hardware description language*). La gran ventaja de los FPGA es que ofrecen frecuencias de muestreo bastante rápidas -en el orden de los cientos de MHz. La iniciativa LAGO propuso en sus primeros detectores utilizar la tarjeta de desarrollo que se conoce como Nexys 2. La Nexys 2 cuenta con 500 mil compuertas programables y un reloj interno de hasta 50 MHz. Además, el *firmware* puede ser descargado a través de puerto USB-2 y ofrece una transferencia de datos de alta velocidad hacia un dispositivo de cómputo [32]. Este *firmware* está escrito en el HDL conocido como VHDL. Consiste en una serie de bloques que permiten controlar el nivel de alto voltaje, el nivel de disparo, la línea base y los periféricos [33].

Luego de convertir las señales analógicas a datos digitales, utilizando un FPGA como el que está incorporado en la Nexys 2, estos son enviados a una computadora. La iniciativa LAGO propone utilizar cualquier sistema operativo basado en Linux, y ofrece un sistema de adquisición de datos que debe ser configurado y puesto a prueba en cada sitio. Con esto, se obtienen archivos de datos en formato .dat que luego pueden ser procesados y analizados para fines académicos.

Hay que considerar que aunque los 50 MHz de la Nexys 2 son *suficientes* para procesar los pulsos provenientes del PMT, ya que se cumple con el teorema de Nyquist-Shannon, es posible mejorar la resolución de estos utilizando una FPGA que ofrezca una mayor frecuencia. La iniciativa LAGO está desarrollando un nuevo *firmware* para utilizar la tarjeta de hardware abierto Red Pitaya. Esta tarjeta de desarrollo y microcomputadora cuenta con un FPGA incorporado que ofrece una conversión analógica a digital de hasta 125 MHz. Además, tiene la gran ventaja de que cuenta con un procesador ARM con el que se puede correr un sistema operativo, basado en Linux, por lo que no es necesario un sistema de cómputo adicional para el manejo de datos [34]. Con la frecuencia de 125 MHz de la Red Pitaya, los pulsos provenientes del PMT tendrán mayor resolución puesto que habrán más del doble de muestras para cada uno, lo que permitirá tener mejor distinción entre un pulso válido de una partícula de interés -como los muones-, contra un pulso que se considera solo ruido -los electrones-.

Adicionalmente, es necesario incluir equipo de instrumentación electrónica en los detectores de radiación Vavílov-Cherenkov, pues las cascadas de partículas se ven afectadas por condiciones atmosféricas y por la ubicación geográfica del sitio en cuestión. La iniciativa LAGO solicita para sus sitios implementar sensores de presión atmosférica y humedad relativa, que funcionen en tiempo real [1]. Además, solicitan tener un dispositivo de geolocalización para conocer la ubicación exacta del sitio donde está colocado el detector. Es importante que estos datos estén dentro de los archivos de datos .dat, puesto que facilitan el análisis y correlaciones posteriores.

9.1. Introducción

Un (PMT) como ya se explicó es un detector muy sensible de luz que funciona por el efecto fotoeléctrico, es capaz de detectar un solo fotón por lo que si se activa en un ambiente iluminado este se satura y se arruina. Las cámaras fotográficas funcionan de forma similar a un PMT, incluso hay cámaras muy sensibles a la luz a las cuales se les puede modificar la apertura del sensor y el tiempo de exposición y la sensibilidad ISO (International Standards Organization).

Debido a dicha sensibilidad del PMT a la luz, se diseñaron dos pruebas para determinar si este está lo suficientemente aislado de luz exterior dentro del tanque, para asegurar su correcto funcionamiento. En la primera prueba se utilizó una cámara Canon T6, un trípode, un lente marca Canon de 18-55 mm, una correa para cámara, sticker de fibra de carbono, tape de color rojo y un smartphone con la aplicación oficial de Canon. La segunda prueba se hizo con el objetivo de hacer más accesible económicamente la primera prueba (es decir, sin necesidad de usar una cámara) con el uso de un arduino leonardo, un protobord, resistencias, fototransistores, stiker de fibra de carbono, cables y una cuerda.

9.2. Necesidad de una prueba de filtraciones de luz

El PMT, como se ha mencionado anteriormente, es capaz de captar la luz de una cantidad muy pequeña de fotones, de tal manera que si existe, dentro del tanque, una fuente de luz que no es producida por la radiación Chérenkov, las mediciones hechas por el WCD se verán seriamente afectadas, conteniendo ruido o incluso, se podría dañar el PMT. La Figura 15 derecha muestra un histograma de cargas en el cual existen filtraciones de luz [13], esto se

interpreta así ya que se aprecia del todo una forma de rodilla entre 200 y 600 ADCq. Al contrario de lo que se esperaría obtener, que es una señal del tipo mostrado en la Figura 15 izquierda [35].

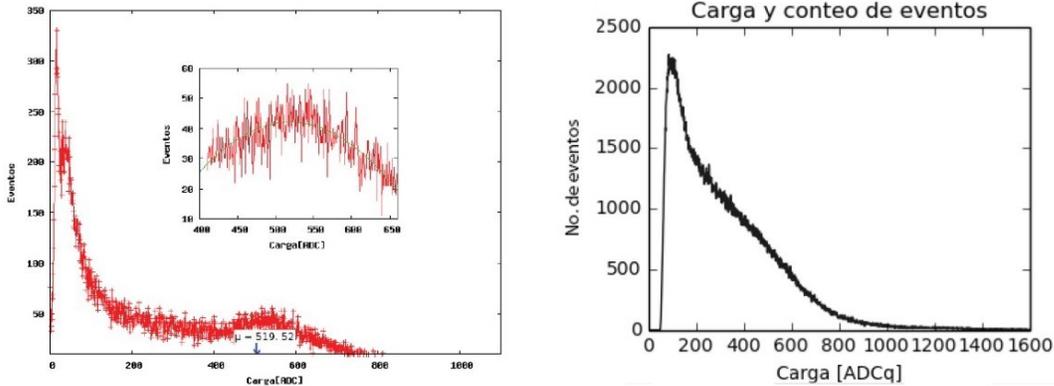


Figura 15: Izquierda: Histograma de cargas de un estudio independiente en el que no se tiene luz extra [35]. Derecha: Histograma de cargas para una hora de datos tomados antes de la prueba de luz, donde el detector tiene filtraciones de luz, extraído de [13] estudio hecho con el mismo tanque donde se realizan las pruebas de luz presentadas. Se observa una rodilla entre 200 y 600 ADCq en el histograma de la derecha, ausente en el de la izquierda.

Hacer esta prueba es crucial para saber en que partes del WCD hay entradas de luz parásita para que posteriormente estas se tapen y se evite que los datos se vean afectados por luz externa.

9.3. Fotografía

Una cámara fotográfica es un aparato que sirve para capturar imágenes, sus componentes principales son: una lente llamada objetivo, un prisma, diafragma, obturador y un sensor de luz o carrete. El tipo de cámara que se usa en este experimento es la Canon T6, una lente 18-55 mm. En las secciones siguientes se describen más detalles. [36]

9.3.1. Sensibilidad

Anteriormente las cámaras usaban carrete o película, y estos se clasificaban de varias formas una de ellas es por su sensibilidad para ellos se usa un estandar llamado ISO por sus siglas en inglés, que es un número que establecía la sensibilidad a la luz de la película [36].

En la fotografía digital el sensor de luz es variable en su sensibilidad y a este se le puede cambiar el ISO, su valor en algunas cámaras va desde 100 hasta 6400 en promedio, donde 100 de ISO es la menor sensibilidad del sensor a la luz y 6400 es el de mayor sensibilidad a la luz entonces en el último se necesita menos luz para captar alguna imagen. [36].

9.3.2. Obturación

El mecanismo, cuando accionamos el disparador de una cámara fotográfica para dejar pasar luz del lente objetivo al sensor, recibe el nombre de obturador de la cámara. Se puede controlar el tiempo que el sensor recibe luz durante una fotografía, a este tiempo se le conoce como velocidad de obturación o bien tiempo de exposición. En una cámara profesional se puede controlar este parámetro y los valores van desde 1/4000 s hasta una opción que recibe el nombre de bulb donde la fotografía puede capturar durante el tiempo que el fotógrafo quiera[36].

9.3.3. Diafragma

Es un mecanismo de hojas o cuchillas que se abren para dejar pasar luz al sensor, estas se abren y se cierran según la necesidad de la situación. El valor de este parametro depende del lente de la cámara y se distingue con una letra f, por ejemplo uno de los valores de f más pequeños es 1.8 que corresponde a una apertura grande, mientras más grande es dicho número más pequeño se hace el diafragma [36].

9.4. Diseño experimental de prueba con cámara

La prueba se inicia haciendo el enlace entre el smart phone y la cámara por medio de la aplicación "*Canon Camera Connect*" se puede encontrar en la "*Play Store*" y es totalmente gratuito como se muestra en la Figura 16 este se puede encontrar en [37].



Figura 16: Screen shot de la aplicación a instalar

Posteriormente se activa la conexión inalámbrica (Wi-Fi) de la cámara como se puede apreciar en la Figura 17. Se procede a configurar la cámara para que sea compatible con el smartphone (teléfono inteligente) tal como se muestra en la Figura 18:



Figura 17: Menú de la cámara Canon T6 donde se muestra el Wi-Fi activado



Figura 18: Menú de la cámara Canon T6 donde se muestra la conexión para un smart phone (teléfono inteligente)

Se busca la señal de Wi-Fi de la cámara en el celular para establecer conexión, tal como se muestra en la Figura 19.

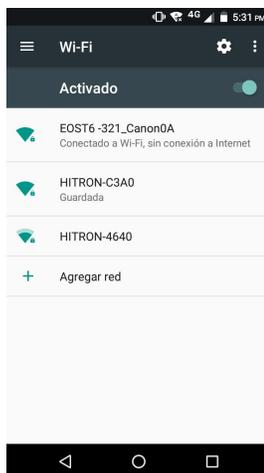


Figura 19: Listado de conexiones WI-FI encontradas por un celular donde la primera es la conexión de la cámara.

Cuando conexión se establezca, el smart phone se debe encontrar la aplicación que se instaló en el primer paso, al abrir esta aplicación se debe elegir la opción "disparo con visión remota", esta permite controlar la cámara desde una distancia de 6 m máximo como se puede ver en la Figura 20.



Figura 20: Página principal de la aplicación de Canon en un smart phone.

Posteriormente se deben tapar todas las luces led de la cámara con parte del sticker de fibra de carbono para que una vez dentro del tanque, no contribuyan a la luz captada. Entonces la cámara se deposita dentro del tanque con el lente hacia arriba tal como se muestra en la Figura 21. Se tapa el tanque y se le da la indicación la cámara de forma remota para que tome fotos siguiendo las configuraciones de la Tabla 1. Para que la cámara permita tiempos de exposición mayores a 30 s se tiene que configurar en la opción de bulb. Se toman dos fotos por cada configuración. Las fotos se pueden analizar desde el smart phone pero para ser más minuciosos en el análisis de las fotos se puede usar algún programa especializado en visualización de imágenes. La toma de fotografías se deben hacer en varios ángulos dado

que toda el área interna del tanque debe ser observada. El análisis se describe en la siguiente sección.

Parámetro	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
ISO	800	1600	3200	6400
Exposición (min)	5	5	5	10
Apertura	F4.0	F4.0	F4.0	F4.0

Cuadro 1: Configuración de la cámara para la prueba



Figura 21: Fotografía de la ubicación de la cámara para pruebas de luz

La Figura 22 muestra un diagrama con el montaje de la prueba dentro del tanque cerrado. Si no se encuentran filtraciones de luz, el detector ya estará listo para funcionar. Si se encuentran filtraciones se deberá cubrir el tanque debidamente para aislarlo. Normalmente se le podrían colocar varias vueltas de papel alumnio seguidas de nylon negro.

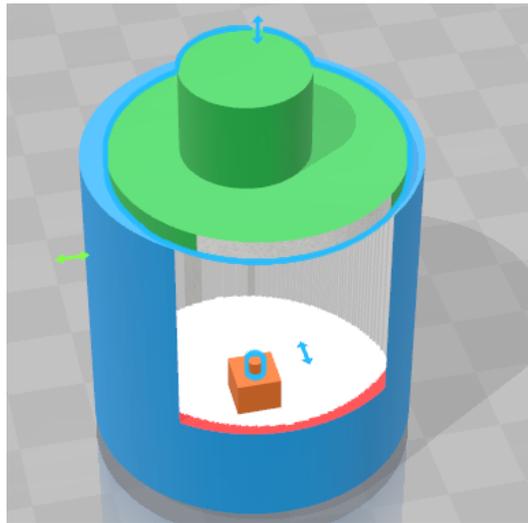


Figura 22: Diagrama de la ubicación de la cámara para pruebas de luz

9.5. Análisis de fotografía

En la Figura 23 se aprecia la primera fotografía hecha con la cámara, se observan filtraciones de luz considerables. Después de haber observado las filtraciones, se cubrieron con el sticker de fibra de carbono y se volvió a realizar la prueba. La Figura 24 muestra una fotografía del segundo intento, se sigue observando alguna filtración de luz. Se cubren las filtraciones localizadas hasta que la imagen esté completamente negra. La Figura 25 muestra una fotografía en la que ya no hay filtraciones. A pesar de que no quedan filtraciones, se está considerando cubrir el tanque con varias capas de papel aluminio y varias capas de nylon negro para asegurar que a lo largo del tiempo el tanque siga protegido de luz exterior.

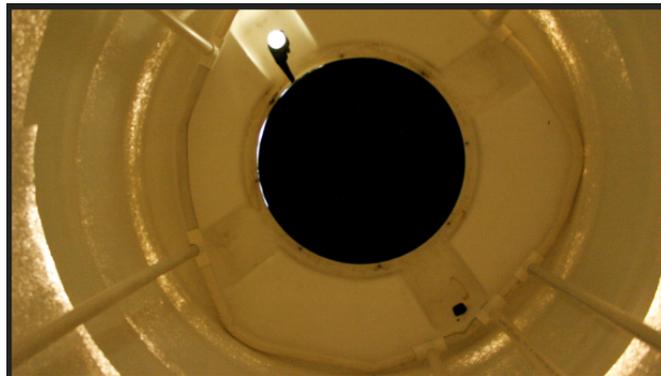


Figura 23: Fotografía donde se pueden apreciar las filtraciones de luz que posteriormente serán cubiertas

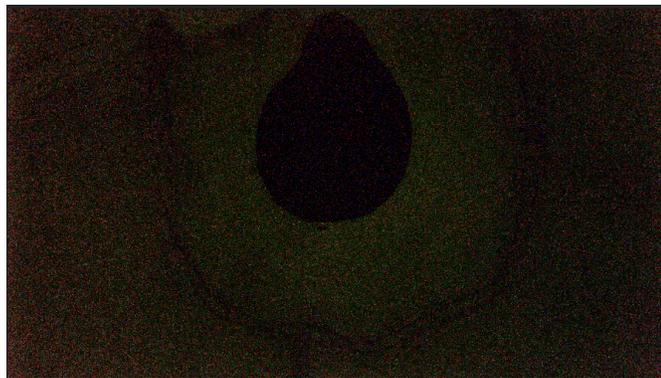


Figura 24: Fotografía donde se puede mirar muy oscuro el interior del tanque esto se debe a que existen filtraciones de luz y se necesita recubrir

Y se tendrá que recubrir hasta que la imagen esté completamente negra sin ningún rastro de luz.



Figura 25: Fotografía donde ya no hay filtraciones de luz visibles

9.6. Propuesta de prueba con arduino

Un arduino es un microcontrolador de software abierto y de libre distribución, es programable, se controla a través de un puerto USB. Se desarrolló esta prueba de luz con arduino para bajar el costo de la misma con respecto a la realizada con una cámara. Los materiales utilizados son: Una placa arduino uno o Leonardo, cables o jumpers, una resistencia de $10K\Omega$, una fotoresistencia (también se puede hacer con un fototransistor) y un protoboard [38].

9.6.1. Montaje y diseño

Al cargarse el programa (ver anexos) en el arduino, este empieza a medir el potencial en el fotoresistor, mientras más luz hay, más pótencial se mide. Por ello cuando se realice la medición dentro del tanque y se obtenga un valor distinto de cero, esto significará que hay alguna filtración de luz. Esto puede agregar una ventaja adicional a la siguiente prueba que se realice, ya que se podrían usar fotoresistencias con distintas longitudes de onda, tales como la ultravioleta. De esta manera se podría identificar con mayor detalle el tipo de luz filtrada. La Figura 26 muestra el montaje de la prueba.

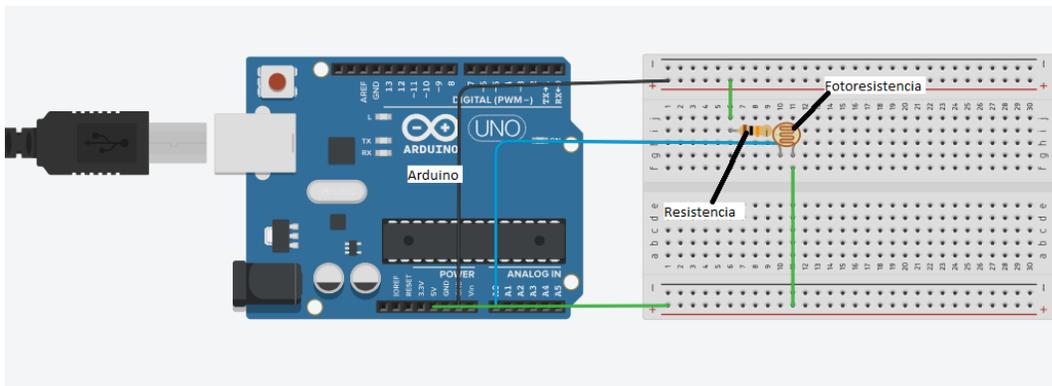


Figura 26: Modelo del circuito empleado para hacer la prueba, existen más configuraciones pero esta es la más sencilla

9.7. Resultados

Una vez cubiertas las fuentes de luz externas, se hizo una nueva medición para ser comparada con la medición realizada cuando no se habían cubierto las fuentes externas, mostrada en la Figura 15 derecha.

El histograma de cargas obtenido después de las pruebas de luz se muestra en la Figura 27. Se observa que la forma de rodilla entre 200 y 600 ADCq que se observaba anteriormente, ahora se muestra más pequeña. La caída tipo exponencial que se espera, se va haciendo más clara.

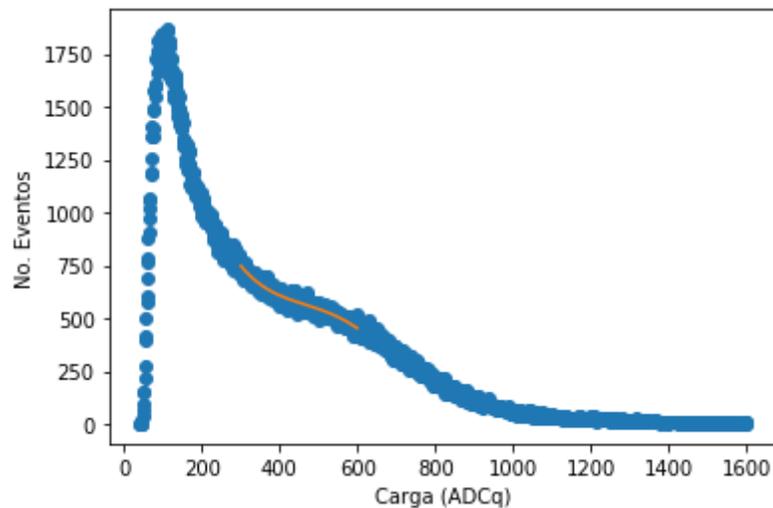


Figura 27: Histograma de cargas semilog, posterior a las pruebas de luz y a la eliminación de filtraciones visibles de luz

También se observa que la subida inicial es más clara en el histograma de la Figura 27. Por otro lado, como se mostrará en una sección posterior, la estimación del Muon Vertical Equivalente (VEM) antes de las pruebas de luz era de 519.52 ADCq, mientras que después de las pruebas es de 579 ± 7 ADCq. Por lo tanto se puede concluir que la prueba de luz, a partir de la cual se pudo aislar al detector, tuvo un impacto significativo, ya que se obtuvo un pulso más limpio de la señal y con ello, la estimación del VEM también cambió, para un mismo detector.

Decrecimiento Forbush y efecto de los sismos en la radiación cósmica

Se proponen dos estudios de análisis de datos a realizarse con el WCD de LAGO. Se trata del decrecimiento Forbush y el efecto de los movimientos telúricos en la radiación cósmica.

10.1. Decrecimiento Forbush

Forbush encontró correlaciones entre el flujo de rayos cósmicos galácticos (GCRs) y las perturbaciones del campo geomagnético. Estos decrecimientos en la intensidad de GCRs son ahora conocidos como decrecimiento Forbush. Se sabe que las perturbaciones magnéticas se deben a las eyecciones de masa coronal, definidas como una erupción de plasma y energía magnética del Sol [39]. Formalmente se define el decrecimiento Forbush como la disminución abrupta de la intensidad de la radiación del 10 % al 20 % aproximadamente. Además se caracteriza por un marcado decrecimiento en la intensidad en un período de pocas horas, el cual es seguido de una lenta recuperación de la intensidad que toma días, incluso semanas [40]. La Figura 28 muestra un evento de decrecimiento Forbush.

Se ha encontrado que la recuperación del nivel de intensidad, después del decrecimiento se puede aproximar a una función de la siguiente forma.

$$\Delta I(t) = \Delta I_0 e^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (60)$$

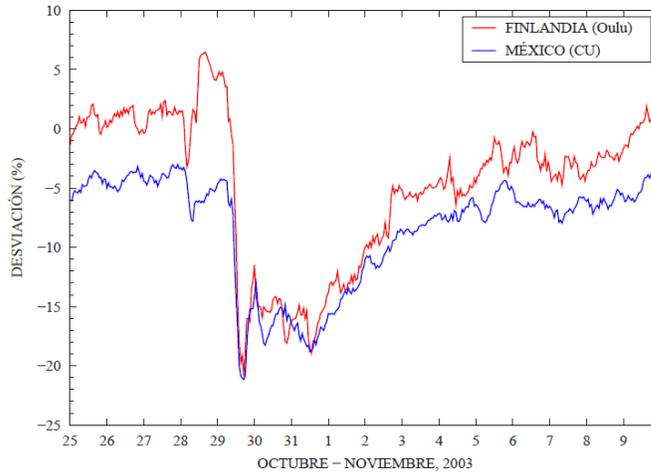


Figura 28: Gráfica de incremento porcentual de la intensidad de flujo de rayos cósmicos contra tiempo, donde se puede observar el decrecimiento Forbush entre los días 29 de octubre y 1 de noviembre.[40]

10.1.1. Propuesta de análisis de datos

Detectores de partículas se pueden usar para monitorear la actividad solar, en este estudio únicamente se utilizarán detectores de muones. Se sabe que el flujo vertical de muones es constante pero cuando el Sol eleva su actividad en forma de eyecciones de masa coronal causa un incremento en el campo magnético solar. Debido a que los rayos cósmicos son partículas cargadas, estas son desviadas por las variaciones en el campo magnético solar. Así, se observa una variación en la radiación cósmica al nivel del suelo[13] [41].

Para estudiar el decrecimiento Forbush se buscará realizar gráficos parecidos al de la Figura 28. Esto debe ir acompañado con observaciones solares por ejemplo aparición de manchas o de eyecciones de masa coronal, y así verificar si el cambio en el flujo de muones es causado por el Sol.

10.2. Efectos de los movimientos telúricos en la radiación cósmica

Los muones son partículas cargadas por lo que si estas viajan en presencia de un campo magnético, desvían su trayectoria. Este hecho es la base de la relación de los rayos cósmicos y los sismos [35].

En los últimos años se ha observado que antes de un sismo se presentan fenómenos electromagnéticos que interfieren con el campo electromagnético terrestre y producen variaciones [42]. Aunque la comunidad científica no ha llegado a un sobre el por qué se produce esta variación, material piezoeléctrico presente en las regiones donde se producen los sismos [35]. En otras fuentes se mencionan que las fallas tectónicas forman una especie de capacitor [42]. También se mencionan que antes del sismo se generan fracturas en las rocas, estas

afectan a sus propiedades electromagnéticas, Lo más probable es que todos estos fenómenos sucedan al mismo tiempo [43]. No se estudian estas variaciones con simples magnetómetros, pero los muones podrían ser la solución. Los muones son partículas cargadas y masivas, su flujo vertical puede ser desviado por el campo electromagnético local y esto los convierte en objeto de estudio para la predicción de sismos [35] [43].

10.2.1. Propuesta de análisis de datos

En estudios previos de la Universidad de los Andes en Mérida, Venezuela, se han hecho estudios con flujo de muones verticales con detectores de radiación Chérenkov en agua, con el objetivo de percibir si los cambios en el campo electromagnético local afectan al flujo vertical de dichos muones [43]. Posteriormente, en el primer trabajo sobre LAGO realizado en la UVG, se hicieron estudios para observar dichas variaciones en el campo electromagnético. Se propuso un diseño experimental que combina detectores de radiación Chérenkov en agua y plásticos centelladores [35]. El flujo vertical de muones también se puede calcular únicamente con el WCD sabiendo la constante de calibración del mismo (VEM), se pueden contar los muones verticales que pasan por el detector y posteriormente calcular el flujo para monitorearlo a través del tiempo.

El análisis de la variación del flujo vertical de muones se debe acompañar por datos del servicio sismológico local. Esto para obtener datos relevantes del sismo ocurrido.

Estructura completa del sistema de detección en volcán Atitlán

Los detectores de radiación Cherenkov que se utilizan en el Proyecto LAGO, como se explica anteriormente, usan el agua como medio dieléctrico para que ocurra el fenómeno. Para esto, es necesario tener un tanque de aproximadamente 600 L. En la Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central, se utiliza un tonel de *Rotoplast*. Hay que considerar que el agua debe cumplir con ciertas características químicas relacionadas con su turbidez, su conductividad y su nivel de pH. Las paredes internas del tonel están recubiertas para asegurar que no entre luz del exterior, y cuentan con un material altamente reflectivo conocido como *tyvek*. En la tapadera del tonel se coloca el PMT, con el lente colocado en dirección al fondo del tonel, dejando la conexión de los dínodos hacia afuera para que se pueda conectar tanto la alimentación como el cable para la lectura de los pulsos. El PMT es controlado desde la Nexys 2.

La Nexys 2 controla el alto voltaje del PMT a través de una “placa hija” con una salida con cable UTP. A su vez, recibe los pulsos desde una entrada analógica, mediante cable coaxial. Luego, esta se conecta mediante USB-2 con la Raspberry Pi. La Raspberry Pi cuenta con todos los paquetes y módulos necesarios para controlar la adquisición de datos, como se describe en el siguiente capítulo. Además, con ella se hace la lectura de los sensores de presión absoluta y temperatura y geolocalización, junto con los sensores de monitoreo de humedad relativa, temperatura y corriente de las cargas. Por otro lado, en su interfaz Ethernet se conecta la antena transmisora, y se preparan los paquetes de datos para enviarlos desde la estación en el volcán Atitlán hasta el campus de UVG Sur, donde está la antena receptora conectada con una computadora en esa ubicación, donde finalmente se envían los datos al Campus Central para su almacenamiento final, limpieza y análisis en el cluster. Todo el sistema en el volcán se alimenta a través de paneles solares con baterías recargables y una red de distribución de potencia. En la siguiente figura se muestra el diseño de la interconexión del sistema completo.

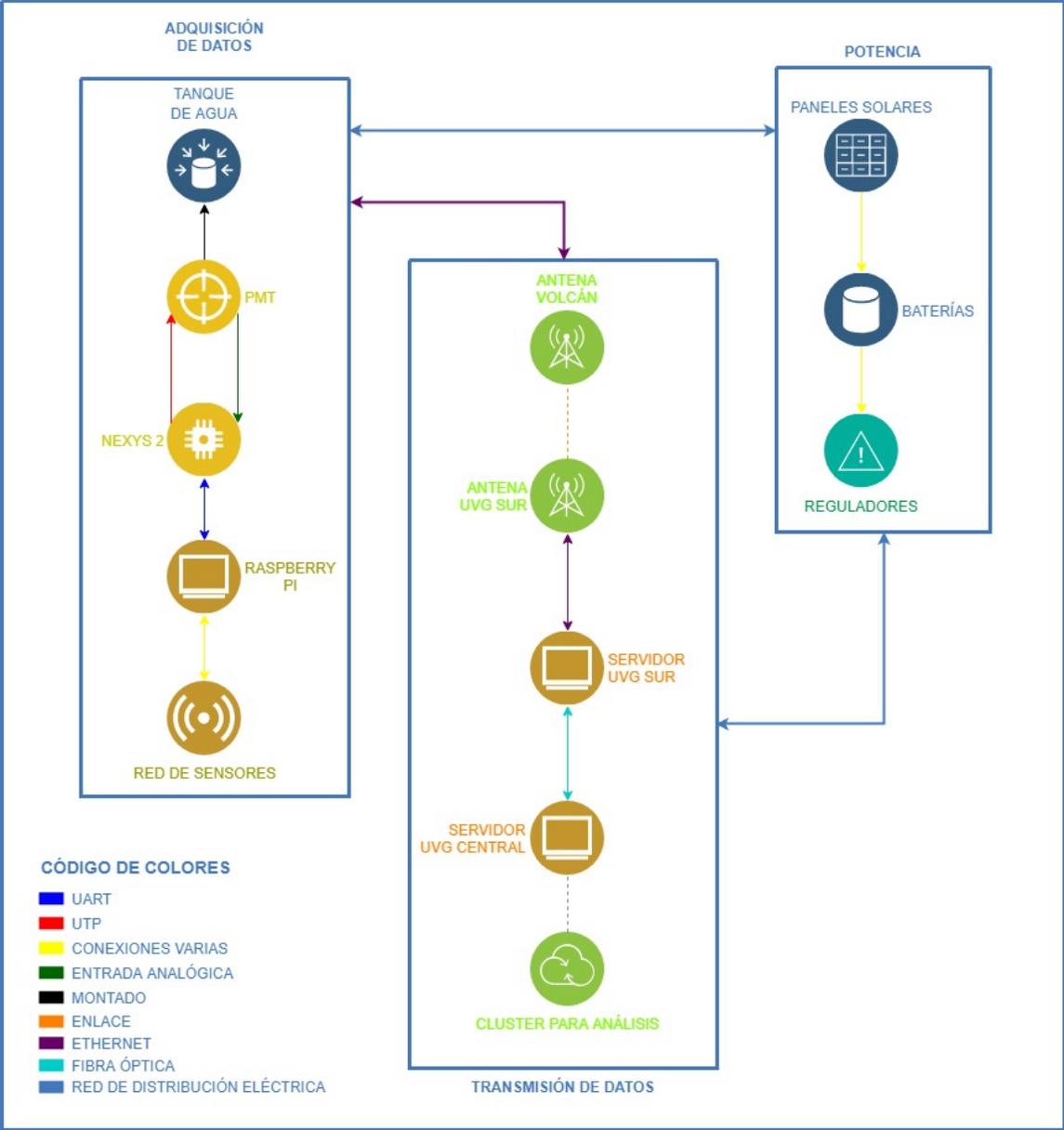


Figura 29: Diagrama de la estructura completa del detector.

12.1. Sistema solar fotovoltaico

En diciembre del año 2017, se realizó una visita a la Reserva de la Universidad del Valle de Guatemala situada en Atitlán, Suchitepéquez en la cual se observaron las condiciones climatológicas, y el área en el cual se instalaría el detector de radiación Cherenkov. Un sistema solar fotovoltaico resultó adecuado para el tipo de ambiente en el que se estaría trabajando, el cual se puede abordar como un bosque con alta luminosidad. La Reserva no cuenta con alguna fuente de electricidad propia, ni acceso a la red eléctrica debido a que es una zona de difícil acceso. Por ello, se optó por la instalación de un sistema solar fotovoltaico aislado para alimentar el detector.

- Estimar el consumo de potencia de las cargas como un conjunto.
- Conocer la ubicación del área donde se instalará el sistema para poder investigar la irradiación solar y elegir el tipo de sistema a utilizar.
- Calcular el tamaño y cantidad de paneles solares que satisfagan los requerimientos de potencia.
- Dimensionar el sistema de almacenamiento de energía, es decir, un banco de baterías, tomando en cuenta el periodo de autonomía que se le desea atribuir.
- Seleccionar el regulador que permita efficientizar el sistema y proteja las baterías de sobrecargas o descargas profundas.

12.2. Diseño del sistema

Teniendo un panorama general del proyecto, se procedió a diseñar el sistema solar fotovoltaico aislado, debido a que se encuentra en un área remota carente de acceso a la red eléctrica.

Descripción	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Nexys 2	12	0.25	3
Raspberry Pi II	5	2	10
Ubiquiti AirGrid M	24	0.5	12
Cámara de Seguridad FOSCAM FI8909W	5	2	10
Arduino Nano	5	0.019	0.095
Router Nebula 300+	9	0.6	5.4
Total			40.495

Cuadro 2: Requerimientos de consumo de potencia para detector de radiación Cherenkov

12.2.1. Estimación del consumo de potencia

En el Cuadro 2 se encuentran los requerimientos de consumo de potencia de cada carga basada en las especificaciones máximas indicadas por las *datasheet* de cada dispositivo. Como se puede observar, el consumo de potencias de las cargas en total es de 35.495 W.

12.2.2. Ubicación de la reserva

Las coordenadas en las que se encuentra la Reserva de la Universidad del Valle de Guatemala en Atitlán, Suchitepéquez son 14.548° hacia el norte y 91.194° hacia el oeste. La irradiación solar en el área es de 5.6 kWh/m^2 . Debido a la zona en la que se encuentra la Reserva de la Universidad del Valle, únicamente se puede optar por un sistema solar fotovoltaico aislado sin conexión a la red eléctrica, pues en esa área no hay. Entre las ventajas del sistema elegido se encuentra:

- La energía eléctrica es totalmente independiente, lo cual indica que el sistema estará funcionando sin ser afectado por las condiciones climáticas o fallas que pueda tener la red eléctrica pues no tiene conexión a ella.
- El sistema se puede ubicar tanto en el suelo como en el techo tomando en cuenta la posición geográfica del sol y dependiendo del lugar en donde se ubique, se requerirá de un mayor o menor cableado.

12.2.3. Elementos del SSF aislado

Antes de describir los elementos del SSF, cabe mencionar que se empleó únicamente corriente continua por las siguientes razones:

- La energía eléctrica producida por los paneles solares se almacena en forma de energía química en las baterías.
- Los voltajes utilizados (5 V, 12 V y 24 V) se pueden obtener empleando convertidores DC/DC de tecnología Buck.

Al elegir un sistema solar fotovoltaico aislado y establecer únicamente el uso de corriente continua se pueden delimitar los elementos necesarios a los siguientes:

- Paneles solares
- Banco de baterías
- Regulador MPPT
- Cable para interconexiones

En la Figura 30 se puede observar el sistema solar fotovoltaico elegido y la interconexión entre los elementos. En las siguientes etapas, se muestra como dimensionar cada elemento.

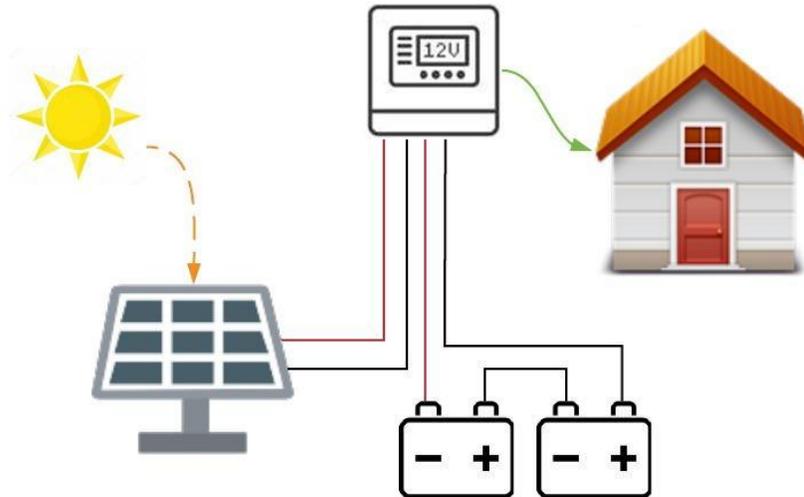


Figura 30: Interconexión del sistema solar fotovoltaico aislado seleccionado.

12.2.4. Cálculos para dimensionamiento de cada elemento

Como se mencionó anteriormente, el SSF está conformado por cuatro elementos que deben satisfacer las necesidades del detector de radiación Cherenkov. Por ello, se dimensionará cada uno con base en los requerimientos [44].

La Ecuación 61, hace referencia al consumo medio de energía al día L_{md} y se expresa en watts por hora Wh , $L_{md,DC}$ al consumo medio de energía al día de las cargas en corriente

continua y $L_{md,AC}$ en corriente alterna.

$$L_{md} = \frac{L_{md,Dc} + \frac{L_{md,AC}}{\eta_{inv}}}{\eta_{bat} \times \eta_{con}} \quad (61)$$

La Ecuación 62 se utiliza para calcular el consumo medio de energía al día en Amperios por hora Ah [44].

$$Q_{Ah} = \frac{L_{md}}{V_{BAT}} \quad (62)$$

Descripción	Potencia [W]	Funcionamiento diario [h]	Total de energía necesaria [Wh]	Energía necesaria * margen de seguridad (25 %) [Wh]
Nexys 2	3	12	36	45
Raspberry Pi II	10	12	120	150
Ubiquiti AirGrid M	12	24	288	360
Cámara de Seguridad FOSCAM FI8909W	10	24	240	300
Arduino Nano	0.095	12	1.14	1.425
Router Nebula 300+	5.4	24	129.6	162
Total	40.495		814.6	1018

Cuadro 3: Consumo de energía diario con margen de seguridad

Como se puede observar en el Cuadro 3, el consumo diario ideal es menor al consumo diario real, puesto que se deben considerar las pérdidas causadas por elementos de la instalación.

Paneles solares

$$N_T = \frac{L_{mdcrit}}{P_{MPP} \times HPS_{crit} \times PR} \quad (63)$$

donde

- N_T número de paneles solares necesarios
- L_{mdcrit} consumo medio diario para el mes más crítico
- HPS_{solar} horas de sol pico en el mes crítico
- PR factor de funcionamiento del panel, se encuentra en el rango de 0.65 a 0.90.

Tomando en cuenta los valores comercializados localmente se encontró lo siguiente, al aplicar la Ecuación 63. Tomando en cuenta el consumo medio diario de 1272.5 Wh/día, una eficiencia del panel solar de 0.85 y 5.6 horas de sol pico según el mapa solar de Guatemala, se requiere 1.02 paneles. Esto quiere decir que con 1 panel de 260 Watts basta para satisfacer el sistema y a su vez, existe la posibilidad de escalabilidad, en caso de que se desee ampliar el sistema o bien, agregar componentes para mejorar la eficiencia del detector [44].

Baterías

Para dimensionar las baterías se consideró la máxima profundidad de descarga y también, los días de autonomía del sistema, dado que el sistema es aislado y en condiciones de baja irradiación solar, es necesario tener un sistema de almacenamiento energético.

- Profundidad de descarga de la batería (PD_{max}): 0.75
- Días de autonomía: 1.5

Cabe mencionar que como la profundidad de descarga es un 75 %, la capacidad que debería quedar en la batería debería ser de un 25 %, por ello, es necesario considerar el 125 % para la capacidad de la batería [44].

$$C_{bat} = \frac{1.25 \times D_{auton} \times L_{md}}{V_{BAT}} \quad (64)$$

donde

- C_{BAT} es la capacidad de la batería
- D_{auton} representa los días de autonomía
- L_{md} es el consumo medio diario
- V_{BAT} es el voltaje entre las terminales de la batería

Tomando en cuenta 1.5 días de autonomía, un consumo medio diario de 1272.5 Wh/día y 2 baterías de 12 V en serie y utilizando la Ecuación 64 se tiene que la capacidad de cada batería es de 99.41 Ah.

También es importante establecer que se adquirieron baterías de gel de ciclo profundo a pesar de su costo relativamente más elevado que el de la baterías de ácido-plomo.

- Son más seguras, soportan descargas lentas y profundas y toleran las vibraciones.
- Se cargan rápidamente y requieren de menos energía para recargarse completamente.
- Mantienen un voltaje alto cuando se descargan y trabajan muy bien en conjunto con dispositivos que utilizan corriente DC.
- No requieren de mantenimiento constante y ya que la Reserva se encuentra en un área remota y de difícil acceso, es mejor prescindir de esos servicios.
- Son menos tóxicas ya que liberan una menor cantidad de hidrógeno al cargarse [45].

Regulador MPPT

El regulador es un elemento imprescindible para un sistema fotovoltaico aislado, principalmente para la protección del banco de baterías. En este sistema se seleccionó un regulador MPPT (Maximum Power Point Tracking por sus siglas en inglés). La decisión fue tomada con base en el aprovechamiento de toda la energía eléctrica producida por el panel solar gracias a los algoritmos de optimización de potencia. A su vez, también fue elegido debido a que se puede mantener una tensión mayor en el panel solar que en el banco de baterías a diferencia del regulador PWM.

Para dimensionar el regulador, se tomó en cuenta la corriente de corto circuito de cada celda solar para un panel solar de 260 W y el número de ramales como se puede comprobar en la Ecuación 65, en este caso es solo 1 ya que se prefirió un panel de mayor potencia a un arreglo de paneles debido al espacio con el que se contaba [44].

$$I_{reg} = 1.25 \times I_{sc} \times N_p \quad (65)$$

El factor de 1.25 es únicamente para no dañar el regulador.

I_{sc} se refiere a la corriente de corto circuito de cada celda y N_p a la cantidad de ramales en paralelo.

En este caso, la corriente de corto circuito para un panel de 260 W es de 8.94 A y ya que solo se cuenta con un panel, la corriente de entrada del regulador es de 11.175 A.

12.3. Resumen del sistema solar fotovoltaico adquirido

En el Cuadro 4 se pueden observar los elementos del sistema solar fotovoltaico adquirido y sus especificaciones con un costo total de Q7699.00. En la Imagen 31 se muestran los elementos principales del sistema solar fotovoltaico adquirido e instalado en la Reserva de la Universidad.



Figura 31: Elementos del sistema solar fotovoltaico instalado en la Reserva UVG: regulador MPPT, panel solar y baterías de gel.

Cant.	Descripción	Especificaciones	Costo Unitario	Total
1	Panel Solar	P_{max} : 260 W	Q1349.00	Q1349.00
2	Baterías selladas de Gel de ciclo profundo marca Narada	V : 12 V I: 100 Ah	Q1814.20	Q3628.40
1	Regulador MPPT marca Sun Yoba	I_{in} : 20 A	Q 900.00	Q900.00
30	Cable AWG [m]	#8	Q20.00	Q600.00
1	Base para Panel Solar	Inclinación de 15°	Q1050.00	Q1050.00
				Q7527.40

Cuadro 4: Resumen de sistema solar fotovoltaico adquirido en el mercado local

12.4. Diseño de sistema de protección contra rayos según norma NFPA 780

12.5. Evaluación del riesgo del rayo

El procedimiento que permite determinar el riesgo de un rayo se encuentra en la norma NFPA 780 en el apartado L y determina las consecuencias que puede tener una instalación, sus ocupantes y los bienes materiales en caso de que incida un rayo directamente sobre la edificación. Por ello, es necesario seguir el siguiente método para determinar si la zona en la que se encuentra a estructura permite un sistema de protección contra rayos de forma opcional o si es un requerimiento obligatorio para prevenir desastres.

Cálculo de frecuencia de incidencia de rayos

$$N_d = (N_g)(A_e)(C_1)(10^{-6}) \quad (66)$$

donde

- N_d Frecuencia de incidencia de un rayo directamente sobre una edificación
- N_g Densidad anual de rayos en la región donde se ubica la edificación o el nivel isoceraúnico [No. de rayos/año/ km^2]
- A_e Área de captura del rayo equivalente al tamaño del edificio en estudio [m^2]
- C_1 Coeficiente ambiental empleando la Tabla 5.

Localización relativa de estructura	C_1
Estructura localizada en un espacio donde hay otras estructuras o árboles de la misma altura o más alto	0.25
Estructuras rodeadas por estructuras bajas	0.5
Estructuras aisladas: no existen otras estructuras en una distancia menor de 3H	1
Estructura aislada en la cumbre de una colina o promontorio	2

Cuadro 5: Coeficientes relativos a la estructura de la edificación según NFPA 780 Tabla L.4.3

Para calcular el coeficiente A_e que hace referencia al área equivalente de la estructura se puede emplear una estructura rectangular como lo indica la Ecuación 67 o bien, una estructura donde la parte inferior está recubierta por una parte superior prominente como lo indica la norma NFPA en el artículo L.4.1. y se muestra en la Ecuación 68.

$$A_e = LW + 6H(L + W) + \pi 9H^2 \quad (67)$$

donde L es la longitud frontal de la estructura, H es la altura de la edificación y W es el ancho.

$$A_e = \pi 9H^2 \quad (68)$$

donde H es la altura de la edificación.

Cálculo de frecuencia de incidencia de rayos tolerable

La frecuencia de incidencia de rayos tolerable indica una medida de riesgo de daños a la estructura tomando en cuenta los factores de riesgo a la estructura, al ambiente y las pérdidas económicas. Esta medida de riesgo se calcula empleando la Ecuación 69.

$$N_c = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{C} \quad (69)$$

donde C se calcula de la siguiente forma como se indica en la Ecuación 70.

$$C = C_2 \times C_3 \times C_4 \times C_5 \quad (70)$$

Los coeficientes empleados en la ecuación 70 se pueden obtener a partir de las Tablas 5 hasta la 9.

Estructura	Coefficiente estructural C_2		
	Techo de metal	Techo no metálico	Techo Inflamable
Metálica	0.5	1.0	2.0
No metálica	1.0	1.0	2.5
Inflamable	2.0	2.5	3.0

Cuadro 6: Coeficientes de determinación estructural según NFPA 780 Tabla L.5(a)

Los valores para calcular N_c hacen referencia a factores esenciales como:

- Materiales de construcción en la estructura
- Importancia del contenido de la estructura
- Ocupación de la estructura y facilidades para evacuación
- Consecuencias principalmente materiales en caso de la incidencia directa de un rayo sobre el edificio

Contenido de la estructura	C_3
De valor bajo y no inflamable	0.5
De valor estándar y no inflamable	1.0
De alto valor y inflamabilidad moderada	2.0
De valor excepcional, inflamable, computadoras o electrónica	3.0
De valor excepcional, irremplazable, elementos culturales	4.0

Cuadro 7: Coeficientes de determinación del contenido de la estructura según NFPA 780 Tabla L.5(b)

Ocupación de la estructura	C_4
Desocupada	0.5
Normalmente ocupada	1.0
Evacuación dificultosa o riesgo de pánico	3.0

Cuadro 8: Coeficientes de ocupación de la estructura según NFPA 780 Tabla L.5(c)

Consecuencias de la caída de un rayo	C_5
Continuidad de servicios no requerido, sin impacto ambiental	0.5
Continuidad de servicios requerido, sin impacto ambiental	1.0
Consecuencias al medio ambiente	10.0

Cuadro 9: Coeficientes de determinación de consecuencias del impacto de un rayo según NFPA 780 Tabla L.5(d)

El criterio que permite determinar si el sistema de protección contra rayos es un requerimiento obligatorio u opcional es el siguiente:

- Si $N_d \leq N_c$ el sistema de protección contra rayos es opcional.
- Si $N_d > N_c$ el sistema de protección contra rayos es un requerimiento obligatorio.

12.6. Evaluación de la necesidad de un sistema de protección contra rayos

Para determinar si es necesario instalar un sistema de protección contra rayos en la Reserva de la Universidad del Valle de Guatemala en las faldas del volcán Atitlán, Suchitepéquez es necesario hacer un estudio con los criterios anteriormente mencionados.

- Ubicación: faldas del volcán Atitlán, Suchitepéquez
- Altura de la edificación: 8 m
- Tipo de estructura: casa estilo canadiense
- Zona en la que se encuentra la estructura: rodeada de árboles a 10 m a la redonda de la casa
- Material del techo: madera
- Material del cuerpo de la estructura: madera
- Contenido de la estructura: vivienda convencional con estufa, colchones y detector de radiación cósmica Cherenkov
- Grado de facilidad para evacuación: moderada, solo existe una salida
- Requerimiento de continuidad de servicios: ninguno
- Radio de protección requerido: 40 m

Tomando en cuenta la información presentada con anterioridad y empleando los criterios descritos en la sección anterior se procede a determinar la necesidad de instalar un sistema de protección contra rayos. Ya que no se cuenta con un mapa de densidad anual de relámpagos, se puede emplear la siguiente ecuación para calcular N_g

$$N_g = N_k/10 \quad (71)$$

donde N_k es el nivel isoceráunico.

El nivel isoceráunico en la zona deseada es de 50 tormentas/año. De esta forma se puede encontrar que el coeficiente de densidad de incidencia de rayos es de $5 \text{ rayos}/\text{km}^2$ por Ecuación 72.

$$N_g = N_k/10 \quad (72)$$

Para determinar el área del edificio se tomaron aproximaciones ya que no se contaba con el plano de la estructura.

Según Ecuación 67, el área equivalente de la estructura es de 3449.56 m^2 tomando un largo de 20 m, un ancho de 10 m y una altura de 8 m.

Ahora para calcular la frecuencia de incidencia de los rayos se utilizó la Ecuación 66. Se tiene que $N_d = 4.31 \times 10^{-7}$, al utilizar el $A_e = 3449.56 \text{ m}^2$, la densidad de incidencia directa de rayos $5 \text{ rayos}/\text{km}^2$ y el $C_1 = 0.25$ ya que a pesar que no hay árboles a 10 metros a la redonda, si existen árboles de mayor altura en el área.

Con el fin de poder determinar si es necesario instalar un SPCR, también se debe establecer el valor de frecuencia de incidencia de rayos tolerable N_c . Para ello, se empleó la Ecuación 69 y la Ecuación 70.

- C_2 : Estructura no metálica con techo no metálico (1.0)
- C_3 : De valor excepcional, irremplazable, elementos culturales (4.0)
- C_4 : Desocupada (0.5)
- C_5 : Consecuencias al medio ambiente (10.0)

Empleando la Ecuación 70, se encontró que $C = 20$ y la Ecuación 69 por lo tanto, resulta en 7.5×10^{-5} . Aplicando el criterio mostrado anteriormente para determinar si la instalación del sistema de protección contra rayos es opcional u obligatoria, $N_d > N_c$, se compararon los valores N_c y N_d y resultó en que el sistema de protección contra rayos es opcional ya que $N_d = 4.31 \times 10^{-7}$ es menor que 7.5×10^{-5} . El sistema fue implementado debido al alto costo del proyecto y la incidencia aleatoria de rayos, lo cual podría dañar la electrónica en caso de la ausencia del mismo. Cabe mencionar que el monto invertido no es representativo con respecto al precio total del proyecto, por lo cual la implementación fue factible.

12.7. Componentes utilizados en el SPCR

Como se puede observar en el Cuadro 10, los materiales adquiridos para el sistema de protección contra rayos sumaron un total de Q649.00 y se instalaron en la Reserva de la Universidad del Valle de Guatemala. La punta Thomson se colocó en el techo sobre un tubo metálico de 6 metros y se lanzaron cables para hacer la red de tierras. Las varillas de cobre se enterraron en el concreto afuera de la casa y se les conectó el cable THHN #6. En la Figura 32 se muestra la instalación final del sistema de protección contra rayos en la Reserva de la Universidad.



Figura 32: Instalación de SPCR en Reserva UVG

Cant.	Materiales	Costo Unitario	Costo Total
1	Punta Thompson de cobre de 5/8" x 18".	Q227.00	Q227.00
1	Base de cobre para Punta Thompson	Q167.00	Q167.00
3	Mordaza de bronce de 5/8"	Q6.00	Q18.00
3	Varillas de cobre para tierra de 5/8" x 8'	Q35.00	Q105.00
12	Cable THHN #6 (m)	Q 11.00	Q132.00
Total			Q649.00

Cuadro 10: Materiales empleados en el sistema de protección contra rayos

Adquisición de datos con Nexys 2 y Raspberry Pi

13.1. Sistema operativo Raspbian Jessie

Para la lectura correcta de los pulsos del PMT es necesaria una frecuencia de muestreo lo suficientemente rápida. Para esto se utiliza la tarjeta de desarrollo Nexys 2 que cuenta con un FPGA. El Proyecto LAGO ofrece un paquete con el *firmware* necesario para utilizar el ADC de la Nexys y controlarlo desde una computadora con sistema operativo basado en Linux. Por tal motivo, en primer lugar, se instaló el sistema operativo Raspbian Jessie optimizado especialmente para la Raspberry Pi. Se utilizó la versión con fecha del 05/07/2017, y los detalles de la versión se pueden encontrar en el Anexo 26.3. El procedimiento consistió en montar la imagen del sistema en una memoria SD de 64 GB con una computadora con sistema operativo Arch Linux utilizando el programa Etcher. Una vez montado el sistema operativo en la SD, la memoria se colocó en la Raspberry Pi y se encendió, para verificar que inicializara de forma correcta.

13.2. Paquete de adquisición y librería FPGA

Luego de instalar el sistema operativo ya es posible descargar los paquetes de adquisición que ofrece LAGO. Para esto es necesario hacer varias configuraciones. Con este fin se siguieron los pasos encontrados en [46], con lo que se obtiene la librería para utilizar y programar el FPGA y el sistema de adquisición de datos oficial de LAGO. Sin embargo, se hicieron algunas correcciones en algunos pasos, por lo que la versión oficial de los comandos implementados en la consola de la Raspberry Pi en este módulo se encuentra a continuación:

<<actualizacion de paquetes propios de Raspberry Pi>>

```
sudo apt-get update
sudo apt-get upgrade
```

<<reinicio del sistema operativo>>

```
sudo reboot
```

<<busqueda de nuevas actualizaciones>>

```
sudo apt-get update
```

<<actualizacion de fecha>>

```
sudo dpkg-reconfigure tzdata
```

<<instalacion de herramientas a utilizar>>

```
sudo apt-get install g++ mercurial vim gnuplot-x11
cc1111 libusb-dev screen libevent-dev
```

<<cambio de permisos en carpeta root>>

```
sudo chmod 777 -R /root/
```

<<acceso a carpeta root>>

```
cd /root/
```

<<creacion de directorio desarrollo y acceso a este>>

```
sudo mkdir desarrollo
cd desarrollo
```

<<descarga de librerias desde el repositorio LAGO>>

```
sudo hg clone https://lago@bitbucket.org/lago/libfpga
sudo hg clone https://lago@bitbucket.org/lago/lago-daq
<<al ejecutar los comandos anteriores, se solicita
el ingreso del password "escondido" (sin comillas)>>
```

<<acceso al archivo .bashrc>>

```
sudo nano /home/pi/.bashrc
```

<<edicion del archivo, agregando las siguientes lineas>>

```
export MAKESTUFF=/root/desarrollo/libfpga/makestuff
export PATH=$PATH:/root/desarrollo/lago-daq/
```

<<recompilacion del archivo>>

```
source /home/pi/.bashrc
```

<<acceso a carpeta /libfgpa/>>

```
cd libfpga
```

<<compilacion de archivos>>

```
sudo make
```

```
<<acceso a carpeta /lago-daq/>>
cd ..
cd lago-daq
```

```
<<acceso al archivo Makefile>>
sudo nano Makefile
```

```
<<edicion del archivo, agregando la siguiente linea al inicio>>
export MAKESTUFF=/root/desarrollo/libfpga/makestuff
```

```
<<compilacion de archivos>>
sudo make
```

Adicionalmente, se requiere ejecutar el siguiente comando para poder utilizar los comando **lago** desde cualquier directorio, además de dar permisos de acceso a los puertos USB.

```
<<crear un archivo de texto con las reglas de acceso>>
sudo vim /etc/udev/rules.d/52-lago-acqua.rules
```

```
<<agregar esta linea en el archivo de texto>>
ATTRS{idVendor}=="1443", MODE="666"
```

```
<<reiniciar sistema operativo>>
sudo reboot
```

Hay que considerar que se requiere una conexión estable a Internet desde la Raspberry Pi para poder ejecutar correctamente todos los comandos, por lo que se recomienda utilizar conexión Ethernet o en su defecto, un módulo Wifi desde el puerto USB. Una vez realizada la configuración anterior, se pueden probar los comandos **lago** para verificar el correcto funcionamiento. Por ejemplo, si se corre el comando **lago -h**, se obtiene un listado de todos los comandos. En el siguiente cuadro se muestra la lista de comandos:

Comando	Acción
- x	Especifica <i>firmware</i> a cargar en FPGA
- a	Obtiene estado de todos los registros
- s	Configura los valores de los registros
- f	Inicia la adquisición de datos y los guarda en archivo .dat
- o	Inicia la adquisición de datos y los envía a repositorio
- g	Obtiene información de GPS
- t	Obtiene información de presión y temperatura
- h	Proporciona información sobre comandos LAGO

Cuadro 11: Comandos para adquisición de datos.

Los registros que se pueden modificar con el comando **lago -s** se muestran en el cuadro

que sigue:

Registro	Descripción
t1	Nivel de disparo canal 1
t2	Nivel de disparo canal 2
t3	Nivel de disparo canal 3
hv1	Voltaje de polarización 1
hv2	Voltaje de polarización 2
hv3	Voltaje de polarización 3

Cuadro 12: Registros configurables para adquisición de datos.

Los datos generados por el detector se escriben en un archivo de datos con extensión .dat cada hora. Estos archivos tienen cierto formato preestablecido que siguen todos los sitios LAGO. Cuentan con un encabezado en donde se especifica el formato de los datos, la frecuencia de muestreo, los valores de temperatura, presión y altitud, la ubicación exacta dada por el GPS y comentarios adicionales. Además, el nombre del archivo tiene la fecha y hora en que se inició la captura de eventos. Un ejemplo del encabezado se presenta en la Figura 33. Si la adquisición de datos se deja correr por más de una hora, se generan tantos archivos como horas permanezca encendido. Dependiendo del nivel de disparo, se detectarán más eventos por lo que los archivos de datos pueden llegar a ser muy extensos.

```
# v 4
# #
# # This is a LAGO raw data file, version 4
# # It contains the following data:
# # <N1> <N2> <N3> : line with values of the 3 ADC for a triggered pulse
# # # t <C> <V> : end of a trigger
# # : gives the channel trigger (<C>: 3 bit mask) and 40MHZ clock count (<V>) of the trigger time
# # # c <C> : internal trigger counter
# # # x f <V> : 40 MHz frequency
# # # x r C1-DD <V> : raw temperature and pressure sensor value
# # # x r D1 <V> : raw temperature/pressure value
# # # x r D2 <V> : raw temperature/pressure value
# # # x h <HH:MM:SS> <DD/MM/YYYY> <S> : GPS time (every new second, last number is seconds since EPOCH)
# # # x s <T> C <P> hPa <A> m : temperature <T>, pressure <P> and altitude (from pressure) <A>
# # # x g <LAT> <LON> <ALT> : GPS data - latitude, longitude, altitude
# # # x b <B1> <B2> <B3> : baselines (NOT IMPLEMENTED IN LAGO)
# # In case of error, an unfinished line will be finished by # E @@@
# # Followed by a line with # E <N> and the error message in human readable format, where <N> is the error code:
# # # E 1 : read timeout of 2 seconds
# # # E 2 : too many buffer reading tries
# # # E 3 : unknown word from FPGA
# #
# # Current registers setting
# #
# x c T1 1000
# x c T2 1000
# x c T3 50
# x c ST1 1000
# x c ST2 1000
# x c ST3 1000
# x c HV1 1500
# x c HV2 0
# x c HV3 0
# x c GPSTM UTC
# #
# # This file was started on raspberrypiLAGO
# # Machine local time was Fri Apr 27 20:41:59 2018
# # WARNING, there is no GPS, using PC time
```

Figura 33: Ejemplo de encabezado de archivo de datos .dat.

13.3. Voltaje de polarización, nivel de disparo y adquisición de pulsos

El sistema de adquisición de datos se encarga de controlar dos parámetros principales de la adquisición: el voltaje de polarización que se le aplica al PMT y el nivel de disparo (*trigger* en inglés) sobre el cual se obtienen los pulsos de los eventos. El PMT debe energizarse con un nivel de alto voltaje -del orden de 1 kV- llamado voltaje de polarización que depende del fabricante. Sin embargo, de forma experimental es necesario obtener el nivel de alto voltaje óptimo de operación a través del proceso de calibración. El PMT utilizado en el detector ubicado en volcán Atitlán ya estaba calibrado, con lo que se sabe que su nivel de alto voltaje óptimo ronda entre los 1300 y 1600 V. La Nexys 2 no puede proveer directamente un voltaje de ese orden de magnitud, por lo que utiliza una “placa hija” que recibe un pulso modulado en ancho (PWM por sus siglas en inglés, *pulse-width modulation*) que luego pasa por un filtro para obtener solo su componente DC (que está en un rango de 0 a 5 V) y luego se amplifica con una fuente de alto voltaje. Se utiliza el PWM debido a que la Nexys 2 no cuenta con suficientes pines de salida analógicos por lo que se utiliza uno digital. Para configurar el nivel de alto voltaje, como se muestra en los cuadros 11 y 12, se utiliza el siguiente comando:

```
lago -s hv2 1500
```

El parámetro hv2 indica que se utilizará el canal 2 de alto voltaje -de tres salidas que tiene la Nexys 2 para este propósito- y el parámetro 1500 indica que se utilizará un voltaje de 1500 V.

La resolución del ADC de la Nexys 2 es de 10 bits. Esto quiere decir que los valores de entrada de 0 a 2 V se leen con un rango de números enteros de 0 a 1023, haciendo que el valor mínimo posible de lectura sea de 1.95 mV [28]. El PMT es tan sensible que puede detectar un solo fotón. Sin embargo, la mayoría de fotones detectados se consideran ruido eléctrico porque provienen directamente de electrones y no de otras partículas de interés, como los muones. Por tal motivo es necesario utilizar dos parámetros: la línea base (*baseline* en inglés) y el nivel de disparo. La línea base establece el valor mínimo que se acepta como un *posible* pulso válido. Este está predeterminado y tiene un valor de 50 en el rango del ADC, por lo que cualquier valor por debajo se considera ruido. También se interpreta como la lectura del ADC cuando no hay ninguna señal en la entrada. El nivel de disparo, en cambio, es configurable al momento de la adquisición y permite establecer un límite inferior mayor a la línea base para no sólo omitir el ruido eléctrico sino también eventos que no son de interés por su bajo nivel energético. El nivel de disparo depende de la calidad del agua entre otras cosas, pero luego de varias pruebas hechas por el equipo de la Fase 1 del Megaproyecto [14] se determinó que un valor adecuado es de 100. Por otra parte, para que un pulso sea considerado como válido, no sólo debe estar por encima del nivel de disparo, sino que debe tener la forma correcta, es decir, la de un montículo o distribución normal. Para esto, el ADC cuenta con una bandera que se dispara cuando una de las lecturas es mayor al nivel de disparo. Si esto se cumple, el pulso se considera como uno válido y se recuperan las dos lecturas anteriores, obteniendo el flanco de subida del pulso. Luego continúan las lecturas hasta llegar a un máximo 12, que es lo más que se puede obtener con la frecuencia de muestreo de 40 MHz, puesto que un

pulso dura alrededor de 300 ns y solo se puede muestrear cada 25 ns [14]. Las 12 lecturas se colocan en el archivo de datos de forma vertical, y como la Nexys 2 tiene la capacidad de leer hasta tres canales analógicos, se muestra la lectura de todos aunque estos no estén recibiendo datos reales. En la Figura 34 se muestra un ejemplo de los pulsos obtenidos por el canal analógico 3.

```
# t 4 28152969
# c 15913
50 50 51
50 50 50
49 49 195
50 50 440
50 51 142
49 50 87
49 50 64
50 51 55
50 50 53
50 50 52
50 50 53
50 49 51
```

Figura 34: Pulso obtenido y almacenado en archivo de datos .dat.

Para configurar el nivel del disparo de la detección se utiliza el siguiente comando:

```
lago -s t3 100
```

El parámetro t3 indica que se cambiará el nivel de disparo en el canal analógico 3, y el parámetro 100 determina a qué valor se colocará.

Hay que tomar ciertas precauciones al momento de energizar el PMT con el alto voltaje, puesto que este se puede dañar. Por tal motivo, a continuación se presenta una serie de pasos a seguir para iniciar la adquisición de datos sin dañar ningún componente. Los comandos se realizan desde la consola:

1. Asegurar que el cable UTP esté desconectado de la Nexys 2, para que el alto voltaje no dañe el PMT.
2. Encender la Nexys 2 con el interruptor de poder.
3. Cargar el *firmware* del FPGA con el comando **lago -x lago.xsvf**. Para verificar que se cargó correctamente, el LED verde debe estar parpadeando. Además, hay que asegurarse que el interruptor 7 esté arriba -esto indica que no se está utilizando el GPS oficial de LAGO-.

4. Configurar alto voltaje al canal correspondiente con comando **lago -s hv2 0**. Esto se realiza para no dañar el PMT.
5. Conectar el cable UTP a la Nexys 2.
6. Configurar alto voltaje al canal correspondiente con comando **lago -s hv2 1600**. El nivel de voltaje puede variar dependiendo de la calibración del PMT.
7. Configurar el nivel de disparo en el canal correspondiente con comando **lago -s t3 100**. Este nivel puede cambiar de acuerdo a las mediciones que se quieran realizar.
8. Iniciar la adquisición de datos con el comando **lago -f nombre_de_archivo**. Para detener la adquisición, se interrumpe la ejecución en la consola presionando Ctrl + C.

13.4. Suite de adquisición de datos ACQUA

Adicionalmente, se instaló la suite de adquisición de datos de LAGO, ACQUA. ACQUA ofrece una forma sencilla de iniciar y detener la adquisición de datos de forma automática, sin necesidad de cambiar los parámetros de adquisición. Para esto, se siguió la guía oficial del Proyecto LAGO en [47]. En ella se deben instalar algunos programas y luego obtener la suite ACQUA desde el repositorio. Luego se debe correr el *script* lago-configs.pl. Este programa es el que se encarga de colocar los parámetros por defecto de la adquisición, como el nombre del sitio, características de los detectores y los niveles de voltaje de polarización y disparo. Finalmente se compila el paquete de ACQUA. La parte de la guía oficial en donde se configura la conexión con el repositorio central se omitió porque no forma parte de este módulo y porque el sitio en la Universidad del Valle de Guatemala actualmente se encuentra inhabilitado.

Para utilizar el paquete ACQUA basta con ejecutar dos comandos:

```
lago-start.sh
lago-stop.sh
```

El primero configura la FPGA e inicia la adquisición de datos colocando como parámetros de adquisición los que se configuraron en lago-configs.pl. Además, funciona como un *watchdog timer*, o perro guardián en inglés, que vuelve a iniciar la adquisición cada 5 minutos si esta se detuviera. El segundo comando detiene la adquisición y evita que esta se lance de nuevo. ACQUA también permite el procesamiento de datos a través del paquete ANNA. Sin embargo, este no se implementa con este detector.

13.5. Resultados obtenidos del sistema de adquisición

El resultado principal de este módulo es el detector completamente funcional instalado en el volcán Atitlán. El detector es capaz de medir continuamente y generar archivos de

datos cada hora, con un nivel de alto voltaje de 1500 V y un nivel de disparo de 100 ADC_p . En el Anexo 26.2 se muestra el ejemplo de un archivo de datos generado. Adicionalmente, se realizó una copia de la imagen del sistema operativo con el paquete de adquisición de datos y los archivos de envío, como un respaldo previendo posibles fallas en la memoria SD.

Para verificar que los datos obtenidos son correctos, se realizó el análisis de la distribución de carga de las partículas. En el Cuadro 13 se muestran los datos de un pulso obtenido con el detector en el volcán. Además, el gráfico del pulso se muestra en la Figura 35.

Tiempo de muestreo [ns]	Corriente medida [ADC_p]	Corriente sin línea base [ADC_p]
0	51	1
25	50	0
50	195	145
75	440	390
100	142	92
125	87	37
150	64	14
175	55	5
200	53	3
225	52	2
250	53	3
275	51	1

Cuadro 13: Pulso obtenido con el detector en el volcán Atitlán.

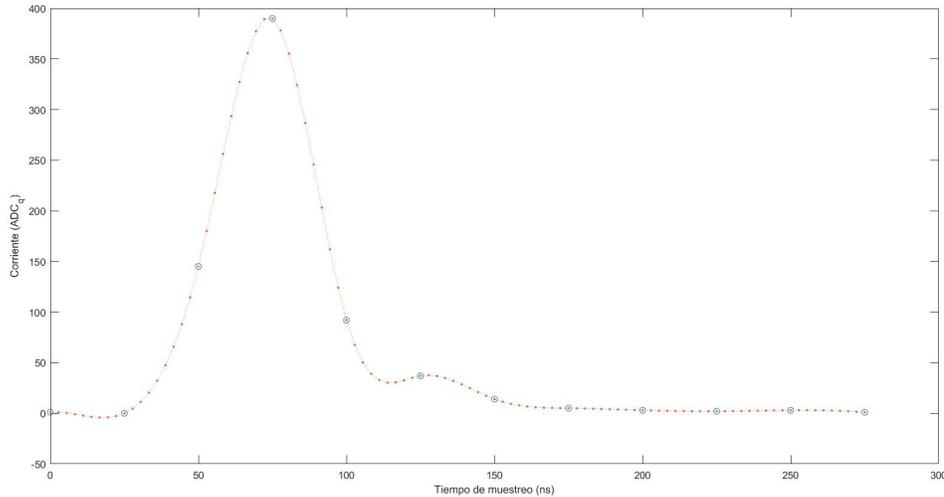


Figura 35: Gráfico del pulso obtenido.

El Proyecto LAGO solicita en sus sitios al menos sensores de presión atmosférica, temperatura y geolocalización, puesto que estos datos permiten análisis posteriores. Se pretende que los sensores estén estandarizados para que todos los sitios tengan el mismo tipo de lecturas y que el paquete de adquisición de datos descrito en el capítulo anterior funcione correctamente. Sin embargo, en el Megaproyecto LAGO Fase 1 no se encontraron los sensores requeridos debido a que están descontinuados, por lo que se adquirieron otros sensores similares pero que no funcionan directamente con el paquete de adquisición. Los códigos utilizados se encuentra en el repositorio en GitHub en el siguiente enlace: <https://github.com/jportegag11/Megaproyecto>.

14.1. Sensor de presión y temperatura

El sensor de presión y temperatura utilizado es el LPS331AP MEMS, cuyo empaquetado se muestra en la Figura 36. Su hoja de datos se presenta en [48]. El sensor permite hacer las lecturas a través de la interfaz I2C que ofrece. Para esto, se utiliza un bus donde el maestro - en este caso la Raspberry Pi- manda a pedir los datos a través de la dirección predeterminada del sensor. Luego, se hace una lectura de los registros donde están almacenados los datos, y se hace la conversión aritmética correspondiente. El procedimiento anterior se ejecuta a través del código en Python “PyT.py”.

La Raspberry Pi debe estar configurada para utilizar el protocolo de comunicación I2C. Esto se realizó corriendo el comando **sudo raspi-config** en la consola, lo que abre una venta de opciones. Navegando con las flechas del teclado, se selecciona la opción **I2C** y se habilitado escogiendo la opción **yes**. Luego, se presiona la opción **finish** y se debe reiniciar el sistema operativo.

Para utilizar correctamente el sensor, el equipo del Megaproyecto LAGO Fase 1 diseñó una placa donde se conecta el sensor con el módulo de GPS. El módulo provee la alimentación necesaria y los pines de entrada, y control para usar I2C. Una lectura típica del sensor presenta la temperatura en grados Celsius y la presión en milibar, que es equivalente a 1 hPa.

Se realizó una serie de pruebas locales en el laboratorio de física del Campus Central de la UVG para determinar el correcto funcionamiento del sensor. Se corrió el código en Python “PyT.py” desde la Raspberry Pi y se desplegó en la consola el valor de la presión y temperatura actual.

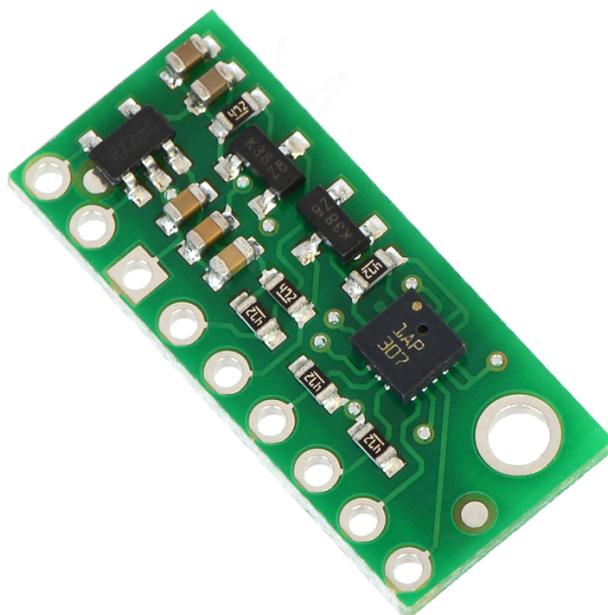


Figura 36: Empaquetado del sensor de presión y temperatura.

14.2. Módulo de GPS

El módulo utilizado para determinar la geolocalización del detector se conoce como RPI Add-on V2.0, creado por ITEAD Intelligent Systems. En la Figura 37 se muestra una vista del módulo físico. Su hoja de datos puede encontrarse en [49]. Este módulo está especialmente diseñado para utilizarse con una Raspberry Pi. Está basado en el módulo NEO-6 GPS. Este se comunica con la Raspberry Pi a través del puerto serial, en donde se obtienen lecturas tanto de geolocalización como de tiempo real. Además, dentro de sus pines de entrada/salida de uso general (GPIO por sus siglas en inglés), es posible conectar otros sensores o dispositivos que se comuniquen con protocolos estándar, como es el caso del sensor de presión y temperatura descrito anteriormente que utiliza I2C. Específicamente, los pines 3 y 5 funcionan como SDA (*serial data*) y SCL (*serial clock*), respectivamente [50].



Figura 37: Módulo GPS RPI Add-on V2.0.

Para utilizar correctamente el módulo, es necesario realizar una configuración en la Raspberry Pi. Esto se hizo mediante el repositorio en GitHub que se encuentra como parte de la documentación de la Wiki de ITEAD. Se puede acceder a dicho repositorio en [51]. Una vez configurada la Raspberry Pi con todos los paquetes necesarios, se puede correr un simple comando `cgps -s` en la consola, con lo que se espera obtener una ventana similar a la que se muestra en la Figura 38.

Time:	2014-05-20T15:37:00.000Z	PRN:	Elev:	Azim:	SNR:	Used:
Latitude:	33. S	1	09	067	24	Y
Longitude:	151. E	3	10	139	27	Y
Altitude:	130.7 m	5	09	067	24	Y
Speed:	0.3 kph	6	10	139	27	Y
Heading:	0.0 deg (true)	7	12	271	24	Y
Climb:	0.0 m/min	8	09	067	24	Y
Status:	3D FIX (11 secs)	9	10	139	27	Y
Longitude Err:	+/- 1 m	10	12	271	24	Y
Latitude Err:	+/- 2 m	11	01	130	00	Y
Altitude Err:	+/- 5 m	13	09	067	24	Y
Course Err:	n/a	17	10	139	27	Y
Speed Err:	+/- 14 kph	19	12	271	24	Y
Time offset:	0.243					
Grid Square:	QF56ng					

Figura 38: Datos obtenidos del GPS si la instalación fue correcta.

Hay que considerar que el módulo GPS funciona con una antena que se coloca en el canal diseñado para este uso. Para obtener resultados óptimos, es necesario ubicar la antena fuera de los edificios y alejado de estructuras que limiten la señal. Al realizar pruebas en el laboratorio de física del Campus Central de la UVG, la antena fue colocada en la ventana y ahí se obtuvieron lecturas correctas.

Una vez instalado el detector en el volcán, su ubicación es fija por lo que sus coordenadas

de latitud, longitud y altitud permanecen constantes. En otras palabras, no es necesario hacer lecturas de geolocalización en tiempo real, sino más bien, conocer los datos de ubicación y del detector y escribirlos directamente en los archivos de datos .dat. Por tal motivo, en el volcán no fue implementado el GPS directamente. Sin embargo, el código para utilizarlo puede encontrarse en el repositorio en GitHub mencionado anteriormente, con el nombre de “serverGPS.py”.

14.3. Sensor de humedad

Una de las dificultades de mantener un sistema a distancia es que no se puede acceder a él para realizar reparaciones tan fácilmente como en otros casos. Por tal motivo, es necesario monitorear el sistema a través de sensores. Uno de los principales enemigos de la electrónica es la humedad, ya que esta puede corroer las placas y los componentes. Para conocer el nivel de humedad relativa en el sitio, y detectar posibles amenazas a la electrónica, se implementó un sensor de humedad -que además mide temperatura-. Este sensor es el módulo DHT11 comercializado por Adafruit, especialmente integrado para utilizarlo con la Raspberry Pi. Su hoja de datos puede encontrarse en [52], y en la Figura 39 se presenta el empaquetado del módulo.

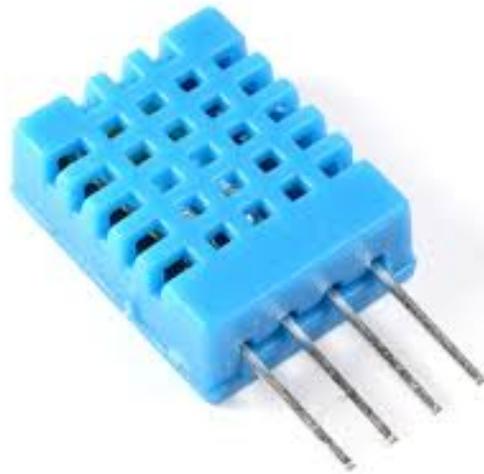


Figura 39: Empaquetado del módulo de humedad y temperatura DHT11.

Para su configuración y su uso con la Raspberry Pi, se siguieron los pasos de [53]. Esto incluye la descarga de librerías para la lectura de datos con Python y la conexión con los puertos GPIO del dispositivo. Dicha conexión requiere de una resistencia *pull-up* en el pin de salida, como se muestra en la Figura 40.

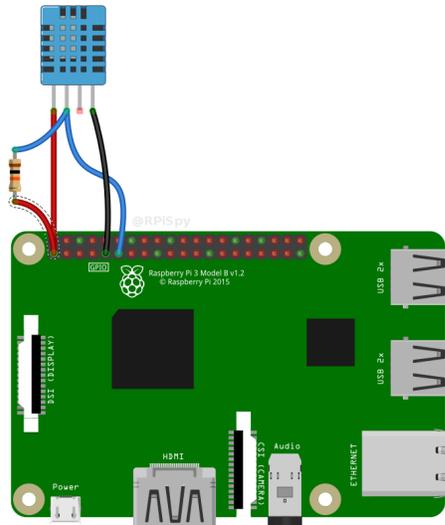


Figura 40: Conexión de módulo DHT11 con Raspberry Pi. Obtenido de [53].

Una lectura correcta del sensor ofrece la humedad relativa en porcentaje y la temperatura en grados Celsius.

14.4. Sensores de corriente

Otra de las cantidades importantes a monitorear a distancia es la corriente que consumen cada una de las cargas conectadas al sistema de distribución eléctrica. Por tal motivo, se implementaron junto con el módulo de potencia cinco sensores ACS712 capaces de medir hasta 5 A de corriente directa. Su hoja de datos se encuentra en [54]. El sensor se alimenta con 5 V y la salida es un voltaje que corresponde linealmente a la corriente medida. El empaquetado que se utilizó cuenta con un filtro pasivo que limpia la señal de salida antes de su lectura. Este se muestra en la Figura 41.

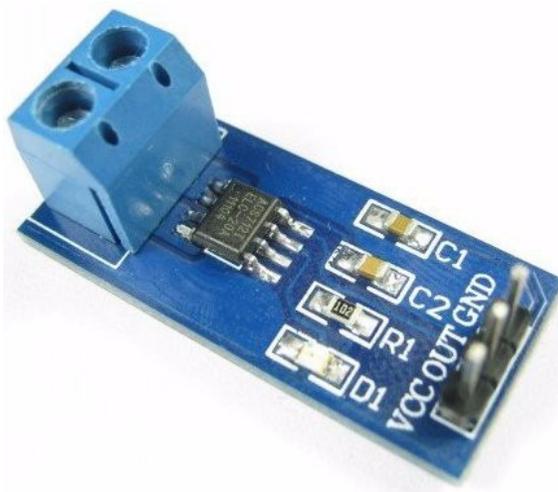


Figura 41: Empaquetado del sensor de corriente ACS712 con filtro en la señal de salida.

Aunque el montaje de estos sensores es tan sencillo como conectar las terminales en serie a la carga que se desea medir, la salida es analógica, por lo que no se puede leer directamente con los pines de la Raspberry Pi, que son solo digitales. Por tal motivo, se utilizó un Arduino Nano para obtener la lectura y luego enviar el dato a través del puerto serial de la Raspberry Pi. Esto se hizo mediante el código “corriente.ino” en el Arduino, y el código “seria_test.py” modificado para leer todos los datos correctamente.

14.5. Integración de sensores

Los datos obtenidos con un detector que sigue el estándar el Proyecto LAGO deben estar almacenados en un archivo de datos con extensión .dat, como se explica en capítulos anteriores. Estos archivos tienen un encabezado que entre otros datos, presentan la información de temperatura, presión absoluta y geolocalización del sitio. Si el detector cuenta con los sensores solicitados por el Proyecto LAGO, la escritura de estos datos se hace de manera automática. Sin embargo, como es el caso del detector instalado en el volcán Atitlán, los sensores no son los solicitados y la escritura no se hace de forma automática. Para solucionar esto, se realizó un código en Python que modifica los archivos de datos una vez obtenidos, añadiendo la información de los sensores implementados luego de hacer las lecturas. Además, se añade en los archivos de datos la geolocalización de forma directa, utilizando las coordenadas del sitio que permanecen constantes.

Una vez corregidos los archivos de datos, estos están listos para enviarse a través del enlace entre el volcán Atitlán y UVG Sur. Esta operación se hace en conjunto con el módulo de transmisión de datos, para enviar también un archivo de texto con las lecturas del sensor de humedad y temperatura, y los sensores de corriente, además de la fecha y hora de la captura de datos. Todo esto se condensa en el código en Python “getdata.py”, que se puede encontrar en el repositorio.

Como se mencionó anteriormente, el módulo GPS permite conectar otros sensores que utilizan protocolos de comunicación serial como I2C. Esta es la principal razón por la que, aunque el módulo no se implementa en tiempo real, sí se utiliza para obtener la lectura del sensor de presión y temperatura. Además, para el sensor de humedad se utiliza un pin GPIO de la Raspberry Pi, pero como se explica a través de la Figura 40, es necesario agregar una resistencia. Por esto se diseñó un circuito sencillo en placa perforada donde se soldó el módulo DHT11 junto con la resistencia, además de *headers* para conectarse con la Raspberry Pi, que se muestra en la Figura 42.

14.6. Resultados obtenidos de la instrumentación electrónica

La instrumentación electrónica referente a la adquisición de datos se implementó de forma correcta en la Raspberry Pi ubicada en el volcán Atitlán. Esto se muestra en los archivos de datos generados que cuentan con el encabezado corregido por el código “getdata.py”, donde los valores de presión absoluta y temperatura se obtienen directamente de la lectura de los sensores, y los campos de geolocalización se corrigen con la ubicación exacta del detector.

En cuanto a la instrumentación electrónica de monitoreo se refiere, la Raspberry Pi envía, junto con el archivo de datos generado cada hora, un documento de texto con el nombre “estado.txt”, que incluye la lectura del sensor de humedad relativa y temperatura y la lectura de los sensores de corriente conectados a todas las cargas. Un ejemplo de este archivo se muestran en el Anexo 26.2.

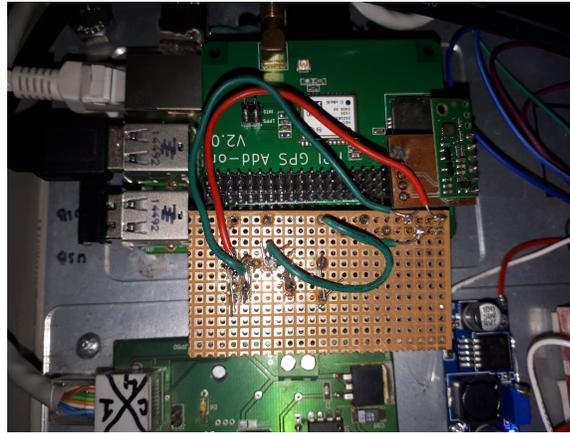


Figura 42: Fotografía de la placa perforada sobre el módulo GPS en Raspberry Pi.

En la siguiente figura se muestra la interconexión completa de la red de sensores.

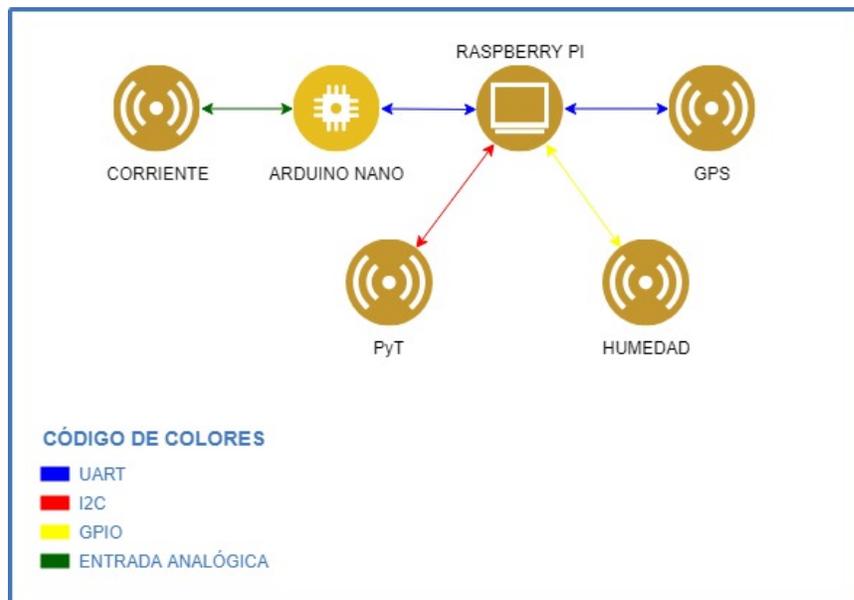


Figura 43: Diagrama de interconexión de la red sensores.

Sistema de comunicación

Un sistema de comunicación es empleado con el objetivo del traslado de la información de un lugar en específico a otro sitio. Este está conformado por tres elementos básicos: un transmisor, un medio o canal y un receptor [55].

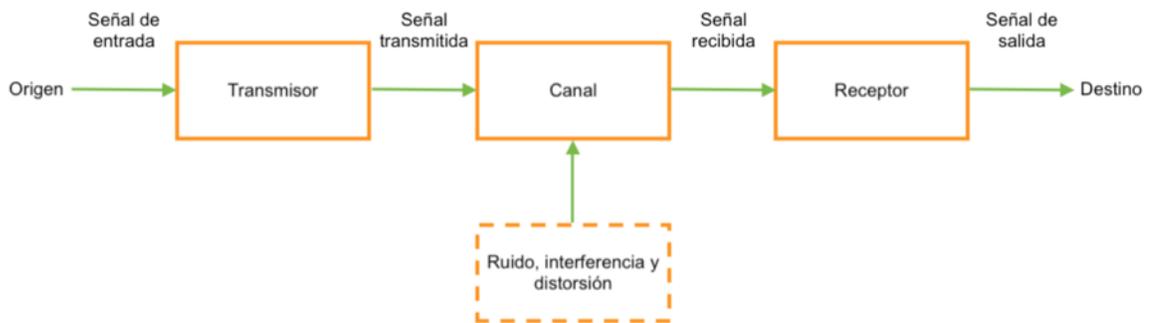


Figura 44: Diagrama de sistema de comunicación

El transmisor es la parte del sistema que recibe la información a enviar y se encarga de colocarla en el canal. Esta unidad es la responsable de modular la señal, codificarla para reducir la cantidad de errores en el envío, amplificarla y filtrarla si es necesario [56].

El canal es un medio a través del cual se transmite la información del transmisor al receptor; pudiendo ser cable coaxial, aire, fibra óptica, entre otros. Este elemento le introduce ruido a la señal, así como distorsión, atenuación e interferencia. En el canal se propaga la información por medio de señales electromagnéticas que tienen una determinada frecuencia, amplitud y longitud de onda; esto dependiendo del medio en donde se estén propagando [57].

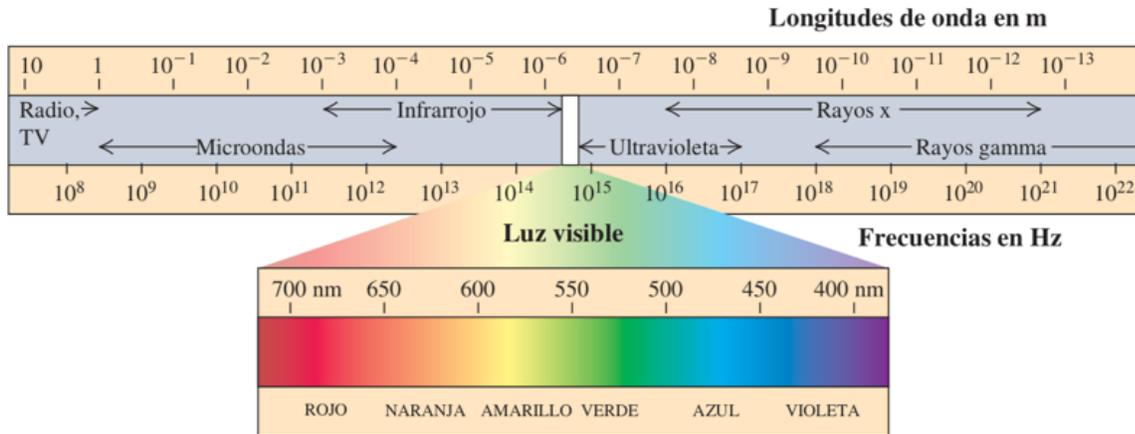


Figura 45: Espectro electromagnético

Frecuencia	Medio de propagación	Aplicación
100GHz – 1PHz	Fibra óptica	Datos de banda ancha
1GHz – 10GHz	Guías de onda/Línea de vista	Satélites, celular
1MHz – 1GHz	Coaxial/Radio	TV, FM
1Khz – 1Mh	Par trenzado/Onda terrestre	AM, Aeronáutica

Cuadro 14: Medios de propagación

El receptor es el encargado de recibir la señal, decodificarla, demodularla y reconstruir la señal enviada con base en la señal recibida [58].

Las características principales que se buscan tener en un sistema de comunicación son: la eficiencia de la transmisión, la reducción de ruido e interferencia, el uso adecuado del ancho de banda con el que se cuenta, y la capacidad de corregir errores para recibir una señal que contenga la información enviada [59].

15.1. Red

Una red es un sistema de comunicación con por lo menos dos estaciones, pudiendo contener más estaciones en puntos intermedios, que se pueden comunicar entre ellos. En este sistema de comunicación, cada dispositivo en la red es denominado nodo y la interconexión entre los nodos es llamada enlace de comunicación. Las redes se pueden subdividir en 4 tipos de redes: wide-area network (WAN), metropolitan-area network (MAN), local-area network (LAN) y personal-area network (PAN) [57].

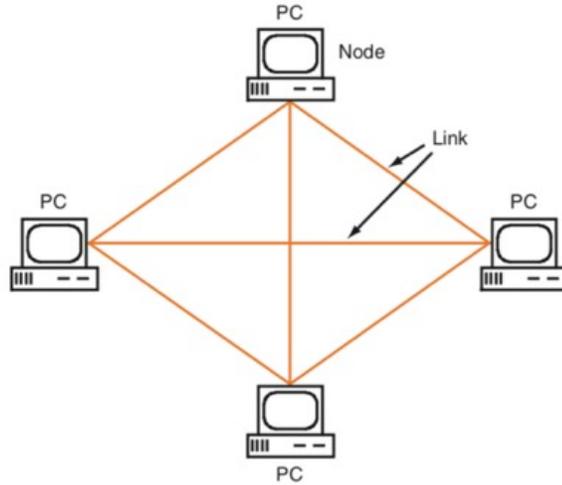


Figura 46: Elementos de una red

15.1.1. Modelo ISO/OSI

La arquitectura en la que está organizada una red es de capas y existe un modelo creado por la Organización Internacional de Normalización (ISO) que facilita trabajar con los protocolos de las diferentes partes del sistema complejo de la red. Este modelo cuenta con 7 capas las cuales separan de forma estructurada cada uno de los componentes de la red [60].



Figura 47: Modelo ISO/OSI

En la capa de aplicación se incluyen las redes de aplicación y sus protocolos; siendo los encargados de introducir en la red la información que se va a manejar. La capa de presentación y sesión pueden ser tomados en cuenta en la capa de aplicación ya que estos se dedican a asegurar que el mensaje enviado se pueda interpretar entre los dispositivos y exista una conexión entre ellos para el envío.

La capa de transporte mueve los mensajes entre dispositivos por medio de los protocolos UDP y TCP. En la capa de red se efectúa el proceso de traslado de datagramas entre dispositivos, siendo esto realizado por el protocolo IP. La capa de enlace de datos es donde se utiliza la dirección física de los dispositivos de enrutamiento para transportar un datagrama de uno a otro. Por último, la capa física es la encargada de trasladar cada uno de los bits que conforman al datagrama de un dispositivo a otro; siendo los protocolos de esta capa dependientes totalmente del medio en el que se está transportando la información [60].

Protocolo Secure Shell (SSH)

El protocolo secure Shell forma parte de las capas de aplicación y red y permite la comunicación entre dos dispositivos de forma segura empleando una arquitectura cliente/servidor. A diferencia de los protocolos FTP y Telnet, SSH tiene la capacidad de encriptar el mensaje que se está enviando para que un ente externo no pueda entender la información transmitida.

La característica principal que tiene el protocolo SSH es que usa encriptamiento de 128 bits para asegurar protocolos que no cuentan con encriptación [61].

15.1.2. Local-Area Networks (LAN)

Una red de área local es el tipo de red más pequeña ya que interconecta dispositivos que se encuentran dentro de un hogar, una oficina o un edificio. Esta conexión incluye dispositivos alambrados e inalámbricos que interconectan desde un par hasta cientos de dispositivos que se encuentran conectados a uno, o más, servidor(es) [57].

Los nodos se pueden conectar de diferentes formas, dependiendo de los caminos y métodos que se emplean en la red. Estas formas, denominadas topologías, pueden ser: estrella, anillo, bus y malla; siendo la topología de bus la que emplea un cable en donde se conectan los nodos y el envío de información es bidireccional.

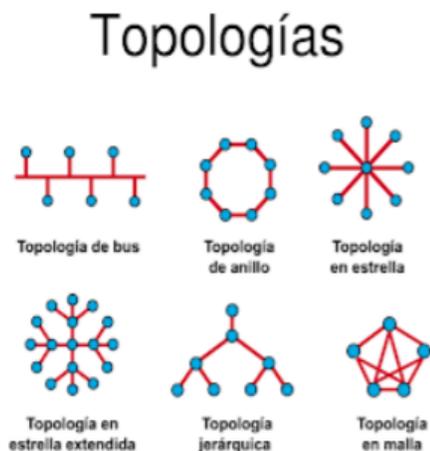


Figura 48: Topologías de una red

Hardware

Las redes de área local están conformadas por hardware; incluyendo computadoras, servidores, conectores, cables y dispositivos de enlace. La mayoría de LANs utilizan cables de cobre que se encargan de transmitir la información codificada en bits representados por un voltaje digital. Los cables más utilizados son el coaxial, fibra óptica y cable de par trenzado (UTP).

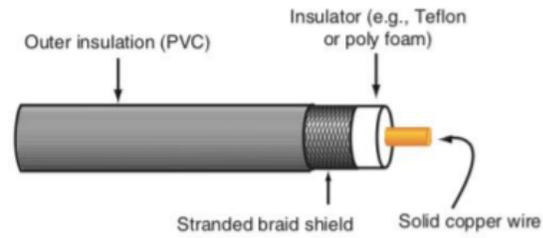


Figura 49: Cable coaxial

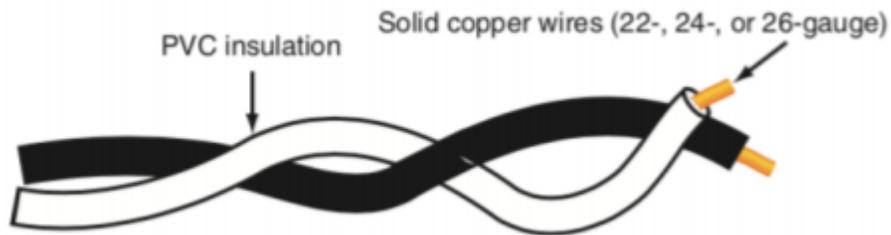


Figura 50: Cable de par trenzado (UTP)

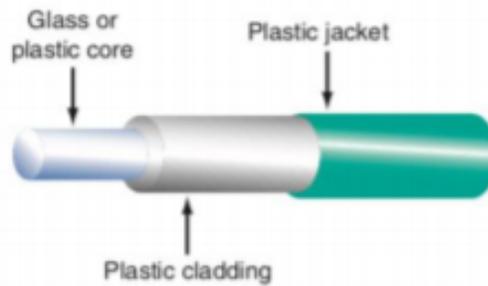


Figura 51: Fibra óptica

Los cables empleados tienen conectores terminales para conectarlos y desconectarlos de los equipos con facilidad. Los cables coaxiales utilizan conectores BNC y N, la fibra óptica termina con un conector FC, SMA, LC o SC y el cable de par trenzado usualmente termina con un conector RJ-11 o RJ-45.



Figura 52: Conector BNB y N

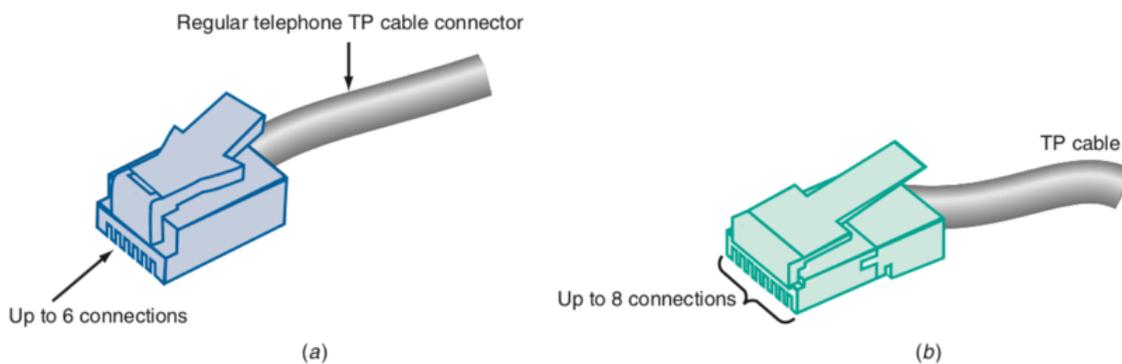


Figura 53: Conectores RJ-11 y RJ-45

Un puente (bridge) es un dispositivo de red que interconecta dos LANes con el mismo protocolo; es utilizado con el fin de mejorar el desempeño de la red pues segmenta una LAN en dos LANs pequeñas. En las redes de área local se utilizan los transceptores para convertir los bits de información a una señal de radio con el fin de transmitirla. El otro lado se reciben las señales de radio para luego traducirlas a bits y obtener la información enviada.

Ethernet

El cable utilizado en Ethernet es de par trenzado (UTP) que es la unión de dos cables aislados de cobre trenzados y su impedancia depende de qué tan fuerte es la trenza que los une. Este tipo de cable se encuentra separado en diferentes categorías dependiendo del ancho de banda con el que trabaja. Comúnmente, el cable utilizado en Ethernet es de categoría 5 (CAT5e); sin embargo, existe una versión mejorada denominada CAT5e. La

categoría 5 ofrece un ancho de banda hasta de 100Mbps/s en una distancia de hasta 100m; en donde se tiene una atenuación de -6.5dB utilizando 10 MHz y -22dB con 100 MHz. Otra categoría recientemente implementada, CAT6, trabaja con un ancho de banda de 250 MHz; sin embargo, la distancia del cable que permite implementar este ancho de banda es menor a 100 m [57].

El conector empleado en el cable de Ethernet es llamado RJ-45 y está compuesto por 8 terminales las cuales permiten que sea utilizado para terminar 4 pares trenzados.

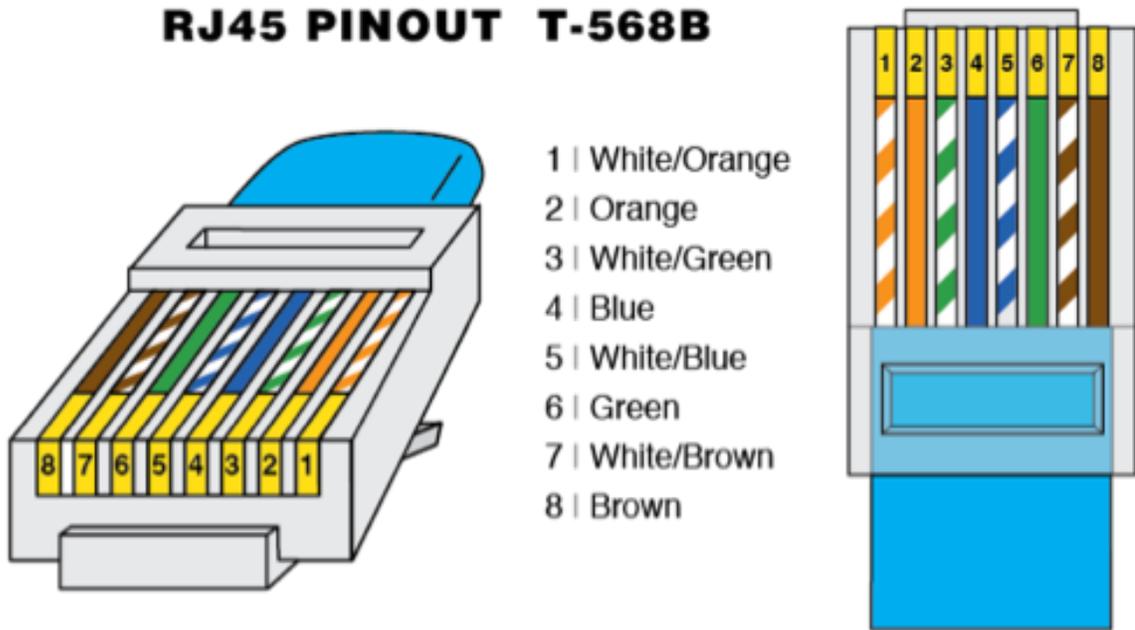


Figura 54: Pines de conector RJ45

15.1.3. Enlace punto a punto

Un enlace punto a punto es un enlace de red que se lleva a cabo entre dos nodos sin nodos intermediarios [62]. Para determinar si la implementación de un enlace es efectiva, se debe realizar un presupuesto de enlace en el que se toman en cuenta los dispositivos de transmisión y de recepción, el medio en el que se van a propagar la señal, la antena y el cable que interconecta los dispositivos de radio. Un enlace de radio consiste en tres elementos importantes: potencia de transmisión efectiva, la pérdida de propagación y la sensibilidad de recepción efectiva [63]. Estos valores se calculan de la siguiente forma:

$$Loss = 92.45 + 20 * \log(f) + 20 * \log(d) \quad (73)$$

En donde:

Loss = Pérdida del espacio libre
 f = frecuencia del enlace [GHz]

d = distancia entre los nodos [Km]

$$P = Pt - Cl + G \quad (74)$$

En donde:

P = Potencia de transmisión efectiva

Pt = Potencia de transmisión

Cl = Pérdida en cable

G = Ganancia antena

$$Lp = Loss \quad (75)$$

En donde:

Lp = Pérdida de propagación

Loss = Pérdida del espacio libre

$$S = G - Cl - Sr \quad (76)$$

En donde:

S = Sensibilidad de recepción efectiva

G = Ganancia antena

Cl = Pérdida en cable

Sr = Sensibilidad del receptor

El presupuesto de enlace involucra estas tres cantidades y al operarlas se obtiene el margen del enlace. Este valor debe de ser mayor a 0dB y para asegurar la efectividad del enlace, debe de ser mayor a 6dB.

$$Margen = P + Lp + S \quad (77)$$

En donde:

P = Potencia de transmisión efectiva

Lp = Pérdida de propagación

S = Sensibilidad de recepción efectiva

15.1.4. Red CLARA

La red de la Cooperación Latino Americana de Redes Avanzadas (CLARA) es el «espacio latinoamericano de colaboración y desarrollo para la educación, la ciencia y la innovación». Esta brinda interconexión regional y conexión al mundo por medio de enlaces internacionales, de altas capacidades, a: GÉANT (red avanzada paneuropea) y a Internet2 (Estados Unidos de América), y con ayuda de estos se enlaza a UbuntuNet Alliance, WACREN, ASREN (redes avanzadas de África); APAN, TEIN, CAREN (Asia) y AARNET (Oceanía) (RedCLARA, RedCLARA: el espacio latinoamericano de colaboración y desarrollo para la educación, la ciencia y la innovación, s.f.).

La RedCLARA está conformada por 13 países latinoamericanos, incluyendo Guatemala con la Red Avanzada Guatemalteca para la Investigación y Educación (RAGIE). RAGIE, a su vez, está conformada por centros de investigación, universidades - incluyendo a la Universidad del Valle de Guatemala - y otras instituciones guatemaltecas que se dedican a la investigación y educación con el principal objetivo del intercambio de información, recursos humanos y físicos, con fines científicos y educativos [64].

15.2. Antena

Una antena es un dispositivo utilizado para la transmisión y recepción de ondas electromagnéticas que adapta la salida del emisor o la entrada del receptor al canal de transmisión [65]. Hay varios tipos de antenas con diferentes características. Las antenas parabólicas tienen ganancia y directividad alta y se emplean en enlaces de comunicación con ondas de radio. Estas constan de dos partes: un reflector parabólico y un mecanismo de alimentación. A la primera parte se le irradian las ondas electromagnéticas y en la segunda parte se encierra la antena que consta de un dipolo o par de dipolos [66].

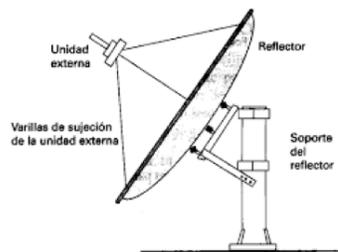


Figura 55: Partes de una antena parabólica

15.2.1. Eficiencia de una antena

En los reflectores parabólicos, hay una parte de la señal que se absorbe en el plano y no es irradiada ya que la superficie no es perfecta. La eficiencia se calcula tomando la potencia irradiada por la antena en relación con la potencia irradiada por el mecanismo de alimentación [66].

15.2.2. Ganancia de potencia de una antena

La ganancia de potencia de una antena parabólica es inversamente proporcional a la longitud de onda empleada al cuadrado. Por lo que el tamaño del plato utilizado es una característica que se involucra al momento de diseñar antenas parabólicas.

$$A_p = \eta * \frac{\pi * D^2}{\lambda} \quad (78)$$

En donde:

A_p = Ganancia de potencia con respecto a una antena isotrópica

η = Eficiencia de la antena

D = Diámetro de la boca del reflector parabólico [m]

λ = Longitud de onda [m]

15.2.3. Diagrama de radiación

El diagrama de radiación es la representación gráfica de las características de radiación de una antena con respecto a la dirección angular. Esta representación se emplea en coordenadas esféricas y puede graficarse tanto en escala logarítmica como en lineal [67].

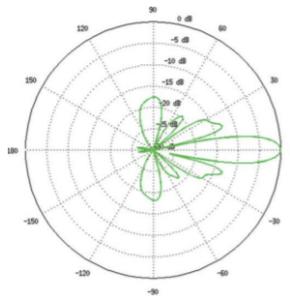


Figura 56: Ejemplo de diagrama de radiación de una antena parabólica

15.2.4. Zona de Fresnel

Para llevar a cabo un enlace punto a punto, no es suficiente con determinar si se cuenta con línea de vista ya que las ondas electromagnéticas que se propagan en el medio pueden tender a rebotar en obstáculos. La zona de Fresnel es un elipsoide en revolución en donde la fase de la señal es mayor a 0° . Se denomina primera zona a aquella en la que la fase de la onda transmitida es menor a 180° . En esta zona se puede producir una interferencia destructiva. La segunda zona de Fresnel es aquella en donde el desfase de la señal es de hasta 360° . Dentro de esta zona se produce interferencia constructiva [68].



Figura 57: Zona de Fresnel

$$r_1 = 8.657 * \sqrt{\frac{D}{f}} \quad (79)$$

En donde:

D = distancia entre las ubicaciones [km]

f = frecuencia de transmisión [GHz]

r_1 = radio de la primera zona de Fresnel [m]

15.3. AirGrid® M de Ubiquiti Networks®

Ubiquiti Networks® es una empresa estadounidense que fabrica y distribuye dispositivos electrónicos empleados para la implementación de redes inalámbricas. Los productos que elabora son enrutadores (routers), conmutadores (switches), radios, servidores, teléfonos IP, cámaras inalámbricas, interruptores y antenas; entre otros [62].

El AirGrid® M es un radio de la empresa Ubiquiti Networks que está contenido en la división de AirMax. Este dispositivo tiene integrado completamente el sistema de radio en el centro de la antena y utiliza el InnerFeed de Ubiquiti junto con la tecnología airMax® (protocolo TDMA) para formar un CPE (equipo local del cliente) robusto. El equipo AirGrid® M puede trabajar tanto en la banda de 2GHz como en la de 5GHz dependiendo del radio que se adquiera. Los radios ofrecen un funcionamiento de hasta 100Mbps en una distancia de hasta 30Km [69].



Figura 58: AirGrid® M

15.3.1. Ubiquiti Networks® airMax TDMA

El protocolo que utiliza el AirGrid® M es denominado Ubiquiti Networks® airMax Time Division Multiple Access (TDMA) y es el encargado de asignar un espacio de tiempo determinado a cada uno de los dispositivos que trabajan como clientes para que envíen y reciban información [70].

Ya que los dispositivos AirGrid® M se utilizan en ambientes externos, los puentes inalámbricos (bridges) conectados a un punto de acceso (access point) sufren de interferencia por lo que hay momentos en los que el enlace no puede acceder a la red. Esto provoca colisiones frecuentes de paquetes en el lado del punto de acceso (access point) pues hay momentos en que dos dispositivos están transmitiendo al mismo tiempo, aumentando la latencia y los errores. Esta es la razón por la que con TDMA, se asigna un espacio de tiempo a cada dispositivo para que se conecten y no haya intercambio de información de dispositivos en simultáneo [70].

15.3.2. Modulación

Al momento de elegir una potencia de transmisión determinada en el Access Point de la red y empleando un protocolo airMax TDMA, se tiene un esquema de modulación y codificación (MCS) predeterminado pues se utiliza el estándar 802.11n. Dentro de este esquema se definen 77 MCS; sin embargo, los equipos de Ubiquiti Networks® solamente emplean 8 de estos. Al momento de determinar un MCS, se establece el tipo de modulación, la tasa de codificación y los intervalos de guardia que se van a utilizar.

El tipo de modulación puede ser tanto BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM; siendo el primero el que emplea 2 símbolos con 1 bit cada uno, el segundo utiliza 4 símbolos con 2 bits cada uno, el tercero con 16 símbolos de 4 bits cada uno y el último con 64 símbolos de 6 bits. La tasa de codificación depende de la modulación seleccionada e indica la cantidad de bits transmitidos con respecto a los bits que se tienen de información [71]. Los intervalos de guardia son empleados para que no haya interferencia entre frecuencias.

Data rate	TX promedio	Modulación	Tasa de codificación	Intervalos de guardia 800 ns	Intervalos de guardia 400 ns
MCS0	25 dBm	BPSK	1/2	6.5	7.2
MCS1	25 dBm	QPSK	1/2	13	14.4
MCS2	25 dBm	QPSK	3/4	19.5	21.7
MCS3	24 dBm	16-QAM	1/2	26	28.9
MCS4	23 dBm	16-QAM	3/4	39	43.3
MCS5	22 dBm	64-QAM	2/3	52	57.8
MCS6	21 dBm	64-QAM	3/4	58.5	65
MCS7	19 dBm	64-QAM	5/6	65	72.2

Cuadro 15: Modulación AirGrid® M5

15.3.3. Especificaciones físicas y eléctricas

Característica	Información
Característica de empaquetamiento	Plástico para exteriores
Kit de montadura	Montadura de tubo
Consumo máximo de potencia	3W
Alimentación	24V, 0.5A adaptador PoE
Método de alimentación	Passive power over ethernet
Temperatura de operación	-30°C a 75°C
Humedad de operación	5 a 95 %

Cuadro 16: Especificaciones físicas y potencia, AirGrid® M5

15.3.4. Especificaciones de red

Característica	Información
Dimensiones	370 x 270 x 260 mm
Peso	1452 g (3.201 lb)
Resistencia al viento	200 km/h
Frecuencia de operación	5170 a 5875 MHz
Ganancia	23 dBi

Cuadro 17: Especificaciones AirGrid® M5

15.3.5. Diagrama de radiación

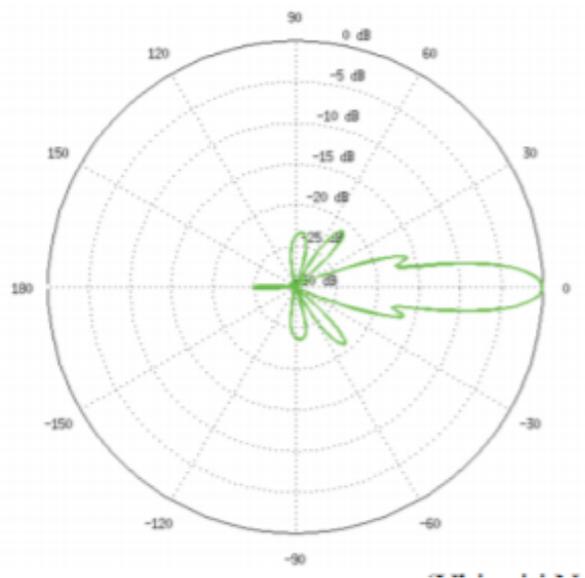


Figura 59: Diagrama de radiación ángulo azimutal de AirGrid® M

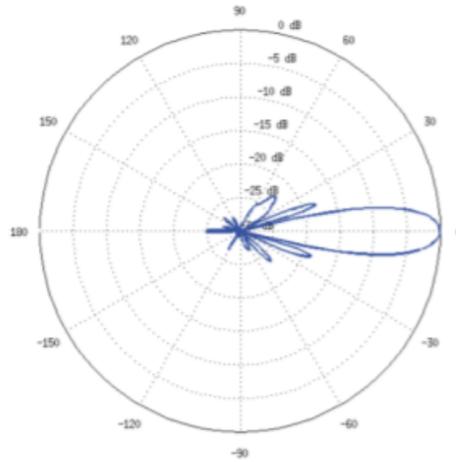


Figura 60: Diagrama de radiación ángulo de elevación de AirGrid® M

15.3.6. Power Over Ethernet (PoE)

Es una tecnología implementada en redes LAN que utilizan cable ethernet para proveer energía de corriente directa (DC) a los elementos remotos que se encuentran en la red [57]. Ubiquiti Networks provee junto con sus dispositivos, un adaptador PoE que provee un voltaje de 24V y una corriente de 0.5A. Este elemento se alimenta de 90-260 VAC con una corriente 0.3A @ 120 VAC [69].

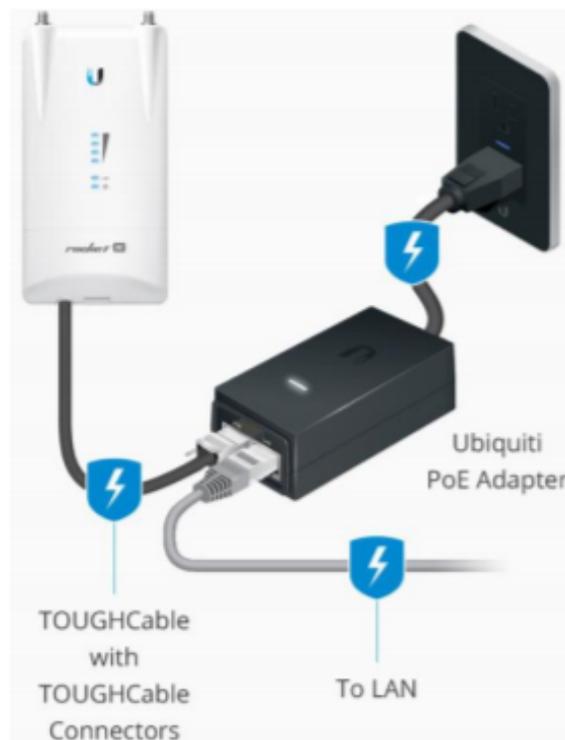


Figura 61: Power over Ethernet

15.3.7. AirOS 6

El airOS es el sistema operativo que se encuentra en los equipos de serie M de Ubiquiti Networks®. La versión 6 de este se lanzó en diciembre del 2016 y al ingresar a este por medio de un navegador, su interfaz gráfica despliega 7 pestañas: logo de Ubiquiti Networks®, principal (main), inalámbrico (wireless), red (network), avanzado (advanced), servicios (services) y sistema (system).

En la pestaña de logo de Ubiquiti Networks® se encuentran opciones de airMAX®, airSelect® y airView®. El primero proporciona un mejor funcionamiento de la red con más usuarios y menos latencia. airSelect® tiene la capacidad de cambiar el canal inalámbrico de forma dinámica para evitar interferencia. Por último, airView® es el analizador de espectros que viene integrado en los dispositivos de Ubiquiti Networks® y se utiliza para analizar el ruido ambiental que se tiene en el espectro de radio y seleccionar la frecuencia óptima para la red [72].

La ventana principal (main) contiene un resumen del estado del enlace (link). Este tiene información acerca del modo de operación con que se configuró al radio, configuraciones de red y estadísticas de tráfico de la información tanto recibida como enviada. Por otro lado, inalámbrico (wireless) es el apartado en donde se encuentra la selección del modo de funcionamiento del dispositivo en la red (access point, station, repeater), el nombre de la red (SSID), el código del país en donde se utiliza el dispositivo, el modo de IEEE 802.11n, el ancho de banda del canal, la frecuencia en la que se va a establecer el envío y la recepción de datos, la potencia de la antena, el tipo de antena que se tiene y el tipo de seguridad que se le va a aplicar a la red (WEP, WPA2-AES, WPA-AES o ninguna) [72].

La pestaña de red (network) presenta apartados para seleccionar el modo de la red (router, bridge, SOHO router), si se quiere deshabilitar una interfaz de la red, la forma en la que se configura la red (sencilla – simple o avanzada - advanced), el manejo de la dirección IP (DHCP, manual), la dirección IP, netmask, Gateway IP, servidor DNS [72]. En avanzado (advanced) se encuentran configuraciones inalámbricas avanzadas como la distancia en la que se encuentran los dispositivos separados, la sensibilidad del límite. También se tiene la configuración de la velocidad de la LAN y el límite de los LEDs utilizados como señales [72].

En la pestaña de servicios (services) se encuentran opciones de configuración del servidor web, ssh y telnet que la antena puede utilizar, el agente SNMP y el ping watchdog. Por último, en sistema (system) se puede observar la versión del firmware, el nombre del dispositivo, el nombre del administrador y se puede configurar la hora y latitud y longitud en donde se encuentra el dispositivo [72].

15.4. Metodología

15.4.1. Determinación de ubicación de los equipos de red

Debido a la dificultad de llegar al detector, obtener los datos y llevarlos a la Universidad del Valle de Guatemala (Campus Central) para su análisis, se diseñó un enlace punto a punto para el envío automático de la información. El sistema de comunicación implementado se

llevó a cabo partiendo de la ubicación exacta del detector de rayos cósmicos; siendo esta la reserva biológica “El Quetzal”, con coordenadas geográficas 14.548159^o, -91.193532^o.

Se procedió a establecer el lugar en donde se iban a recibir los archivos generados por el mismo. Era necesario encontrar un lugar donde el equipo de recepción estuviera seguro. En base a este criterio, se tomó como primera opción el campus Sur de la Universidad del Valle de Guatemala que se encuentra en el kilómetro 92.5, carretera a Mazatenango. Para determinar si este lugar era adecuado, se desarrolló un perfil de elevación, que permitiría determinar si se contaba con línea de vista.



Figura 62: Perfil de elevación

15.4.2. Adquisición de radiofrecuencia

Con los perfiles de elevación obtenidos y conociendo que se tenía un camino despejado para realizar un enlace punto a punto, se procedió a obtener la radiofrecuencia en la que se transmitirían los datos. Esta fue proporcionada por la Superintendencia de Telecomunicaciones (SIT) con base al pie de página GTM-6 de la tabla nacional de atribución de frecuencias radioeléctricas [73].

Banda	Frecuencia central
13,553 – 13,567 kHz	13,560 kHz
26,957 – 27,283 kHz	27,120 kHz
40.66 – 40.70 MHz	40.68 MHz
902 – 928 MHz	915 MHz
2,400 – 2,500 MHz	2,450 MHz
5,725 – 5,875 MHz	5,800 MHz
24 – 26.65 GHz	25.325 GHz

Cuadro 18: Pie de página GTM-6

Este enlace se realizó en la frecuencia de los 5GHz ya que esta permite la realización de enlaces a larga distancia.

15.4.3. Diseño de enlace

Previo a implementar un enlace punto a punto, es necesario elaborar un presupuesto de enlace en el que se tomen en cuenta las variables de potencia de transmisión, pérdidas en cable, pérdidas en la trayectoria de espacio libre y ganancia de la antena de transmisión y de recepción de los equipos.

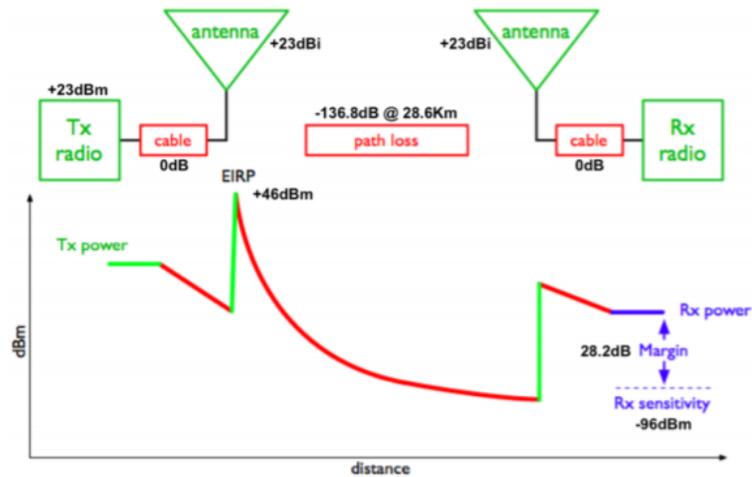


Figura 63: Presupuesto de enlace inalámbrico

15.4.4. Montaje de equipo de red

El instituto International Centre for Theoretical Physics (ICTP) donó los equipos para trabajar con la frecuencia de 5 GHz. Esto constan de dos radios AirGrid® M5 con una ganancia de antena 23dBi, modelo AG-HP-5G23.

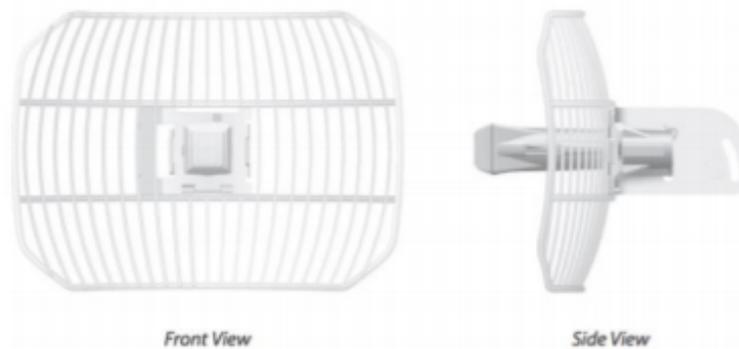


Figura 64: AirGrid® M5 23dBi

Estos equipos se ensamblaron y montaron con el kit de montura que provee Ubiquiti Networks® junto con los radios. Este contenía un reflector de parrilla, una alimentación de antena, carcasa, soporte en L, abrazadera para el tubo, abrazadera en U, PoE, tornillos y

cable de poder. Para instalar la montura se utilizó el documento Quick Start Guide AG-HP-5G23 que provee la empresa en el enlace: https://dl.ubnt.com/guides/airgrid/airGrid_AG-HP-5G23_QSG.pdf.



Figura 65: AirGrid® M con kit de montadura

15.4.5. Configuración de equipo de red situado en reserva biológica “El Quetzal”

Se conectó la alimentación eléctrica a cada uno de los radios y se realizó la configuración de los mismos. Para esto, fue necesario utilizar un navegador web para acceder al software airOS® que viene con el equipo, ingresando en la barra de direcciones la dirección IP del radio conectado al ordenador por el cable Ethernet. El puerto Ethernet del ordenador se configuró con la dirección IP 192.168.1.7. Se podía utilizar cualquier dirección dentro de la red privada 192.168.1.X; exceptuando las direcciones 192.168.1.1 y 192.168.1.20 pues son las direcciones que vienen de forma predeterminada para ingresar a los airRouters® y demás dispositivos de Ubiquiti Networks®.

Al encender por primera vez el radio AirGrid® M5, se ingresó a un navegador web y se introdujo la dirección IP 192.168.1.20 en la barra de direcciones. Inmediatamente, la pantalla de inicio del software airOS® 6 apareció en el navegador y se introdujo el nombre de usuario, la contraseña del dispositivo, el país en donde se ubica el radio y el idioma del software. Por defecto, el nombre de usuario y la contraseña de los dispositivos son el acrónimo ubnt (Ubiquiti Networks).



Figura 66: Pantalla de inicio airOS6

Habiendo ingresado los datos anteriores, la pantalla principal (Main) se desplegó en el navegador, mostrando el estado del radio previo a estar interconectado a otro dispositivo.



Figura 67: Pestaña Main - Radio situado en reserva biológica

Se ingresó a la pestaña denominada inalámbrico (Wireless) y se configuró como estación el dispositivo en el apartado de wireless mode. Asimismo, se habilitó la opción de modo de puente transparente (Transparent Bridge Mode), se estableció el método de seguridad para el dispositivo y como identificador (SSID) el nombre 'LAGOUVG'. Se asoció el dispositivo a un Access Point por medio de la dirección MAC del otro radio, se determinó la radio

frecuencia, la potencia de transmisión y el tipo de antena con los que se iba a trabajar.

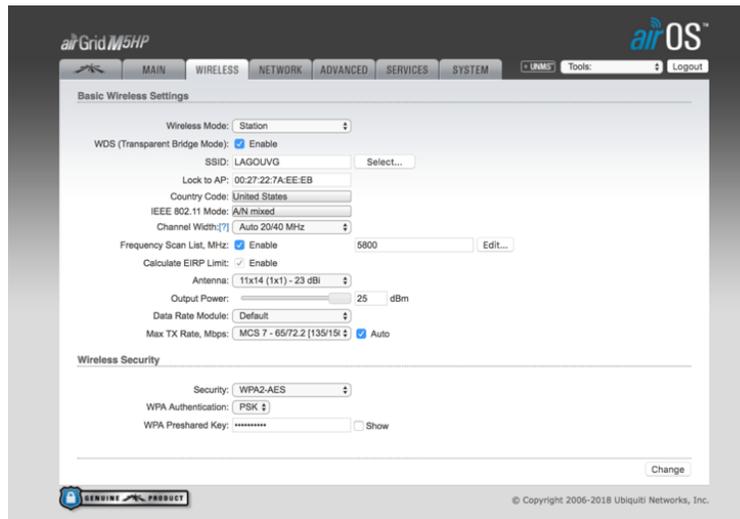


Figura 68: Pestaña Wireless - Radio situado en reserva biológica

En la pestaña de red (Network), se determinó que el modo de operación en la red iba a ser de puente (bridge) y que se iba a configurar en modo simple. En esta pestaña se cambió la dirección IP del radio a 192.168.1.4 con una máscara (netmask) 255.255.255.0 y se estableció la dirección de compuerta (gateway) como 192.168.1.1.

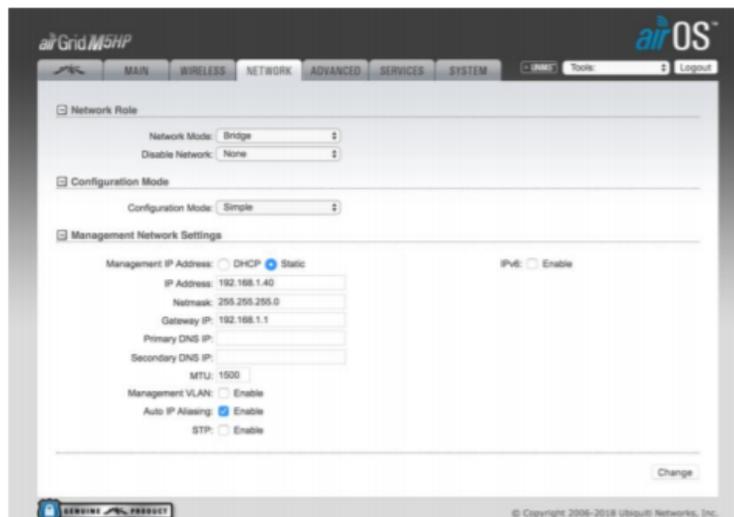


Figura 69: Pestaña Network - Radio situado en reserva biológica

En las pestañas de avanzado y servicios (Advanced, Services) no se hicieron modificaciones. Por último, en la última pestaña llamada sistema (System); solamente se configuraron el nombre del dispositivo y administrador como 'LAGOATI', la contraseña, la ubicación exacta del mismo por medio de coordenadas geográficas y la fecha y hora.

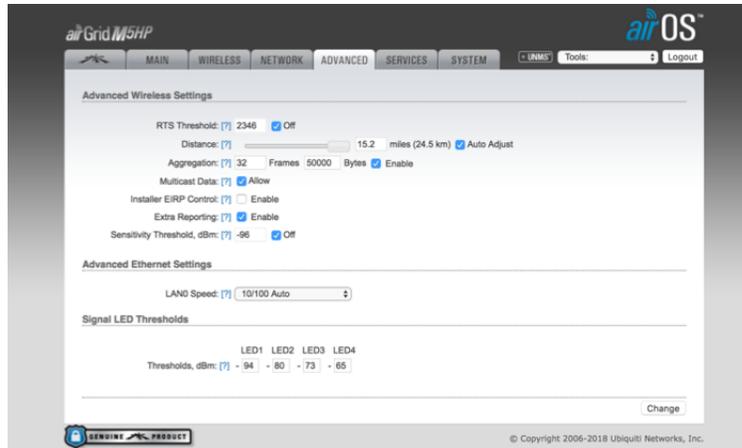


Figura 70: Pestaña Advanced - Radio situado en reserva biológica

15.4.6. Configuración de equipo de red situado en Universidad del Valle de Guatemala (Campus Sur)

La configuración del radio que fue situado en la Universidad del Valle de Guatemala (Campus Sur), fue llevada a cabo de la misma forma que la configuración del dispositivo de la reserva biológica. La diferencia en la pestaña Wireless fue que se configuró el dispositivo como punto de acceso (access point AP). En Network se configuró la dirección IP 192.168.1.6. Las pestañas de Advanced y Services no tuvieron modificaciones y en System solamente se ingresaron las coordenadas de la Universidad del Valle de Guatemala (Campus Sur), con coordenadas geográficas 14.330780, -91.058077, y el nombre del dispositivo y administrador como 'LAGOSUR', y la contraseña.



Figura 71: Pestaña Main - Radio situado en UVG Sur

15.4.7. Configuración de red

Para implementar el sistema de comunicación, la red creada constó de los siguientes dispositivos y su correspondiente dirección IP:

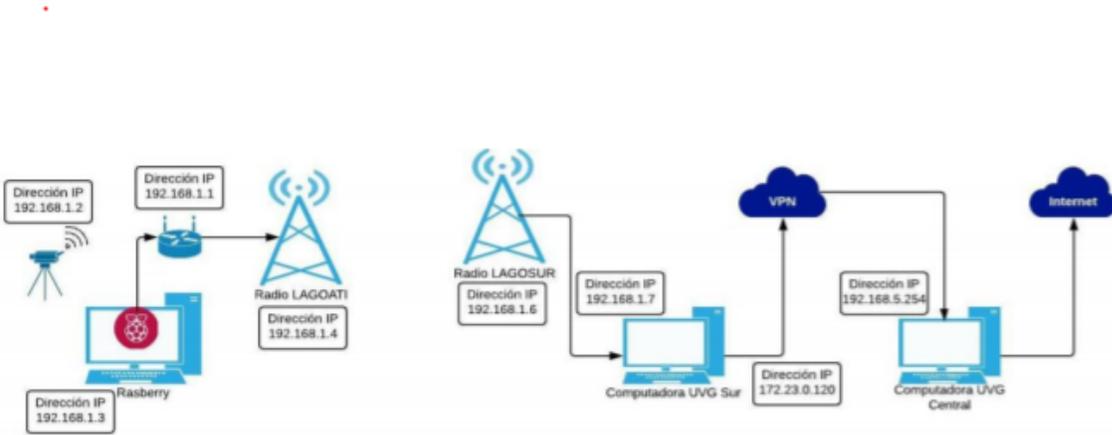


Figura 72: Configuración de red

15.4.8. Pruebas de envío

Habiendo configurado los dispositivos de red, se procedió a realizar pruebas en diferentes puntos de la ciudad de Guatemala para evaluar su desempeño. Estas se llevaron a cabo desde la Universidad del Valle de Guatemala Campus Central (14.6028077, -90.5144623), hacia 1) el edificio Neo Apartamentos situado en la Zona 10 (14.591671, -90.505216), a una distancia de 2.2Km de la universidad, y 2) el Mirador de San Lucas Sacatepéquez (14.6010991, -90.6334519), situado a 15.6Km de la universidad.

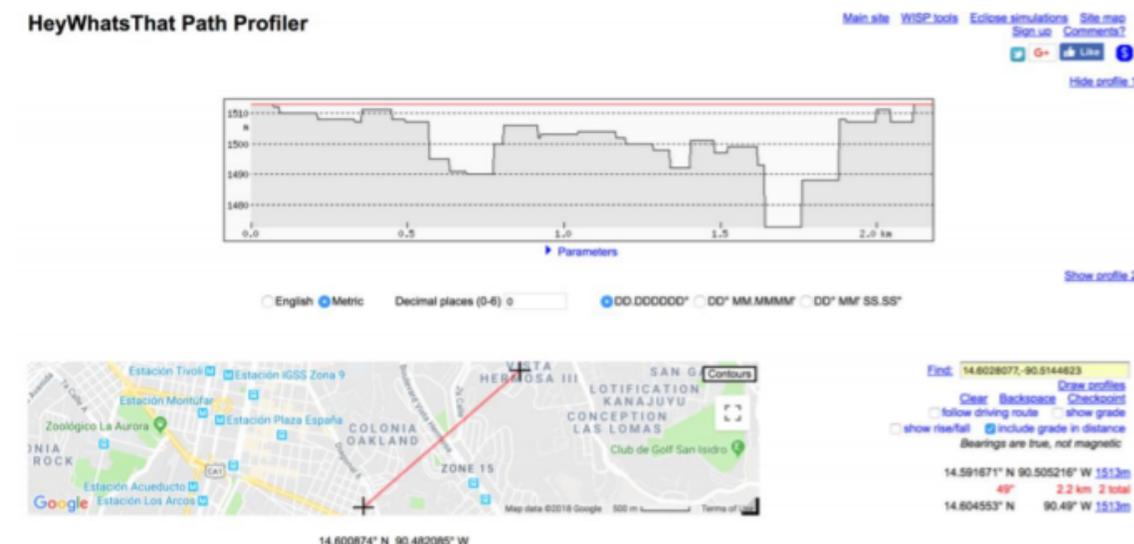
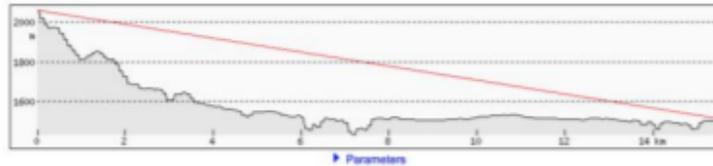


Figura 73: Mapa de elevación – Prueba hacia el edificio de apartamentos Neo

HeyWhatsThat Path Profiler

[Main site](#) [WSP tools](#) [Eclipse simulations](#) [Site map](#)
[Sign up](#) [Comments!](#)
[Like](#) [Follow](#) [Info](#)
[Hide profile 1](#)



English Metric Decimal places (0-6) 0 DD.DDDDD° DD° MM.MMM' DD° MM' SS.SS"

[Show profile 2](#)



14° 37' 1.7" N 90° 28' 25.63" W

First: 14.605261, -90.486769
[Clear background](#) [Show profiles](#)
 follow driving route show grade
 show rise/fall include grade in distance
 Bearings are true, not magnetic
 14° 36' 5.08" N 90° 38' 0.31" W 2081m
 89° 15.6 km 16 total
 14° 36' 18.95" N 90° 28' 19.57" W 1510m

Figura 74: Mapa de elevación – Prueba hacia el Mirador de San Lucas Sacatepéquez

Posteriormente, se ubicaron de forma definitiva el radio denominado como LAGOSUR en la Universidad del Valle de Guatemala (Campus Sur), y el radio LAGOATI en la reserva biológica “El Quetzal”. Para calcular el ángulo de elevación de las antenas se utilizó un triángulo rectángulo junto con los niveles sobre el nivel del mar de cada una de las ubicaciones. Este fue de 2.6° con respecto a la horizontal para el radio situado en Campus Sur, y de -2.6° con respecto a la horizontal para el radio ubicado en la reserva. Para determinar la orientación de cada una se utilizó la herramienta de regla en el software Google Earth, que indicó el ángulo que debía de tener el dispositivo como 328.61° con respecto al norte.

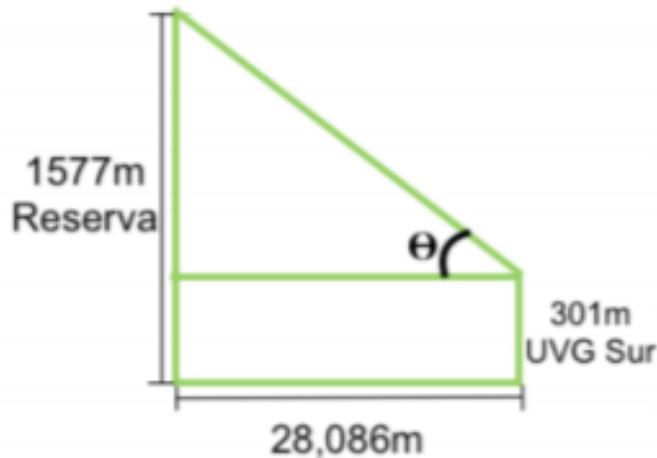


Figura 75: Cálculo ángulo de elevación

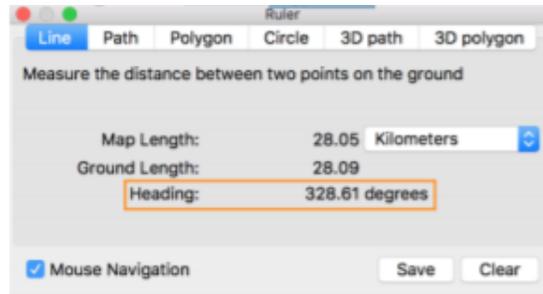


Figura 76: Cálculo ángulo de orientación



Figura 77: Ubicación de radio en UVG Campus Sur



Figura 78: Ubicación de radio reserva biológica “El Quetzal”

Por último, se procedió a conectar cada uno de los dispositivos a la fuente de poder y a un ordenador. El radio situado en la reserva biológica se conectó a un Raspberry Pi vía cable Ethernet y se le asignó la dirección IP 192.168.1.5. El dispositivo que se encontraba en la Universidad del Valle (Campus Sur) se conectó a un ordenador que contaba con la dirección IP 192.168.1.7. Se reorientaron los radios hasta obtener la señal óptima requerida, indicada por las luces LED que tienen integradas. La luz roja indica que la señal es de más

de -94dBm, la anaranjada que la potencia de la señal es mayor a -80dBm, la siguiente verde indica una señal mayor a -73dBm y por último, la otra luz verde señala que se tiene una potencia de más de -65dBm. Si se tienen estos valores de la potencia de la señal, el enlace está funcionando de forma adecuada ya se asegura que la tasa de bits de envío es mayor a la sensibilidad del radio; es decir, la potencia de la señal es mayor a la potencia mínima que requiere el radio para recibir la señal.



Figura 79: Luces LED incorporadas en AirGrid® M

Para determinar la calidad del enlace, se tomó en cuenta la potencia de la señal (signal strength) y la transmisión de calidad de conexión del cliente (transmit CCQ) en la pestaña principal (Main) del airOS 6. El primer valor indicaba en dBm la intensidad de la señal del enlace; la segunda cantidad representaba la eficacia del uso del ancho de banda en porcentaje. Es decir, la calidad de conexión del cliente (CCQ) es un promedio ponderado entre el tiempo estimado teórico de transmisión con respecto al tiempo real de transmisión. Por lo que se traduce a la cantidad de paquetes que se enviaron sin tener que ser retransmitidos en el medio a causa de ruido e interferencia.

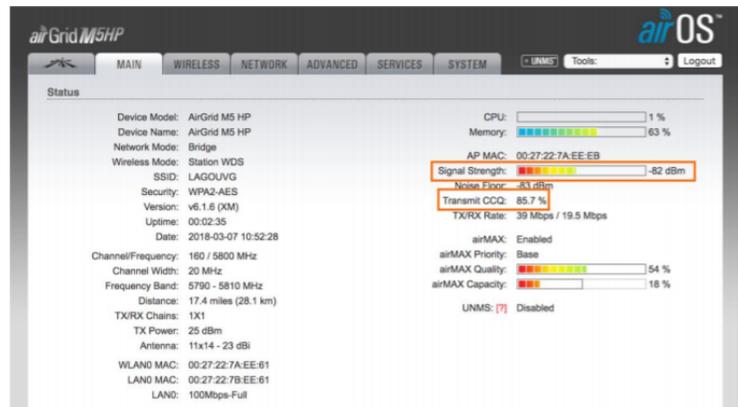


Figura 80: Potencia de la señal y CCQ en airOS6

15.4.9. Pruebas de envío desde volcán Atitlán hacia UVG Sur

Los datos generados por el detector de radiación situado en el volcán Atitlán se transfieren a la computadora localizada en el campus Sur de la Universidad del Valle de Guatemala.

Esto se realizó por medio de un programa desarrollado en Python; que permitió la conexión remota a la raspberry Pi del volcán Atitlán. Por medio del ambiente seguro ssh (secure shell), se utilizó la instrucción get para obtener los archivos que se encontraban almacenados en el ordenador del volcán.

15.4.10. Pruebas de envío desde UVG Sur hacia UVG Central

El traslado de los archivos obtenidos desde el volcán Atitlán hacia la Universidad del Valle de Guatemala (Campus Central) se realizó por medio de la ejecución de un programa en Python, corriendo en la computadora situada en el Campus Sur. Este programa conectaba de forma remota a la computadora situada en el campus Central por medio de ambiente seguro ssh (secure shell) que realizaba una instrucción de grabar o guardar put el archivo que contenía los datos generados por el detector. La conexión entre los dispositivos fue posible por una VPN (red virtual privada) que la universidad tiene ya configurada y conectaba directamente a los dispositivos de red de la Universidad del Valle de Guatemala (Campus Sur) con los equipos situados en el Campus Central.

15.4.11. Pruebas de envío a repositorio del proyecto LAGO

El repositorio de datos oficial de la comunidad LAGO se encuentra situado en una plataforma DSpace, ubicada en Colombia. Allí deben almacenarse todos los documentos que estén relacionados con los datos captados por el detector. El acceso se logra por medio del uso de una terminal, utilizando la instrucción de ambiente seguro (secure shell) ssh uvg@lagoproject.uis.edu.co. Habiendo entrado con el usuario de la Universidad del Valle de Guatemala (uvg) y la contraseña respectiva, se navegó con la instrucción cd (change directory) dentro de las carpetas dspace, hasta llegar a uvg. Dentro de esta carpeta se encuentra el sitio en donde se almacenan los archivos generados por la universidad.

Para realizar una prueba de envío hacia el repositorio, se colocó en la terminal de la computadora situada en la Universidad del Valle de Guatemala (Campus Central) el la instrucción de copia segura como se observa en la siguiente figura, para cargar un archivo de ejemplo generado por un detector que se encontraba en Bariloche, Argentina. La conectividad a estos sitios es provista por la Red Avanzada Guatemalteca para la Investigación y Educación (RAGIE).

```
biologia@biologia-OptiPlex-790:~/Descargas$ scp nahuelito_2013_06_03_21h00.dat u
vg@lagoproject.uis.edu.co:/dspace/sites/uvg
uvg@lagoproject.uis.edu.co's password:
Could not chdir to home directory /home/uvg: No such file or directory
nahuelito_2013_06_03_21h00.dat 17% 59MB 487.6KB/s 09:36 ETA
```

Figura 81: Carga de archivo de ejemplo a repositorio LAGO

15.5. Resultados

15.5.1. Características del enlace

Las mediciones del enlace establecido dio el siguiente valor de margen en el presupuesto de enlace:

Propiedad	Valor
Margen excedente promedio	8 [dB]

Cuadro 19: Propiedades del enlace

15.5.2. Ubicación de equipos inalámbricos

Luego de realizar pruebas en diferentes ubicaciones en la reserva biológica, se estableció el lugar óptimo para llevar a cabo el enlace punto a punto.



Figura 82: Enlace punto a punto

15.5.3. Análisis del espectro

Los dispositivos de Ubiquiti Network tienen incluido un analizador de espectros para determinar la frecuencia central óptima de operación. Este se empleó cuando los dispositivos se encontraban en su ubicación final para realizar un análisis del espectro.

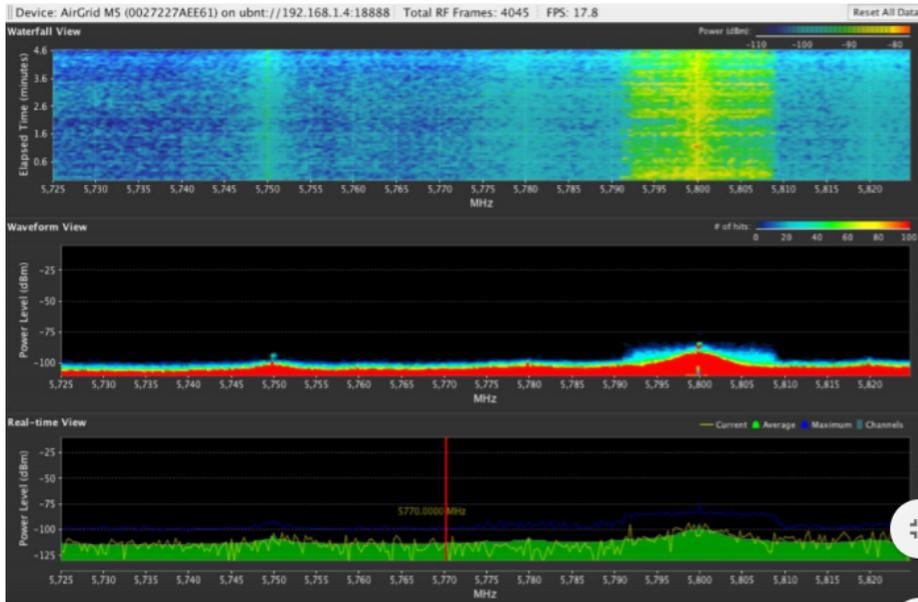


Figura 83: Analizador de espectros

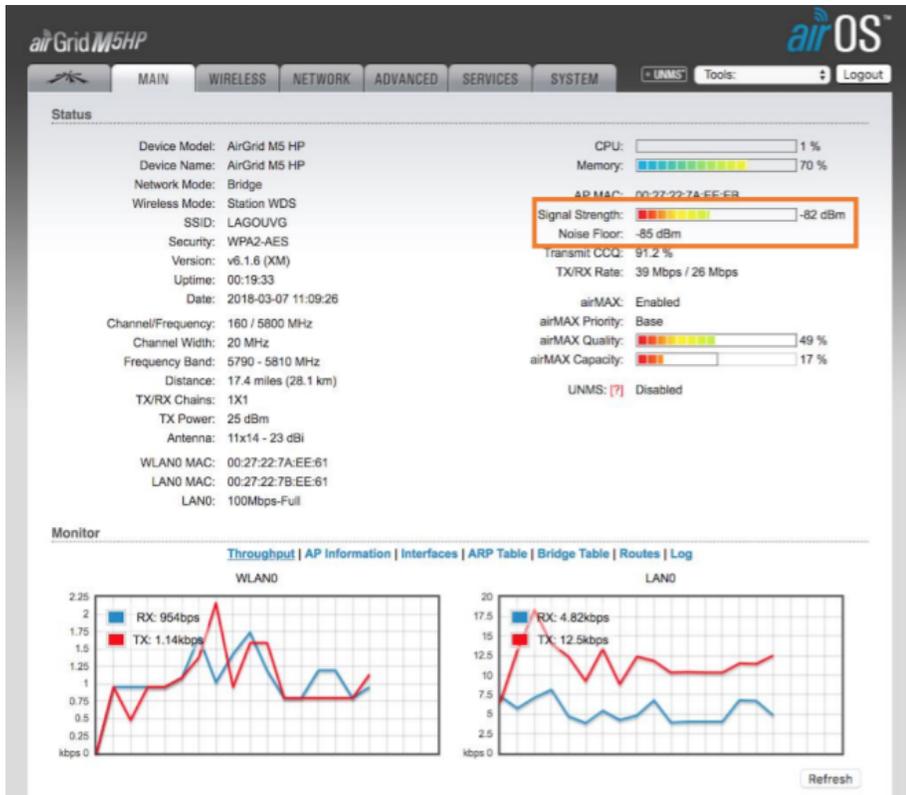


Figura 84: Radio trabajando en frecuencia central de 5.8GHz



Figura 85: Radio trabajando en frecuencia central de 5.77GHz

15.5.4. Desempeño de equipos inalámbricos

Para llevar a cabo un análisis del desempeño de los equipos empleados en el enlace, se envió un archivo desde el punto de acceso (access point) hacia la estación (station), utilizando diferentes distancias de separación.

Primera ubicación	Segunda ubicación	Distancia (Km)	Ancho de banda (MB/s)
Inicio Edificio C	Final Edificio C	0.05	5.5
UVG (Campus Central)	Apartamentos Neo	2.2	1.9
	Mirador San Lucas	15.6	1.2
UVG (Campus Sur)	Reserva biológica “El Quetzal”	28.6	1.1

Cuadro 20: Ancho de banda obtenido con AirGrid® M5.

Se graficó la relación entre el ancho de banda obtenido con la distancia que había entre los equipos de red para observar su comportamiento y mostrar de una forma gráfica los datos presentados en el Cuadro 20.

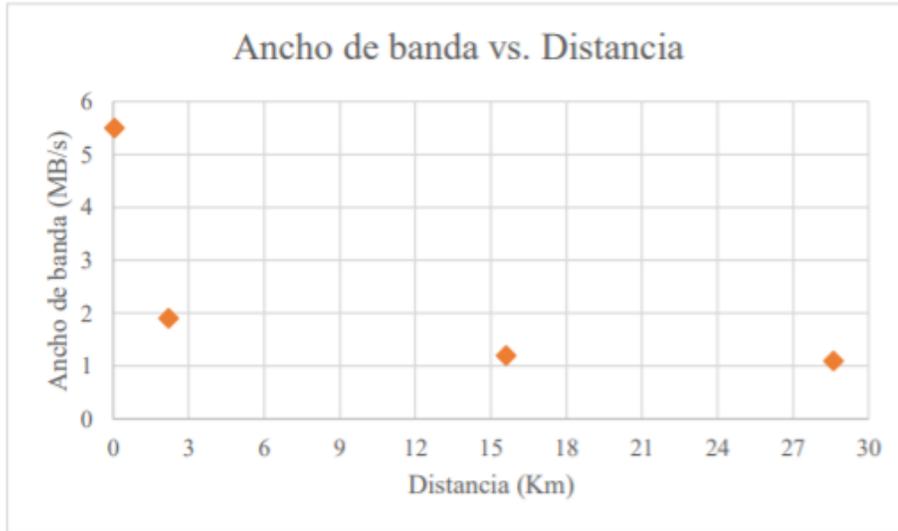


Figura 86: Ancho de banda vs. Distancia

Desde la reserva biológica, se enviaron dos archivos de diferente tamaño para observar el tiempo estimado en el que se tomaban para enviarse al campus Sur de la Universidad del Valle de Guatemala.

```
Danielas-MacBook-Pro-2:Desktop Daniela$ scp -l 8192 Las Vegas\ 2016.zip lagouvg@192.168.1.7:/home/lagouvg/Escritorio
lagouvg@192.168.1.7's password:
Las Vegas 2016.zip                               100% 2005MB  1.0MB/s  33:39
```

Figura 87: Archivo de 2GB enviado desde reserva a UVG Campus sur

```
lagouvg@lagouvg-OptiPlex-780:~$ scp JuanDiego@192.168.1.102:/Users/JuanDiego/Desktop/data_no_gps.zip /home/lagouvg/Escritorio
The authenticity of host '192.168.1.102 (192.168.1.102)' can't be established.
ECDSA key fingerprint is SHA256:zt0hyF+X3ZndB5wZQ26e9pI+roFEeg7WGZ2bhJtDLB8.
Are you sure you want to continue connecting (yes/no)? yes
Warning: Permanently added '192.168.1.102' (ECDSA) to the list of known hosts.
Password:
data_no_gps.zip                               100% 860MB  1.0MB/s  14:03
```

Figura 88: Archivo de 0.86GB enviado desde reserva a UVG Campus sur

También se utilizó la instrucción mtr que, además de dar una estadística de tiempos de transmisión del enlace, indica la calidad del enlace a través del porcentaje de pérdidas de paquetes.

```
my traceroute [UNKNOWN]
Danielas-MacBook-Pro-2.local (192.168.1.2) 2018-09-22T13:25:26-0600
Keys: Help Display mode Restart statistics Order of fields quit
          Packets
Host      Loss%  Snt   Last  Avg  Best  Wrst StDev
1. 192.168.1.7  0.0%  907   2.7   2.3  1.3   6.8  0.7
```

Figura 89: Comando mtr desde reserva hacia computadora UVG Campus Sur

Para observar el funcionamiento de la antena luego de un determinado tiempo, se graficó el ancho de banda del radio durante varios días. En este período de tiempo, el radio situado en el volcán Atitlán enviaba un video en vivo generado por la cámara al radio de UVG Sur solamente con el objetivo de que la conexión entre los radios se mantuviera activa.

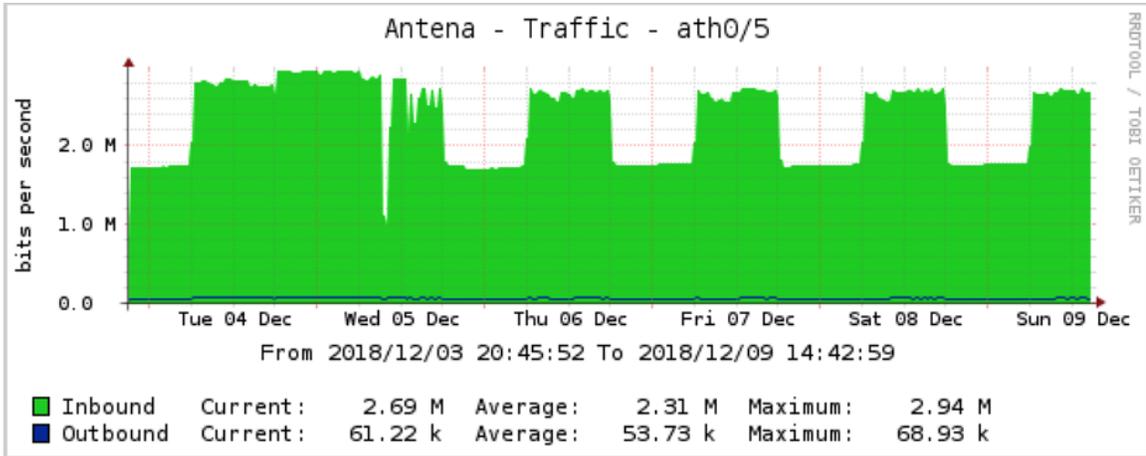


Figura 90: Ancho de banda de enlace con envío de video en tiempo real

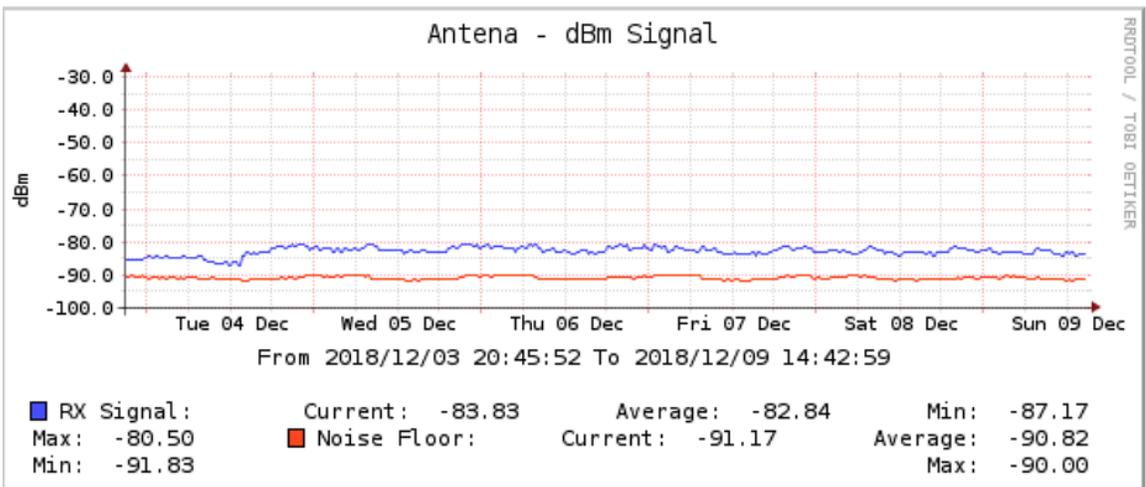


Figura 91: Calidad de enlace con envío de video en tiempo real

15.5.5. Conectividad entre UVG Campus Sur y UVG Campus Central

Para verificar la conectividad desde la computadora del campus Sur con el dispositivo ubicado en el campus Central, se ejecutó el comando ping desde la terminal. El comando también fue utilizado para obtener los tiempos de respuesta tanto de la antena situada en campus Sur y la página web de la universidad.

```
lagouvg@lagouvg-OptiPlex-780: ~  
lagouvg@lagouvg-OptiPlex-780:~$ ping 192.168.5.254  
PING 192.168.5.254 (192.168.5.254) 56(84) bytes of data.  
64 bytes from 192.168.5.254: icmp_seq=1 ttl=62 time=2.95 ms  
64 bytes from 192.168.5.254: icmp_seq=2 ttl=62 time=2.81 ms  
64 bytes from 192.168.5.254: icmp_seq=3 ttl=62 time=2.85 ms  
64 bytes from 192.168.5.254: icmp_seq=4 ttl=62 time=2.90 ms  
64 bytes from 192.168.5.254: icmp_seq=5 ttl=62 time=2.88 ms  
64 bytes from 192.168.5.254: icmp_seq=6 ttl=62 time=2.82 ms  
64 bytes from 192.168.5.254: icmp_seq=7 ttl=62 time=2.85 ms  
64 bytes from 192.168.5.254: icmp_seq=8 ttl=62 time=2.78 ms  
64 bytes from 192.168.5.254: icmp_seq=9 ttl=62 time=2.83 ms  
64 bytes from 192.168.5.254: icmp_seq=10 ttl=62 time=2.91 ms  
64 bytes from 192.168.5.254: icmp_seq=11 ttl=62 time=2.86 ms  
64 bytes from 192.168.5.254: icmp_seq=12 ttl=62 time=2.82 ms  
64 bytes from 192.168.5.254: icmp_seq=13 ttl=62 time=2.81 ms  
64 bytes from 192.168.5.254: icmp_seq=14 ttl=62 time=2.77 ms  
64 bytes from 192.168.5.254: icmp_seq=15 ttl=62 time=2.82 ms
```

Figura 92: Comando ping desde UVG Sur a UVG Central

15.5.6. Envío de datos desde UVG Central a repositorio del proyecto LAGO

El envío de datos generados por el detector de radiación hacia el repositorio de la comunidad LAGO se llevó a cabo por medio de la red avanzada CLARA (RedCLARA).

```
lago@biologia-OptiPlex-790:~/Escritorio$ scp pruebatanque_nogps_2018_02_08_14h00.dat uvg@lagoproject  
.uis.edu.co:/dspace/sites/uvg  
uvg@lagoproject.uis.edu.co's password:  
Could not chdir to home directory /home/uvg: No such file or directory  
pruebatanque_nogps_2018_02_08_14h00.dat 100% 119MB 1.0MB/s 01:57
```

Figura 93: Prueba de envío de datos desde UVG Campus Central a repositorio de LAGO

Módulo de control a distancia del detector

La principal dificultad de tener un detector de radiación a larga distancia es poder controlarlo y cambiar los parámetros de detección en tiempo real. Para esto, se diseñó un método de control utilizando el enlace punto a punto que se hizo como parte de otro módulo de este Megaproyecto. El enlace, en primer lugar, permite el envío de datos desde el sitio en el volcán Atitlán hasta las instalaciones de UVG Campus Sur, y luego los datos se obtienen por fibra óptica hasta el Campus Central. Para el envío de datos se diseñó junto con el módulo de transmisión de datos un algoritmo que, una vez iniciada la adquisición de datos, detecta un nuevo archivo de datos creado y lo envía cada hora -pues estos archivos se generan con esa frecuencia-. Este algoritmo, adicionalmente, permite la lectura de los sensores de presión y temperatura y hace la corrección de los archivos de datos con estos valores previo al envío. Además, hace la lectura del sensor de monitoreo de humedad y temperatura y de los sensores de corriente, y prepara un archivo de texto que también es enviado por el enlace.

Aunque el sistema de potencia y distribución eléctrica, que es otro módulo de este Megaproyecto, está diseñado para soportar la demanda de la adquisición continua de datos, es posible que presente fallas sobre todo por condiciones climatológicas. Esto implica que la Raspberry Pi y la Nexys 2 pueden apagarse en medio de la adquisición de datos. Si esto pasa, el archivo de datos actual queda con la última lectura realizada antes del apagón. La Raspberry Pi tiene la característica de que una vez sea alimentada, el sistema operativo se inicia sin necesidad de presionar ningún botón. Además, el archivo de arranque (*booting* en inglés) puede ser modificado para que realice comandos adicionales. Así, se configuró la Raspberry Pi para que inicie la adquisición y envío de datos de forma automática una vez se encendiera. Esto se hizo con los siguientes comandos:

```
<<se abre el archivo de arranque>>
sudo nano /home/pi/.bashrc

<<al abrir el archivo, se colocan las siguientes lineas>>
echo iniciando adquisicion
lago -x lago.xsvf
lago -s hv2 1500
lago -s t3 100
lago -f zdata
cd /home/pi/Desktop/Envio/
sudo python /home/pi/Desktop/Envio/estado.py

<<se cierra el archivo y se recompila>>
source /home/pi/.bashrc
```

El código en Python “estado.py” es el encargado de la lectura de los sensores, y los comandos **lago** son los que permiten iniciar nuevamente la adquisición de datos.

Por otro parte, si bien los parámetros de adquisición de datos puestos por defecto en el arranque de la Raspberry Pi son adecuados, puede que se requiera modificarlos para realizar otro tipo de análisis. Además, también es necesario poder detener la detección de datos por motivos de pruebas, fallas o falta de capacidad de almacenamiento. Para lograr esto a larga distancia, como parte del módulo de transmisión de datos se permitió el acceso por SSH a la Raspberry Pi. SSH es un protocolo que permite acceder de forma remota a un servidor, siempre que este tenga acceso a una red. Con SSH es posible acceder directamente a la consola de comandos y ejecutarlos como si se estuviera en el sitio. Así, basta únicamente detener la adquisición como se explica en el Capítulo 13, y ejecutar los comandos para configurar los parámetros e iniciar la adquisición nuevamente.

17.1. Montaje de servidor FTP en Raspberry Pi

El objetivo de montar un servidor FTP en la Raspberry es poder capturar imágenes y almacenarlas temporalmente en la memoria para luego, enviarlas a través del enlace al Campus Central de la Universidad del Valle con el fin de monitorear constantemente la Reserva.

Para montar el servidor FTP se utilizó el software VSFTPD, dirigido a sistemas UNIX. También es importante mencionar que es uno de los servidores FTP más rápidos, seguros y estables.

Características de VSFTPD

- Proporciona rapidez y seguridad en la transmisión de archivos
- Permite la configuración de IP de forma virtual
- Soporta encriptación mediante la implementación de SSL
- Facilidad de configuración de parámetros
- Alto rendimiento

Ahora bien, para montar el servidor FTP en la Raspberry es necesario contar con una SD que contenga el sistema operativo Raspbian y con un espacio de almacenamiento superior a 8GB. Al iniciar, se debe abrir una sesión en la terminal y asegurarse que se encuentra en el usuario host, ya que se requieren ciertos permisos, que normalmente los tiene solo

el administrador. Para determinar el usuario en el que se encuentra, se utiliza el comando siguiente y devuelve el usuario activo en ese momento. En este caso debía ser *pi*. Para poder determinar el usuario actual, se utiliza el comando *whoami*.

```
pi@raspberrypiLAGO:~/Desktop $ whoami
```

Luego, se actualizaron los repositorios. APT por sus siglas en inglés *Advanced Package Tool* permite interactuar con el sistema de paquetes y es comúnmente utilizado para encontrar, instalar y actualizar las actualizaciones de los paquetes. Es necesario utilizar *sudo* ya que se requieren privilegios de un súper usuario.

```
sudo apt-get update
sudo apt-get install vsftpd
```

Es necesario modificar algunos parámetros del servidor vsftpd para permitir que el usuario pueda leer y escribir en el servidor. Se le deben quitar los símbolos *#*.

```
sudo nano /etc/vsftpd.conf
#local_enable=YES
#write_enable=YES
```

Por último para guardar los cambios, y actualizar el servidor se ejecuta el siguiente comando [74].

```
sudo service vsftpd restart
```

17.1.1. Configuración del router

Debido a que la antena únicamente funciona como un enlace punto a punto, el uso de un router fue necesario. Por ello, para facilitar el manejo remoto, se colocaron IPs estáticas en el registro del router.

IP Address	MAC Address	Remark	Action
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	+
192.168.1.3	B8:27:EB:43:73:A7	Unknown	-
192.168.1.5	00:12:7B:58:F7:D5	Unknown	-

Figura 94: Interfaz de la cámara IP encontrada en el buscador

17.1.2. Conexión a la red

La cámara viene acompañada de un manual de usuario en donde se muestran las instrucciones para poder configurar la cámara. Esta viene consigo con un programa *IP Camera Tool* o si es más reciente, *Equipment Search Tool*. Este software es utilizado para detectar la IP asociada a la cámara. Para configurar la conexión a la red se deben seguir los siguientes pasos:

- Conectar la cámara a un router por medio del cable Ethernet.

- Ejecutar el software *Angry IP Scanner* para MAC OS o *Advanced IP Scanner* para Windows.

- Ingresar las IP activas que no cuenten con un identificador en el buscador, hasta que aparezca la interfaz mostrada en la Figura 94. Inicialmente no cuenta con una contraseña y el usuario es *admin*. Por ello, en la primera conexión, la interfaz solicita un nuevo usuario y una contraseña. En este caso el usuario es *lagouvg* y la contraseña es *atitlan123*.

- Configurar los parámetros visuales de la cámara como la frecuencia, la resolución, el brillo y contraste, como se observa en la Imagen 95

- Conectar la cámara a la red inalámbrica empleando la configuración *Wireless LAN* como se muestra en la Figura 96. En esa pestaña, se debe seleccionar la red Wi-Fi que se desea y la contraseña y luego *Submit*.

- Salir del buscador e ingresar nuevamente con la misma dirección IP y ya no será posible, debido a que la dirección de la cámara vía Ethernet es distinta a la Wi-Fi, por lo tanto es necesario realizar un nuevo escaneo en *Angry IP Scanner* o su equivalente para encontrar la dirección IP asignada por medio de DHCP e ingresar dicha dirección en el buscador.

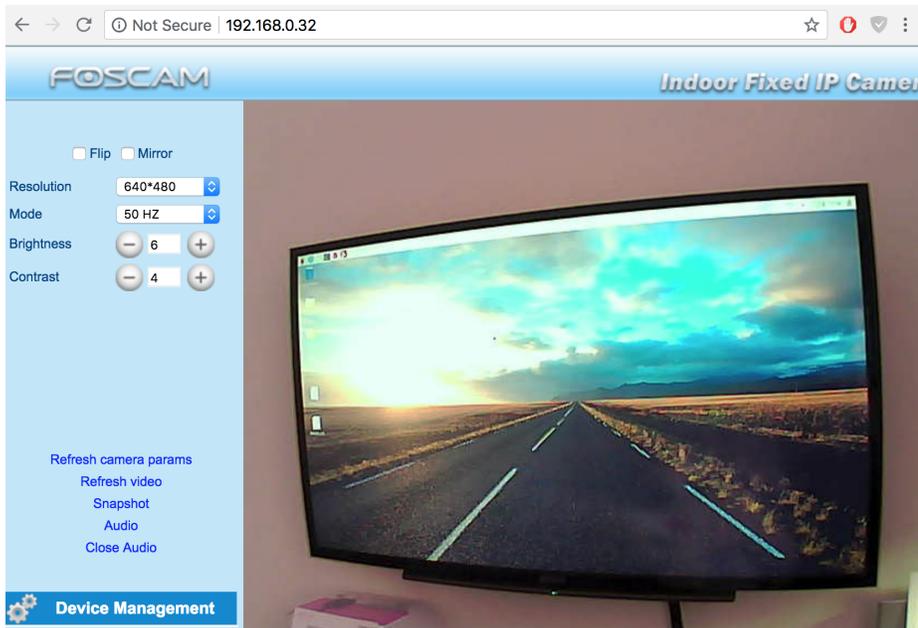


Figura 95: Configuración de parámetros de cámara: resolución, brillo y contraste.

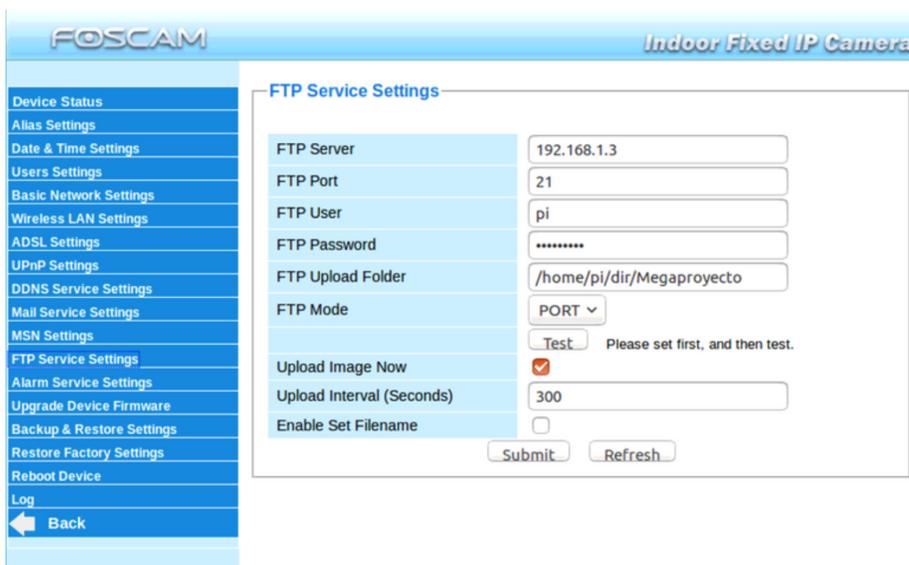


Figura 96: Configuración de la cámara a red inalámbrica

17.1.3. Configuración de servidor FTP

Ahora que ya se encuentra la cámara conectada a la red Wi-Fi, es posible configurar el servidor FTP. Debido a que se encuentra un router, la Raspberry se encuentra en una red LAN, por lo que al enlazar el servidor FTP a la misma dirección IP que la Raspberry la transferencia de archivos empleando vsftpd será rápida y segura.

Como se muestra en la Figura 97, la dirección IP asociada es la dirección IP de la

red *192.168.1.3* que fue previamente configurada en la Raspberry Pi. Esto permite que la cámara pueda enviarle las imágenes a la Raspberry y almacenarlas en el directorio propuesto */home/pi/dir/Megaproyecto*. Es importante remarcar un problema que puede suceder: si el usuario FTP no cuenta con una contraseña será imposible montar el servidor FTP, esto por cuestiones de seguridad. Inicialmente el usuario *pi* no contaba con una contraseña y luego de varios intentos se creó un nuevo usuario con una contraseña en la Raspberry, sin embargo, debido a los permisos, resultó difícil crear una nueva carpeta en el nuevo usuario, por ello, se procedió a colocarle una contraseña al usuario por default *pi* y su contraseña *raspberrypi*. El puerto por defecto asociado al servidor FTP es 21, por lo que eso permanece constante en la mayoría de configuraciones, dado que es el puerto en el servidor para establecer y controlar la comunicación entre el cliente y el servidor. La configuración de la Raspberry se puede modificar empleando el comando mostrado a continuación:

```
sudo raspi-config
```

Luego se seleccionó *Submit* y de esta forma se montó el servidor FTP entre la cámara IP y la Raspberry Pi.

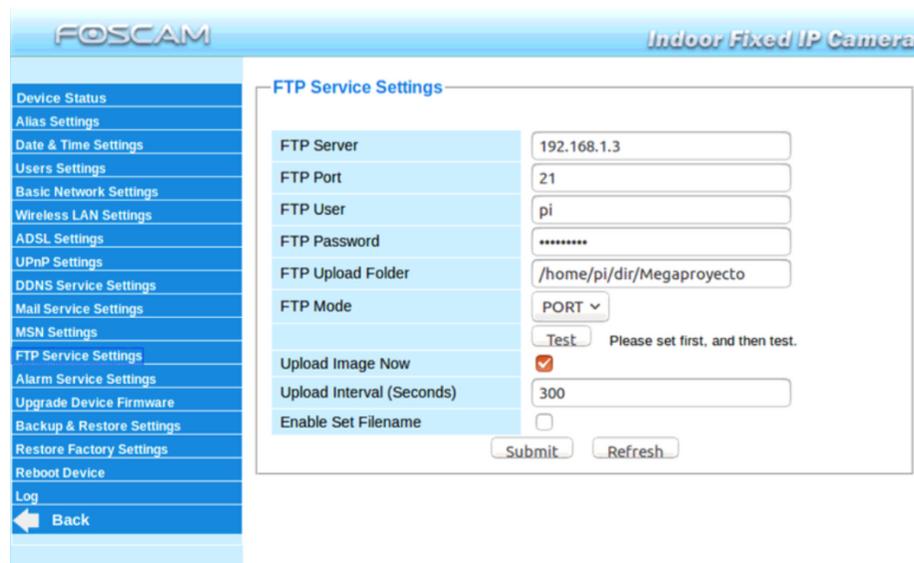


Figura 97: Configuración del servidor FTP en la Cámara Wi-Fi

17.1.4. Configuración de detección de movimiento

Debido al propósito de monitoreo de la cámara en la Reserva de la Universidad del Valle de Guatemala en Atilán, Suchitepéquez, se configuró la detección de movimiento. Esta configuración fue realizada ya que no se pueden enviar archivos todo el tiempo, únicamente cuando existe movimiento anormal. Dependiendo de la sensibilidad y del intervalo de captura, se enviará una cantidad variable de archivos.

Alarm Service Settings

Motion Detection Alarmed	<input checked="" type="checkbox"/>
Motion Detection Sensitivity	4 <input type="button" value="v"/> Sensitivity: 1-10,10=the highest sensitivity
Motion Compensation	<input checked="" type="checkbox"/>
Sound Detection Alarmed	<input type="checkbox"/>
Send Mail on Alarm	<input type="checkbox"/>
Upload Image on Alarm	<input checked="" type="checkbox"/>
Upload Interval (Seconds)	10 <input type="text"/>
Scheduler	<input type="checkbox"/>

Figura 98: Configuración de control de movimiento: sensibilidad e intervalos de captura

Al activar la alarma de control de movimiento, se despliegan parámetros como la sensibilidad, y el intervalo de captura. Por ello, teniendo una sensibilidad relativamente baja hará que únicamente cuando existan movimientos extraños, se active la alarma y se tome la captura cada 10 segundos, como se configuró en este caso.

17.2. Pruebas de funcionamiento

Finalmente, para verificar el funcionamiento de la conexión inalámbrica a la red Wi-Fi tanto de la Raspberry como de la Cámara IP FOSCAM FI8909W, y la ejecución correcta del servidor FTP tanto en la Raspberry como en la cámara se realizaron dos pruebas.

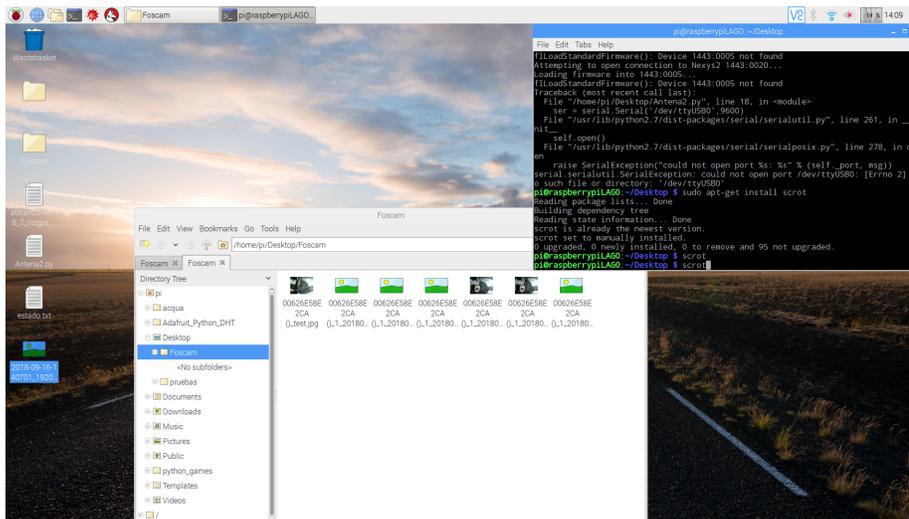


Figura 99: Almacenamiento de archivos si se detecta movimiento cada 10 segundos

17.2.1. Envío de archivo a Raspberry Pi

La primera prueba fue para determinar si el servidor FTP entre la Raspberry Pi II y la cámara fue montado correctamente. Para comprobarlo, al presionar *Submit* y luego *Test*, se debe abrir una ventana que indique *Test...Succeed*, si es así, el servidor funciona de la forma esperada. Luego al ingresar el directorio que fue registrado para almacenar los archivos, debe mostrarse una imagen de prueba como se puede observar en la Figura 99. El primer archivo que se almacenó en la carpeta, fue el archivo de prueba enviado desde la cámara a la Raspberry, comprobando que el servidor FTP fue montado correctamente.

17.2.2. Envío de archivos por detección de movimiento

La segunda prueba luego de configurar la alarma de control de movimiento con intervalos de tiempo determinados, es recibir imágenes al hacer movimientos frente del lente de la cámara en el intervalo de tiempo establecido en la interfaz con el usuario. En este caso, cada 10 segundo y si existe movimiento, se almacena una imagen en el directorio */home/pi/Desktop/Foscam* como se muestra en la Figura 99.



Figura 100: Fotografía de la reserva tomada en la posición final de la cámara IP

18.1. Caracterización y calibración de un PMT

18.1.1. Calibración de un PMT

En resumen la calibración de un PMT consiste en encontrar la región estable donde el sensor va a trabajar, esto se hace encontrando la relación entre la energía que las partículas dejan al pasar en el WCD y la señal digital. Para ello se elige un rango seguro de voltaje y este es barrido con un aumento gradual de voltajes [14].

Esta caracterización se basa en correr un programa donde se indique un intervalo de voltajes, a lo largo del cual se realizará el barrido o exploración. Esta prueba se hace para varios triggers o valores umbral, y se determina la región estable. Los resultados obtenidos en el primer estudio realizado en el tanque de LAGO-UVG se muestran en la Figura 101 [14]. El rango de voltaje en el que se asegura el buen funcionamiento del PMT está entre 950V y 1050V.

18.1.2. Fotoconversión y colección de electrones

Cuando un flujo de pulsos de un fotón incide al fotocátodo del PMT se producen fotoelectrones. En la mayoría de los casos el número de fotones sobre el fotocátodo corresponde a una distribución de Poisson. Además la conversión de fotones en electrones y su recolección por el sistema de dínodos es una variable binaria aleatoria. Como resultado de la distribución se puede expresar como una convolución de la distribución de Poisson y un proceso binario, esto da nuevamente una distribución de Poisson [24].

$$P(n, \mu_{pc}) = \frac{\mu_{pc}^n e^{-\mu_{pc}}}{n!} \quad (80)$$

Donde μ_{pc} se define de la siguiente manera:

$$\mu_{pc} = n_{ph}q \quad (81)$$

Donde μ_{pc} es la cantidad media de electrones recolectados por el sistema, y $P(n, \mu_{pc})$ es la probabilidad que se recolecten n fotoelectrones, siempre y cuando la media sea μ_{pc} . n_{ph} es el número medio de fotones que golpean el fotocátodo, q es la eficiencia cuántica. Hágase notar que μ_{pc} es un parámetro que caracteriza la intensidad de la fuente de luz, la eficiencia cuántica del fotocátodo y la eficiencia de recolección de los dínodos, que depende del voltaje aplicado entre el fotocátodo y del primer dínodo [24].

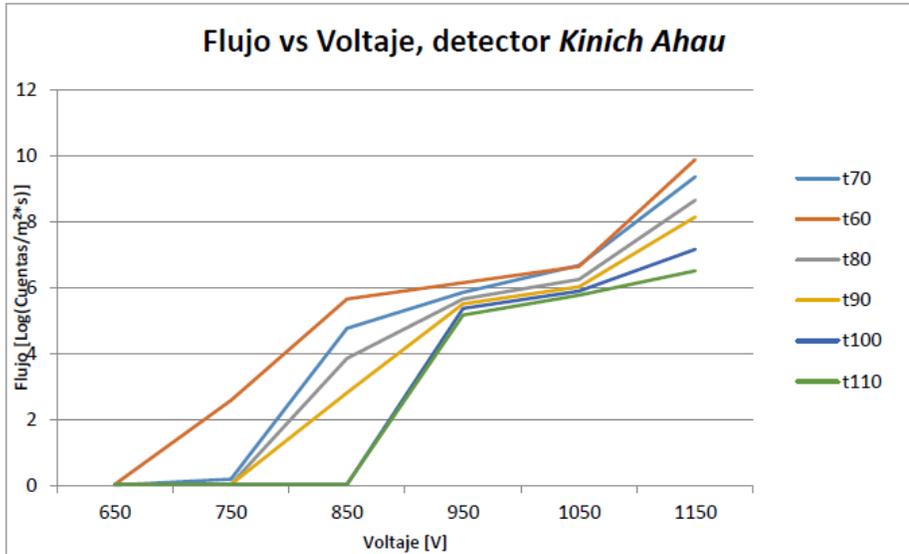


Figura 101: Calibración del PMT obtenida por la primera generación del proyecto LAGO-UVG [14]

18.1.3. Espectro de cargas

Idealmente el multiplicador de electrones proporciona una ganancia constante, porque los electrones tienen energía fija cuando entran al sistema de dínodos. Naturalmente esto no es posible por el proceso de la emisión secundaria. Si dos electrones con la misma energía entran al sistema ambos producen diferente número de electrones de emisión secundaria, es resultado de la fluctuación de la ganancia. Una buena forma de medir el alcance de las fluctuaciones en la cadena multiplicadora es el espectro de un solo fotoelectrón. Este es el espectro de los pulsos de salida del fotomultiplicador cuando solo un electrón entra al sistema de multiplicación. Para ello se usa una fuente de luz muy débil para que la probabilidad de que más de un fotoelectrón se produzca sea muy pequeña [23].

La distribución de cargas de señales de salida de un PMT muestra las fluctuaciones en

la multiplicación de electrones dentro del PMT. Debido a que se está probando el detector a un nivel de un solo fotoelectrón se dice que se trata del espectro de un único fotoelectrón. Este espectro se puede aproximar con una distribución gaussiana entre cada dínodo y la distribución total de fotoelectrones, respeta una distribución de Poisson. Características como la ganancia (G), la relación valle pico y la resolución de energía se pueden encontrar con el espectro de solo un fotoelectrón (SPE) [21]. Un espectro típico se puede visualizar en la Figura 102 donde se puede apreciar el pico y el valle de los cuales se hablan anteriormente.

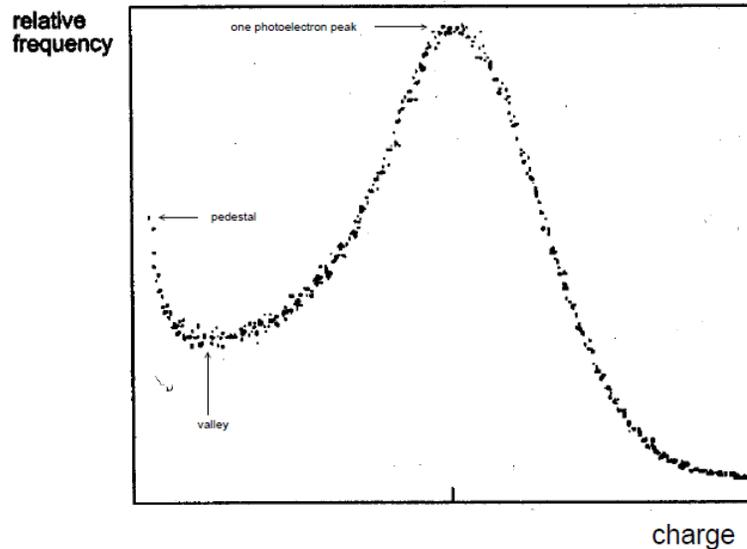


Figura 102: Gráfica de espectro de carga de un PMT [21]

La ganancia es una medida de la multiplicación de electrones y se define como la fracción de la corriente que pasa a través del ánodo y la corriente fotoeléctrica de la siguiente manera [21].

$$G = \frac{I_a}{I_k} \quad (82)$$

18.1.4. Diseño experimental de la caracterización

Se cuenta con un tubo fotomultiplicador de la marca Hamamatsu del modelo R5912-20, según la hoja de especificaciones, la vista lateral es como se muestra en la Figura 103 [22], donde se pueden apreciar las dimensiones del PMT..

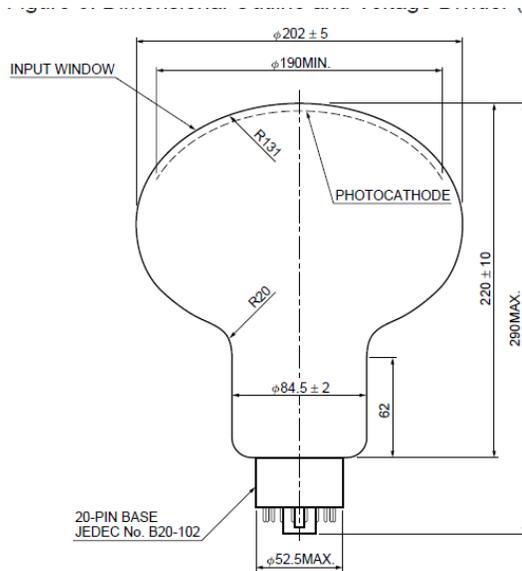


Figura 103: Vista lateral del PMT R5912 [22]

La Figura 104 muestra al PMT visto desde abajo, se muestra qué conexión representa a cada pin (Conectores debajo del PMT). Se caracteriza el PMT mediante la prueba del espectro de carga de un solo fotoelectrón, para ello se divide en dos partes la prueba, en la primera parte se explora el mecanismo de la señal a detectar; y en la segunda la detección de los pulsos por el PMT. Para generar las señales se usa un LED azul ya que la radiación Chérenkov tiene longitud de onda en el rango del azul. También se usa una tarjeta de desarrollo Genesys 5 con un FPGA (ver Figura 105), la cual se programa para lanzar la señal al led, con lo cual éste emite un fotón. La longitud de onda del LED que se usa se calcula con un arduino Leonardo y un espectroscopio marca Pasco; el valor obtenido es de $466 \pm 3 \text{ nm}$, lo cual concluida con el espectro de luz azul. En la Figura 106 se puede ver el espectro de emisión del LED.

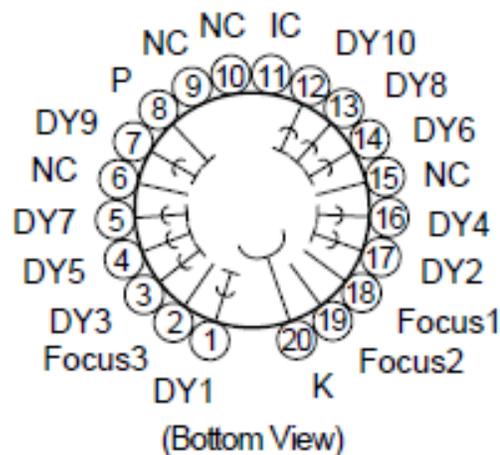


Figura 104: Diagrama de pines del tubo fotomultiplicador extraída de [21]



Figura 105: Fotografía de la tarjeta de desarrollo Genesys 5 con FPGA, se utiliza para generar el pulso

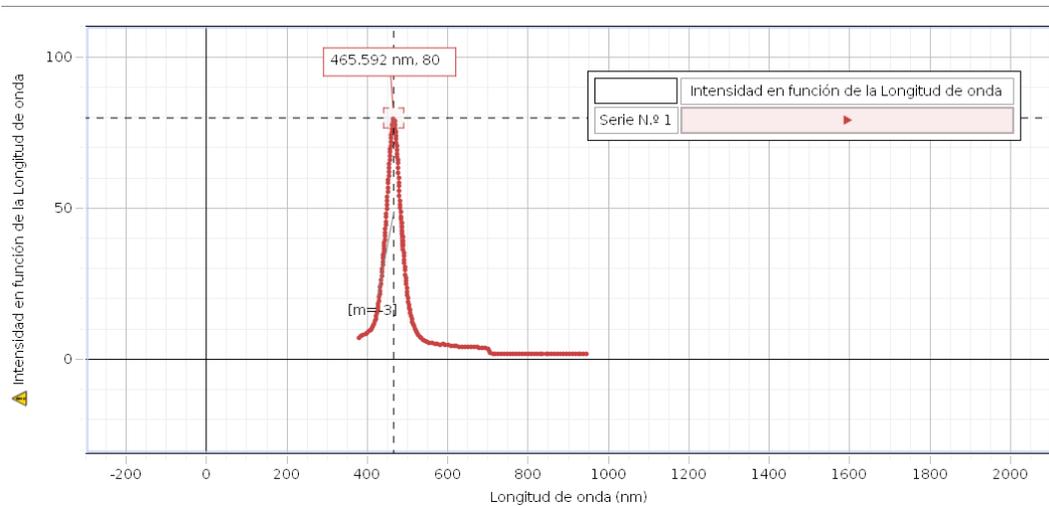


Figura 106: Gráfico de intensidad contra longitud de onda del led azul usado en la caracterización

Prueba de corriente oscura

Como antes se mencionó, la corriente oscura es aquella que aparece en el fotomultiplicador cuando no es iluminado por ningún tipo de luz. En ese estado, la señal que capta el PMT provendría de fotones atmosféricos de fondo. Para ello se coloca al PMT en un ambiente libre de luz (oscuro). Posteriormente el PMT se pone a funcionar variando el voltaje dentro de la zona segura para el funcionamiento óptimo, determinada en la calibración del PMT. El diseño experimental se tomó de [75].

Prueba de un solo fotoelectrón

Para esta prueba se necesita un ambiente oscuro, para ello se decidió usar el tanque que se utilizará como WCD sin agua, antes de esta prueba fue revisado que no tuviera filtraciones de luz, este proceso fue descrito anteriormente. Posteriormente se activa un generador de pulsos,

con un ancho de pulso de 10 ns para que solo un fotoelectrón sea emitido, la alimentación no tiene que ser mayor a 4V [21]. Se varía el potencial de alimentación del PMT igualmente en la zona segura para su funcionamiento. La prueba se adaptó del diseño usado por [76]. Para la colección de datos se usa la tarjeta red pitaya, por su buena resolución de 4 ns [77].

El espectro de cargas de un solo fotoelectrón (SPE) se obtiene a partir de un histograma de cargas que se va llenando durante la prueba. El máximo de dicho histograma corresponderá al valor correspondiente del SPE. A sabiendas de la carga podemos relacionar la energía con la carga, y que sabemos la longitud de onda promedio del led que se utilizó y sabemos que la energía de un fotón es:

$$E = h\nu \tag{83}$$

Donde h es la constante de Planck, Además se sabe que la velocidad de la luz es:

$$c = \lambda\nu \tag{84}$$

despejando para ν y sustituyendo tenemos que:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \tag{85}$$

El valor obtenido con este cálculo de la energía correspondiente a la longitud de onda del LED es de $E = 4.26 * 10^{-28} \pm 3 * 10^{-30} J = 2.66 \pm 0.02$ neV.

18.1.5. Topología del montaje experimental

Para realizar ambas pruebas, se muestra la topología necesaria del montaje experimental. Hay que tomar en cuenta que en el caso de la prueba de la corriente oscura, se omite el generador de pulsos.



Figura 107: Topología del montaje experimental.

18.1.6. Condiciones de luz

La prueba de la caracterización, a diferencia de la detección de eventos cósmicos, se realiza en el aire y no en un medio acuático. Es importante garantizar que no existan fuentes de luz que incidan en el PMT, salvo las generadas por el LED para la prueba de *single electron*. Para esto, se puede crear un “cuarto oscuro” en el que se eliminen todas las fuentes de luz, pero esto causa problemas para los experimentadores al momento de armar el montaje. La solución alternativa es utilizar el mismo tanque que se usa en la detección, pero vacío. El tanque debe haber superado las denominadas pruebas de luz, que consisten en verificar que no hay filtraciones a través del *tyvek* ni del recubrimiento del tanque. Estas pruebas fueron realizadas por parte del módulo de física. Una vez garantizadas las condiciones de luz, se puede proceder a realizar la prueba.

18.1.7. Alimentación del PMT

El control del alto voltaje se realiza mediante la tarjeta de desarrollo Red Pitaya. Por parte del módulo de actualización de tecnología FPGA, la Red Pitaya cuenta ya con el paquete de adquisición de datos estándar del Proyecto LAGO. Con este, se puede controlar el alto voltaje a través de una señal PWM proveniente de uno de los pines digitales de la tarjeta. Sin embargo, es necesario convertir esta señal PWM en una componente DC para utilizar la fuente de alto voltaje que alimenta directamente al PMT. Para esto, se realizaron pruebas con la placa diseñada como parte de la primera fase del Megaproyecto [3]. Esta placa consiste en un filtro pasa-bajas o *antialiasing* con el que se obtiene solo la componente DC de la señal PWM. Dependiendo del ciclo de trabajo, la componente DC varía de forma

proporcional.

18.1.8. Lectura de datos

Para la lectura de datos, se configura la Red Pitaya para que inicie con la adquisición, como si se tratara de la detección de eventos cósmicos. Luego, los archivos de datos tienen un formato idéntico al que tienen los archivos generados por la Nexys 2, por lo que se pueden analizar con los mismos algoritmos ya implementados anteriormente. Con la lectura de datos es necesario indicar también el nivel de disparo y el de alto voltaje. El nivel de disparo debe ajustarse justo por encima de la línea base (o igual a esta) para obtener la respuesta mínima del PMT. En cuanto al alto voltaje se refiere, es necesario realizar un barrido entre los voltajes de operación del PMT, y realizar ambas pruebas para cada uno de estos. Los voltajes se obtienen de la calibración del PMT, que se realizó como parte del módulo de actualización de tecnología FPGA. El barrido debe realizarse con un espaciamiento de 50 V.

18.1.9. Generador de pulsos

La parte más crítica de la prueba *single electron* es el generador de pulsos. El generador de pulsos debe garantizar que el LED en cuestión genere efectivamente un solo fotón con cierta periodicidad. De acuerdo con [21] y [78], el ancho del pulso debe ser de alrededor de 10 ns. La amplitud no debe ser mayor a los 4 V, debe ser solo positivo, y se recomienda una frecuencia de 1 kHz, aunque esta no es crítica. Para lograr esto, se proponen tres implementaciones.

Generador de funciones

Tanto en [78] como en [79] utilizan un generador de funciones para obtener los pulsos. Estos instrumentos cuentan con una variedad de señales eléctricas que se pueden cambiar en forma, amplitud y frecuencia. Para la prueba, la señal correcta a utilizar es una señal cuadrada. Las señales de este tipo tienen valores binarios de amplitud, es decir, con únicamente dos estados, uno encendido y uno apagado. Sin embargo, la transición de un estado a otro no es instantánea, y tiene lo que se conoce como un tiempo de subida (*rising time*) y un tiempo de bajada (*falling time*). Estos tiempos son críticos puesto que no pueden ser mayores, en total, al ancho de pulso. Por tal motivo, es necesario utilizar un generador de funciones que tenga las siguientes características: tiempo de subida y de bajada menor a 10 ns en total, capacidad de variar el ciclo de trabajo para obtener menores anchos de pulso, y capacidad de variar la amplitud para obtener el valor adecuado. Si se cuenta con un generador que cumpla dichas características, este puede ser utilizado directamente para la prueba.

Circuito regenerativo con transistores complementarios

La segunda opción de implementación es un circuito con un par de transistores NPN y PNP que se conoce como circuito regenerativo. El circuito se muestra en la Figura 108. El funcionamiento de este consiste en un proceso cíclico. En un primer momento se asume que

el capacitor C_1 está descargado completamente y que los transistores están en modo corte. Al encender la alimentación, R_2 y R_3 forman un divisor de voltaje y mantienen fijo el valor de V_{ref} . El capacitor C_1 empieza a cargarse a través de R_1 , y cuando llega a un valor mayor a V_{ref} más el voltaje de diodo de Q_1 , este transistor sale de corte. Cuando esto ocurre, Q_2 se acciona y provoca que V_{ref} caiga, haciendo que Q_1 conduzca en su totalidad. Esto permite que C_1 se descargue a través de R_4 y el circuito regrese a su condición inicial. El proceso continúa indefinidamente. El periodo en que aparecen los pulsos está determinado por la constante R_1C_1 y por V_{ref} . El tiempo de subida depende directamente de la velocidad de conmutación de los transistores, mientras que el tiempo de bajada se ve afectado por la constante R_4C_1 que descarga al capacitor, y el camino a tierra armado con los transistores. El funcionamiento de este tipo de circuitos se logra por la retroalimentación positiva. Es de suma importancia utilizar transistores de conmutación rápida para obtener los valores de ancho de pulsos deseados.

De acuerdo con [80], utilizando los valores $R_1 = 220\text{ k}\Omega$, $R_2 = 1\text{ k}\Omega$, $R_3 = 10\text{ k}\Omega$, $C_1 = 68\text{ pF}$, un valor de voltaje de 15 V y los transistores de conmutación rápida 2SA1206 (PNP) y 2SC2901 (NPN), se obtienen pulsos a una frecuencia de 23 kHz con un tiempo de subida de 2.9 ns .

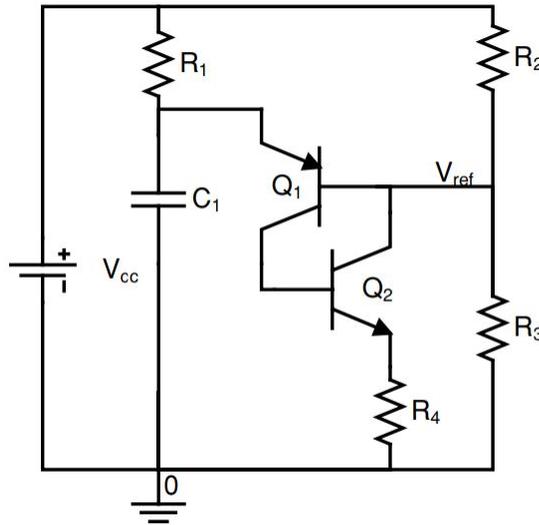


Figura 108: Esquemático del circuito regenerativo. Obtenido de [80].

Adicionalmente, se pueden incluir circuitos para moldear los pulsos. El más sencillo consiste en conectar en serie un par de diodos de respuesta rápida con una resistencia de por medio, como se muestra en la Figura 109. La carga en este caso es el LED azul que tiene características específicas de acción rápida.

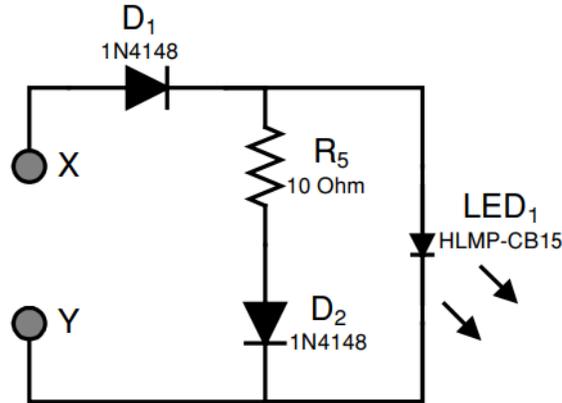


Figura 109: Circuito para moldear pulsos. Obtenido de [80].

Otro aspecto a tomar en cuenta para utilizar esta implementación es que el circuito impreso (PCB por sus siglas en inglés, *printed circuit board*) que se utilice debe estar especialmente diseñado para altas velocidades (*high speed PCB design* en inglés). Esto garantiza la integridad de las señales de alta frecuencia, para que no se vean afectadas por las características físicas del circuito impreso, como el largo de las pistas (*tracks*), o la conductividad misma del material. Además, fenómenos como el retraso de interferencia (*crosstalk delay*) entre pistas puede afectar enormemente el rendimiento del circuito. Por tal motivo, se recomienda diseñar el PCB con las técnicas adecuadas de alta velocidad, o bien, solicitarlo a fabricantes especializados.

FPGA

Un FPGA, por estar implementado directamente en silicio, tiene la capacidad de reaccionar en tiempos de los órdenes de magnitud necesarios para generar los pulsos. Por esta razón, utilizar uno es la tercera opción, además de las que ya se describieron. Para esto, basta con configurar la interconexión del hardware de las compuertas lógicas de tal forma que generen el pulso. Esto se realiza mediante un HDL como se explica en capítulos anteriores. Ejemplos de estos lenguajes son Verilog y VHDL.

Para gozar de las características de velocidad propias de un FPGA, es necesario que cuente con pines directos a los arreglos de compuertas. La tarjeta de desarrollo de Diligent, Genesys, ofrece estas características, por lo que la hace una candidata ideal para realizar la tarea. Su hoja de datos se encuentra en [81]. Adicionalmente, se debe considerar que para alimentar el LED es necesario utilizar transistores, y estos deben ser de conmutación rápida como los modelos que se sugieren para el circuito regenerativo.

Comparación entre implementaciones

Las tres implementaciones presentadas cuentan con ventajas y desventajas. Estas se describen a continuación.

Implementación	Ventajas	Desventajas
Generador de funciones	Es el método más sencillo de implementar, siempre que se tenga el equipo. Es fácil de configurar y cambiar en tiempo real.	Muchos generadores de funciones comerciales no ofrecen las características de tiempo necesarias.
Circuito regenerativo	Utiliza componentes discretos de bajo costo que se pueden conseguir con facilidad.	Requiere de valores específicos de capacitancias y resistencias dadas por los componentes discretos, por lo que no se puede modificar en tiempo real. Requiere de diseño especializado de alta velocidad para garantizar la integridad de las señales.
FPGA	Es fácil configurar mediante el HDL, y se pueden cambiar las características de tiempo entre corridas.	Se requiere de una tarjeta de desarrollo con pines directos al arreglo de compuertas para aprovechar la velocidad de conmutación de los transistores en silico.

Cuadro 21: Cuadro comparativo entre implementaciones.

Pruebas de generador de pulsos a través de FPGA

Las siguientes figuras muestran las pruebas realizadas del generador de pulsos utilizando el FPGA de la tarjeta de desarrollo Genesys 5.

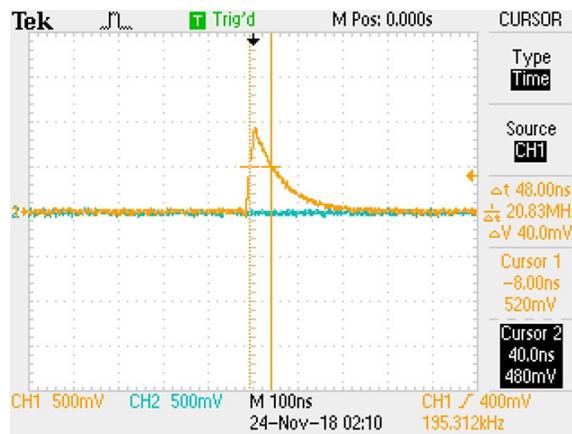


Figura 110: Pulso generado con medición de ancho a media amplitud.



Figura 111: Secuencia de pulsos generada.

En la Figura 110 se muestra el pulso generado con un ancho a media amplitud de 48 ns. Esta es la amplitud mínima que se obtuvo con la frecuencia de 100 MHz que ofrece la tarjeta de desarrollo, considerando el tiempo de subida y de bajada de las conmutaciones en las compuertas. Este ancho de pulso excede a lo que se pide en la prueba, pero por esto se propone utilizar un arreglo con un material altamente reflectivo que haga un “rebote” de fotones, para que no todos los generados por el LED incidan en el PMT.

La Figura 111 muestra la secuencia de pulsos generados, cuya frecuencia puede ser configurable mediante software dependiendo de las características de la prueba que se desea realizar. Adicionalmente, se observa que la amplitud de los pulsos es de 1 V, valor suficiente para vencer el voltaje de diodo del LED.

18.2. Muon vertical equivalente (VEM)

El VEM es la unidad de medición usada para cuantificar la señal captada por el WCD, en el caso de este trabajo, el VEM se cuantifica considerando unidades de ADCq (carga medida) [12]. En la siguiente sección se definen algunos conceptos útiles para estimar el VEM.

18.2.1. Definiciones útiles para el cálculo del VEM

Los pulsos de un (WCD) se almacenan por hora en archivos comprimidos, la frecuencia de muestreo usando la electrónica antigua de LAGO (con nexys 2) es de 40 MHz, esto implica que mide cada $0.025 \mu s$. El análisis de datos por hora se hace integrando la carga total para obtener la carga integrada (ADCq) por cada pulso simplemente sumando cada carga registrada por el ADC (Analog to Digital Converter) restando 50 (línea base) [35] como se puede ver en la ecuación 86.

$$ADCq = \sum_{i=1}^n |ADC_i - 50| \quad (86)$$

Luego se clasifican los pulsos según su carga integrada. Para esto se crearon bins que abarcan todo el rango de interés de cargas integradas y se contó cada evento por bin. Después de ello se analizan las características de estos histogramas para obtener la cantidad de partículas atraviesan el tanque. Se debe identificar el segundo máximo de esta gráfica, punto que está relacionado el VEM, que corresponde a la carga de los muones que atraviesan el tanque verticalmente. Posteriormente al histograma obtenido se le aplica un logaritmo de base diez para facilitar la localización de la rodilla (o segundo pico) buscada. Para la identificación de la sección muónica es necesario calcular cuáles son las cargas máximas que puede detectar un muón de acuerdo con las dimensiones del detector. La carga máxima se puede calcular con la ecuación 87 [35] [13].

$$\mu_{max} = 0.9(VEM)\sqrt{1 + \left(\frac{d}{h}\right)^2} \quad (87)$$

Con una incertidumbre, de acuerdo con la propagación del error, de:

$$\sigma_{\mu}^2 = \left(\frac{\partial\mu}{\partial Vem}\right)^2 \sigma_{vem}^2 + \left(\frac{\partial\mu}{\partial d}\right)^2 \sigma_d^2 + \left(\frac{\partial\mu}{\partial h}\right)^2 \sigma_h^2 \quad (88)$$

entonces:

$$\sigma_{\mu}^2 = 0.81 \left(1 + \frac{d^2}{h^2}\right) \sigma_{vem}^2 + \left(\frac{0.81(Vem)^2 d^2}{h^2 + d^2}\right) \sigma_d^2 + \left(\frac{0.81 d^2 (Vem)^2}{h^6 \left(1 + \left(\frac{d}{h}\right)^2\right)}\right) \sigma_h^2 \quad (89)$$

Donde d es el diámetro del tanque y h su altura, en este caso, estos valores son d = 0.82 m, y h = 1.14 m. Esto pone un límite en el ángulo de los eventos tomados en cuenta. Este ángulo se calculó mediante la siguiente expresión [35].

$$\theta_{max} = \arctan\left(\frac{d}{h}\right) \quad (90)$$

Cálculo de incertidumbre del ángulo máximo:

$$\sigma_{\theta}^2 = \left(\frac{\partial\theta}{\partial d}\right)^2 \sigma_d^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial h}\right)^2 \sigma_h^2 \quad (91)$$

entonces:

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{4d^2}{h^2 \left(1 + \left(\frac{d}{h}\right)^2\right)^2} \sigma_d^2 + \frac{4d^2}{h^6 \left(1 + \left(\frac{d}{h}\right)^2\right)^2} \sigma_h^2 \quad (92)$$

Haciendo el proceso anterior se puede analizar la cantidad de muones que se obtiene al sumar todos los eventos que hay en la región muónica. Ésta región va del primer mínimo a la carga máxima. Esto se hace para validar los datos al compararlos con un dato teórico, el cálculo de este teórico se puede hacer con la expresión 10.15. El flujo total de muones depende de la profundidad atmosférica (es una medida de la masa de aire por unidad de área) ésta se puede calcular con una sencilla relación. [35] [82].

$$X_i(h) = a_i + b_i e^{\left(\frac{-h}{c_i}\right)} \quad (93)$$

Donde h es la altura sobre el nivel del mar mientras que ai, bi, ci son constantes que dependen de la altura, para una altura de 0 a 5.9km sobre el nivel del mar los valores de estas son: ai = -159.683519 g/cm2, bi = 1202.8804 g/cm2, ci = 977139.52cm. El flujo de muones teórico se puede aproximar mediante la siguiente ecuación [35] [82].

$$J_{\mu} = 488.769544e^{-0.001638X} \quad (94)$$

Se define apertura instantánea (S) como el área total de instrumento proyectada en el tiempo, compuesta con la abertura angular. Para algún detector con abertura angular con simetría respecto a la coordenada azimutal y que llega a un ángulo cenital máximo denotado como θ_{max} así, la apertura angular está dada por [35][12]:

$$S(t) = \int_{A(t)} \int_{\Omega(t)} \cos(\theta) dA d\Omega = \int_{A(t)} dA \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{max}} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (95)$$

Resolviendo las integrales para encontrar la función de apertura S(t) se tiene que para la geometría del tanque es constante ver la ecuación 96:

$$S = \pi^2 \frac{d^2}{4} \sin^2(\theta_{max}) \quad (96)$$

Calculando su incertidumbre utilizando la covarianza tenemos que:

$$\sigma_s^2 = \left(\frac{\partial s}{\partial d}\right)^2 \sigma_d^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial \theta}\right)^2 \sigma_{\theta}^2 \quad (97)$$

entonces:

$$\sigma_s^2 = \frac{d^2}{4} \pi^4 \sin^4(\theta) \sigma_d^2 + \frac{d^4}{4} \pi^4 \sin^2(\theta)^2 \cos^2(\theta) \sigma_{\theta}^2 \quad (98)$$

Ahora bien, se define exposición como la apertura en el tiempo de la siguiente manera[12]:

$$P = \int_{t_1}^{t_2} S(t)dt \quad (99)$$

Ahora Integrando S en el tiempo para encontrar la exposición tenemos:

$$P = S * t \quad (100)$$

Calculando la incertidumbre:

$$\sigma_P^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)^2 \sigma_S^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)^2 \sigma_t^2 \quad (101)$$

entonces:

$$\sigma_P^2 = t^2 \sigma_S^2 + S^2 \sigma_t^2 \quad (102)$$

El flujo se define como el número de eventos (N) partido por la exposición [12].

$$J = \frac{N}{P} \quad (103)$$

Calculando la incertidumbre del flujo de partículas:

$$\sigma_J^2 = \left(\frac{\partial J}{\partial N}\right)^2 \sigma_N^2 + \left(\frac{\partial J}{\partial P}\right)^2 \sigma_P^2 \quad (104)$$

entonces:

$$\sigma_J^2 = \frac{1}{P^2} \sigma_N^2 + \frac{N^2}{P^4} \sigma_P^2 \quad (105)$$

Los resultados de los cálculos correspondientes a las variables descritas en esta sección se muestran en el Cuadro 22.

18.2.2. Descripción del cálculo del VEM

Un histograma de cargas se define como el histograma de cargas integradas de los pulsos detectados por cada PMT (tubo fotomultiplicador por sus siglas en inglés) durante un periodo de tiempo [12].

Entonces el VEM se puede calcular encontrando el segundo máximo de este histograma de carga, para ello se puede aproximar una curva a la región donde se encuentra el máximo,

este punto está intimamente ligado con el VEM [12][35]. Para el cálculo del VEM se realizaron dos programas computacionales y se modificaron para hacerlo de una forma más eficiente en lenguaje python (ver anexos B y C). El cálculo del VEM se repitió varias veces para así sacar el error estadístico de la medición. Hay que tener en cuenta que el valor del VEM es interferido por la calidad del agua dentro del detector. A continuación se explica paso a paso dicho cálculo.

El detector provee un archivo comprimido por hora que contiene filas de datos y se miran de la siguiente forma (ver Figura 112).

```

50 50 50
# t 1 185320
# c 6493
49 50 49
82 50 50
414 50 50
212 51 50
89 51 50
56 50 50
55 50 49
57 51 50
52 50 49
52 50 50
52 50 50
52 50 49
# t 1 384433
# c 6494
51 51 51
51 50 50

```

Figura 112: Archivo usual de datos de un WCD de LAGO datos obtenidos del detector ubicado en la Universidad del Valle de Guatemala

Como se puede apreciar en la imagen se encuentran # cada doce datos y esto se debe a la frecuencia de muestreo como se ha indicado anteriormente. La carga integrada es la integral discreta de un pulso (ver Figura 113, gráfico de un pulso usal con electrónica Nexys 2). Esto se debe hacer por cada 12 datos en el archivo (si el detector funciona con una FPGA Nexys 2) esto dará como resultado una lista o bien un conjunto de cargas integradas.

Posteriormente con todos los valores de las cargas integradas se realiza un histograma (histograma de cargas) y si se desea ver la curva de una manera más pronunciada gráficamente hablando, se grafica el histograma de una forma semilogarítmica (Ver Figura 114). Posteriormente se hace una regresión (parametrización) únicamente a la sección muónica del histograma, para encontrar el VEM simplemente hay que encontrar el máximo de esa curva o bien el segundo máximo de todo el histograma (este punto es conocido popularmente como rodilla).

Se sacará el valor de la rodilla por cada hora (no es necesario hacerlo con esta frecuencia), se saca con esta frecuencia el VEM para que se pueda monitorear cada hora tanto el estado del agua como de los fenómenos que involucran a los rayos cósmicos, esto se especificará de mejor forma en la siguiente sección. Note que se usa una regresión (en verde), , para monitorear y asegurar que ésta mantiene valores del orden esperado. Además se calcula la

dispersión con ayuda de un programa (anexo C).

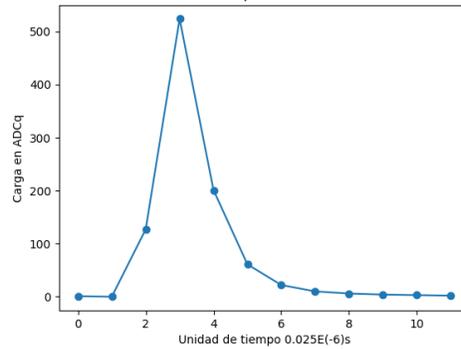


Figura 113: Pulso usual de datos de un WCD de LAGO, la integral de esta curva es la carga integrada para el caso discreto, únicamente es la suma de los datos. Gráfico hecho con los datos del detector ubicado en la Universidad del Valle de Guatemala

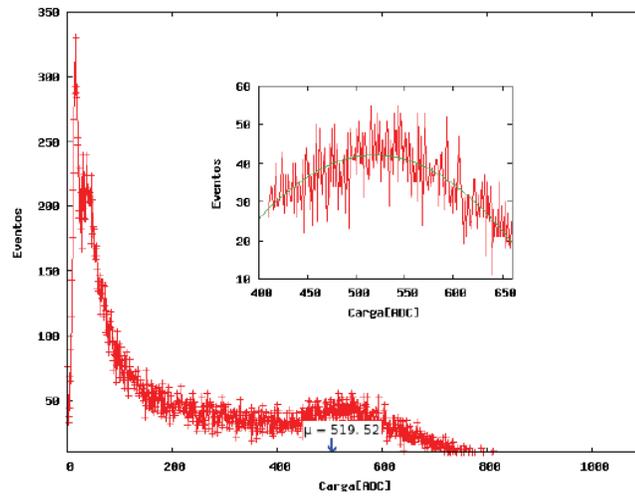


Figura 114: Histograma de carga usual de un WCD [13]

18.2.3. Cálculo del error en el VEM

Una de las cosas más importantes que se deben hacer al usar un nuevo instrumento de medición como lo es un WCD es asignarle un error de medición o bien una incertidumbre. En varios libros relacionados dice que se toma la mitad de la medida más pequeña, en este caso no se puede hacer debido a que el detector únicamente proporciona valores discretos, entonces se elegirá un error de ± 1 [83]. El primer cálculo que se hace en este proceso es el de la carga integrada, la propagación del error en este caso corresponde a una suma, así la incertidumbre obtenida es de ± 3.46 ADCq Sin embargo, como el detector da únicamente valores discretos, debemos aplicar la función mayor entero para que finalmente la incertidumbre de la carga integrada sea ± 4 ADCq. En esta incertidumbre se considera el error del instrumento y la propagación del error.

18.3. Calibración del WCD por método del VEM

Para realizar correctamente mediciones de un fenómeno físico, como lo es en este caso los rayos cósmicos, es necesario contar con un instrumento que otorgue valores lo más apegados al fenómeno real. Para ello es necesario calibrar a dicho instrumento, en este caso el WCD. Una calibración se define como un conjunto de operaciones que establece, en condiciones específicas, una relación que existe entre los valores indicados por un instrumento, sistema de medición o los valores representados por una medida materializada y los correspondientes valores conocidos de una magnitud medida [84]. Para realizar correctamente mediciones de un fenómeno físico, como lo es en este caso los rayos cósmicos, es necesario contar con un instrumento que otorgue valores lo más apegados al fenómeno real. Para ello es necesario calibrar a dicho instrumento, en este caso el WCD. Una calibración se define como un conjunto de operaciones que establece, en condiciones específicas, una relación que existe entre los valores indicados por un instrumento, sistema de medición o los valores representados por una medida materializada y los correspondientes valores conocidos de una magnitud medida [23]. El WCD tiene como unidad de medición al VEM, por lo tanto la calibración consistirá en encontrar la estimación correcta de un VEM mediante el procedimiento descrito en la sección anterior. El procedimiento se realiza por varios días (13 días) y se verifica que el valor sea uniforme, con ello se puede encontrar el error estadístico que se tomará como la desviación estándar de las mediciones del VEM. En la Figura 115 se muestra un gráfico de la estimación del VEM para 48 horas de toma de datos.

Anteriormente se describió cómo se calculó el VEM para la calibración, se mide este valor por varios días y se verifica que este valor es constante y con esto se puede encontrar el error estadístico que se tomará como la desviación estándar de las mediciones del VEM para ello ver la Figura 115.

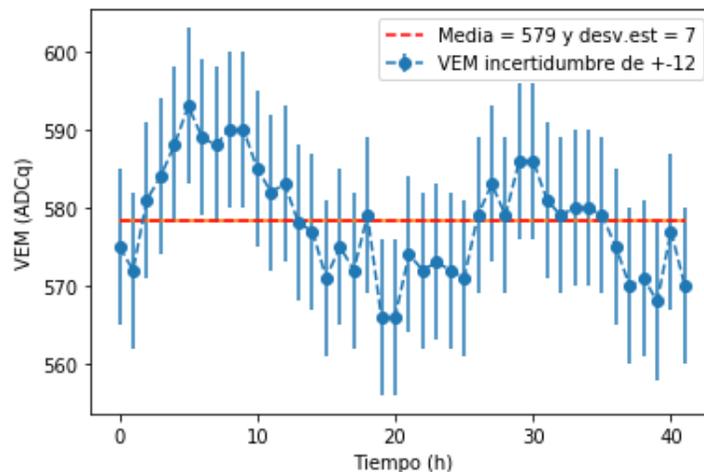


Figura 115: Gráfico de VEM a lo largo del tiempo por 48 horas de medición

18.4. Flujo vertical de muones

En esta sección se propone un método para encontrar el flujo vertical de muones que llegan a un WCD. Anteriormente se definió el flujo de partículas como el cociente del número de eventos sobre la exposición. Como únicamente se buscan muones verticales, debemos saber el número de muones verticales detectados por el tanque.

Por definición se sabe que el VEM es la carga integrada de un muón que pasa verticalmente por el tanque, por lo tanto como primer paso se debe contar cuantos eventos tienen una carga igual a la del VEM. Con esa información, se debe calcular la exposición del detector y así encontrar el flujo vertical de muones. Este cálculo es muy importante ya que conociendo este flujo se pueden realizar estudios astrofísicos de diversa índole, como son los objetivos del experimento LAGO. Dos ejemplos de dichos estudios se describen posteriormente en este trabajo.

18.5. Resultados

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a los estudios sobre calibración del WCD descritos anteriormente.

18.5.1. Cálculos y error

El Cuadro 22 muestra los parámetros dimensionales correspondientes al WCD ubicado en el volcán Atitlán.

Detector ubicado en el volcán Atitlán

Nombre	valor numérico
Diámetro del tanque	$0.820 \pm 0.005\text{m}$
Altura del tanque	$1.140 \pm 0.005\text{m}$
Ángulo máximo	$0.6236 \pm 0.0006 \text{ rad}$
Apertura	$0.566 \pm 0.001\text{m}^2\text{sr}$
Exposición	$2036 \pm 4\text{sm}^2\text{sr}$

Cuadro 22: Cálculo de valores con incertidumbres del detector ubicado en el volcán Atitlán

El valor de la carga máxima muónica, necesario para comparar con la estimación del VEM (de acuerdo con la ecuación 87) es de:

$$\mu_{max} = 642 \pm 8\text{ADC}q \quad (106)$$

Posteriormente se repetirá el cálculo para comprobar que dicho valor esté dentro del orden esperado.

18.5.2. Cálculo del VEM y calibración del VEM

Como se ha explicado antes, el VEM es la constante de calibración, ésta varía por cada detector. Si esta cambia a través del tiempo en forma decreciente puede significar que el agua del detector esté en mal estado. Incluso según [12] se puede calcular la energía de un muón que atraviesa verticalmente el tanque. Se realizaron datos por hora para producir un histograma de cargas el cual se muestra en la Figura 116.

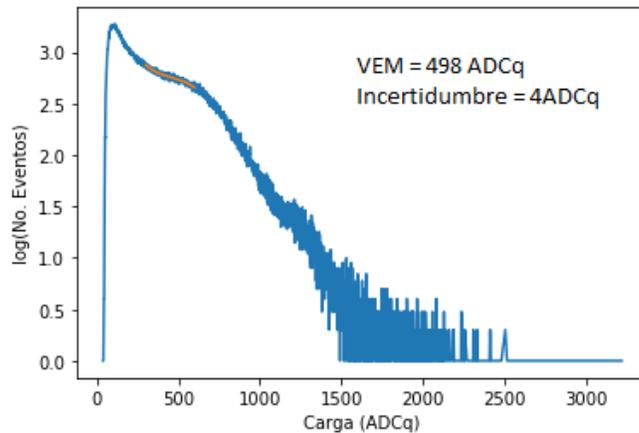


Figura 116: Histograma de cargas semilogarítmico del detector K'inich Ahau ahora ubicado en el volcán Atitlán

Para continuar con la calibración se toman varios días de datos para verificar si el VEM es constante en el tiempo, para ello se grafica VEMs contra tiempo (ver Figura 117).

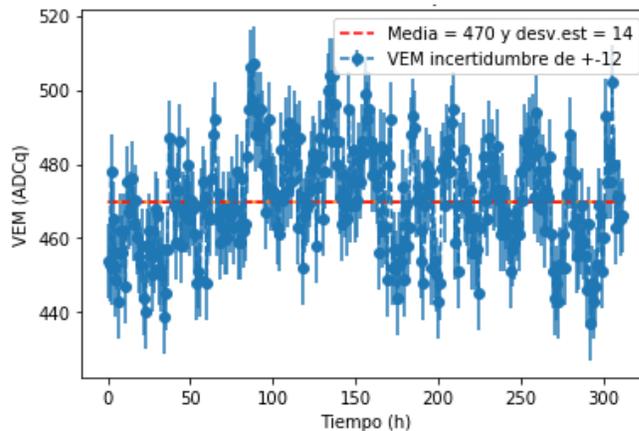


Figura 117: Gráfico de Vems por tiempo del detector K'inich Ahau ahora ubicado en el volcán Atitlán

Para comprobar si la media obtenida es un valor representativo se procede a hacer un

histograma para los valores de los VEMs calculados (ver Figura 118).

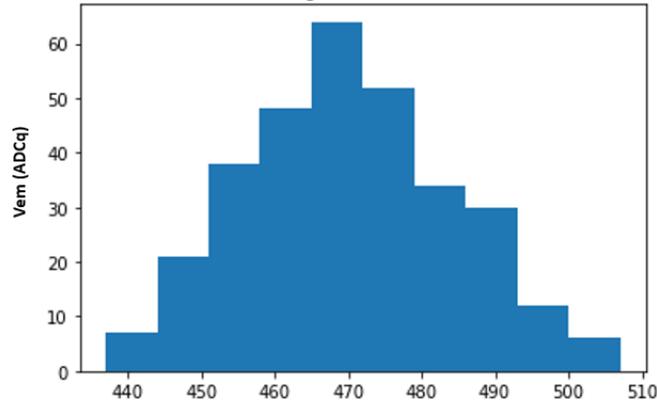


Figura 118: Histograma de VEMs recolectados durante 300 horas K'inich Ahau ahora ubicado en el volcán Atitlán con Media=470, Desviación estándar=14 y kurtosis=-0.44

El valor de la Kurtosis, -0.44, confirma que es una distribución normal, además al calcular las medidas de tendencia central (moda, mediana y media), éstas tienen el mismo valor. También se hizo una prueba Z de media y se concluyó que la media sí es representativa. Esto implica que al menos el 95 % de los datos está a 2σ (dos desviaciones estándar) de la media. Así, se reporta como resultado de este estudio que el VEM es $4.7 \cdot 10^2 \pm 0.2 \cdot 10^2$ ADCq.

Según [12] una aproximación para la energía por unidad de área es:

$$\frac{dE}{dl} \approx 2MeV/cm \quad (107)$$

Sabiendo que el tanque mide 1.140 ± 0.005 m de altura se calcula la energía para 1 VEM:

$$1VEM = 4.7 \cdot 10^2 \pm 0.2 \cdot 10^2 ADCq = 228.0 \pm 0.5 MeV \quad (108)$$

18.5.3. Flujo vertical de muones

Para calcular el flujo de muones se debe encontrar el VEM y ver cuantos muones tienen una carga integrada igual que la del VEM, posteriormente se debe dividir el número vertical del muones entre la exposición. En la Figura 119 se puede ver el gráfico de flujo vertical de muones a lo largo de tiempo para el WCD.

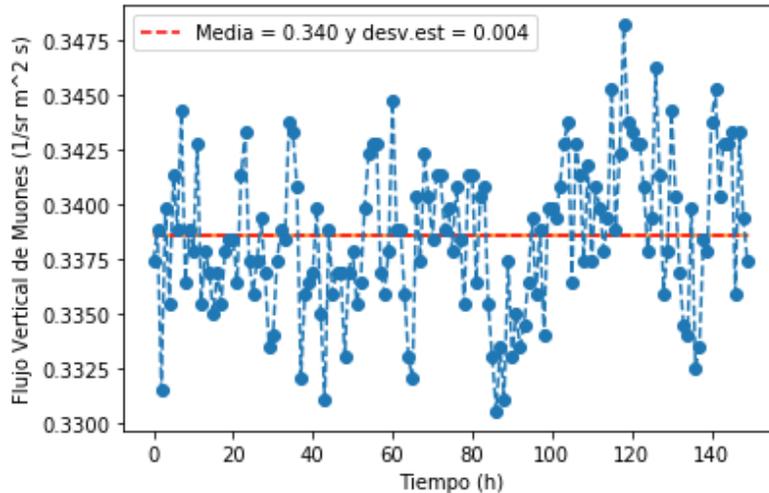


Figura 119: Gráfico de flujo de muones verticales en el tiempo

En la Figura 119 se observa que el flujo vertical de muones cambia como función del tiempo, sin embargo esas fluctuaciones no son significativas. Solo se considerará significativa una variación que sea más grande que 2σ .

18.6. Análisis de datos por medio de *Big Data*

18.6.1. Algoritmos

A partir de poseer una base teórica, se estudia cada uno de los algoritmos anteriormente utilizados por parte de la generación pasada de LAGO, muchos de estos realizados por Horacio Arnaldi, los cuales se encuentran en el wiki privado de LAGO. Entre estas dos versiones existe una diferencia. La librería Numpy, la cual utiliza C, que corre a bajo nivel por eficiencia y diseño, para ejecutar operaciones lógicas y aritméticas. Además se utilizan funciones internas de esta librería para generar los resultados, esto permite ejecutar los algoritmos con mayor eficiencia ya que sus bases de por si son eficientes.

Su forma de ejecución secuencial y falta de paralelismo dificultan la distribución de carga sobre los distintos núcleos de procesamiento disponibles. Por lo tanto, se plantea utilizar algoritmos que resuelvan este tipo de problemas sin afectar con costos elevados de desarrollo y poco nivel de habilidad para pivotear según las necesidades del proyecto.

Se propone utilizar un framework que utiliza el paradigma funcional para facilitar la distribución de cargas en los múltiples CPU's y paralelismo, siempre generando objetos inmutables sobre los datos para no generar locking u otros problemas que se crean por usar espacios de RAM o Cache en una carrera contra los demás CPUs para obtener un recurso en específico que termina atrasando todo el proceso. Otro elemento a tomar en cuenta es utilizar funciones que no dependan de un valor externo o global, así se logra obtener funciones que siempre retornen el mismo valor dada la misma entrada.

18.6.2. Análisis exploratorio

Es necesario entender y manipular los datos generados, debido a esto se realiza una análisis exploratorio sobre la información. A partir de los anteriores indicadores, se define y entiende de mejor forma cada uno de los archivos generados por los eventos que acontecieron. Podemos entender con mayor profundidad las necesidades y preguntas directamente relacionadas con esta información generada.

Cada uno de los archivos generados por el programa ACQUA consiste en una hora de adquisición de datos. Esta información contiene metadata insertada entre líneas, los cuales indican variedad de identificadores distintos.

- **Comentarios:** líneas comenzando con dos signos numeral.
- **Tiempo, temperatura, presión, gps:** metadata de adquisición.
- **Señales:** líneas sin numerales.

Cada uno de estos archivos siguen el siguiente esquema:

1. Versión (1 línea)
2. Encabezado
3. 3600 bloques de señales
 - a) Tiempo (1 línea)
 - b) Señales (n líneas, donde n depende de la precisión de la FPGA)
 - c) Sub-bloque de metadatos.

Una vez finalizada la adquisición del pulso, se agregan dos líneas adicionales que describen el canal por el cual se obtuvo la adquisición de los datos. Esta descripción utiliza una mascara para mapear a un número entre 1 y 7, que corresponden a uno de los siguientes códigos binarios:

Decimal	Binario	Canales
1	0b001	canal 1
2	0b010	canal 2
3	0b011	canal 1 y canal 2
4	0b100	canal 3
5	0b101	canal 1 y canal 3
6	0b110	canal 2 y canal 3
7	0b111	canal 1, canal 2 y canal 3

Cuadro 23: Máscara código binario a canal

A partir del Cuadro 23 se puede filtrar la información para solo tener que trabajar con un tercio de la memoria RAM que hubiese sido necesario utilizar, por ser 2 datos de señal que se desechan y tampoco ocupa espacio en memoria ni tiempo de análisis desperdiciado.

18.6.3. Análisis de datos

Al ser Scala el lenguaje a utilizar, no existe variedad de librerías para realizar análisis numérico. Además, como requisito esta librería debe de cumplir con que esté escrito el código para ser ejecutado paralelamente distribuido, de lo contrario esto sería un punto de atraso en el análisis. Este análisis se ejecuta luego de haberse completado la fase de limpieza de datos. Al finalizarse este trabajo de Spark, todos los resultados se almacenan en una tabla de base de datos dentro del ecosistema de Yarn, específicamente en Hive.

Según la Guía de la Electrónica de LAGO, se realizan tres procedimientos iniciales que proveen visualizaciones de los eventos para su posterior calibración y clasificación. Se toma en cuenta el modo de histograma, debido a que se relaciona directamente con el cálculo del Vertical Equivalent Muón, esto debido a el especial interés con la carga de los muones que atraviesan el tanque verticalmente.

En base a un archivo de información se generó la Figura 120 para visualizar cada uno de los pulsos almacenados en los archivos de adquisición. En este conjunto de datos existen pulsos detectados los cuales sobrepasan la línea base.

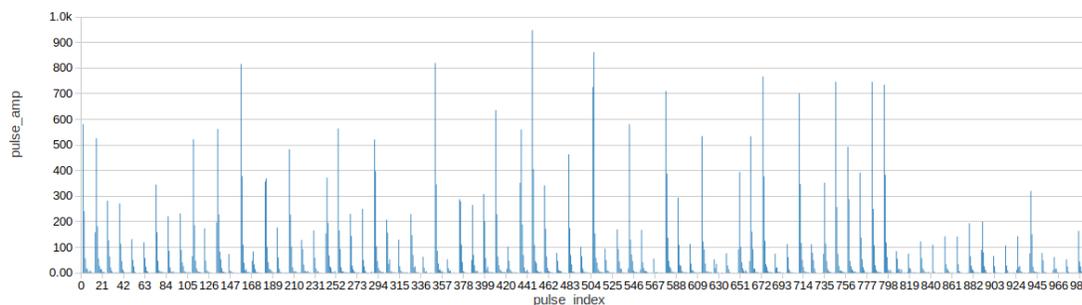


Figura 120: Pulsos capturados

Se realiza histograma de cargas como se puede observar en la Figura 121 la cual posee los valles y crestas que debe poseer según teoría.

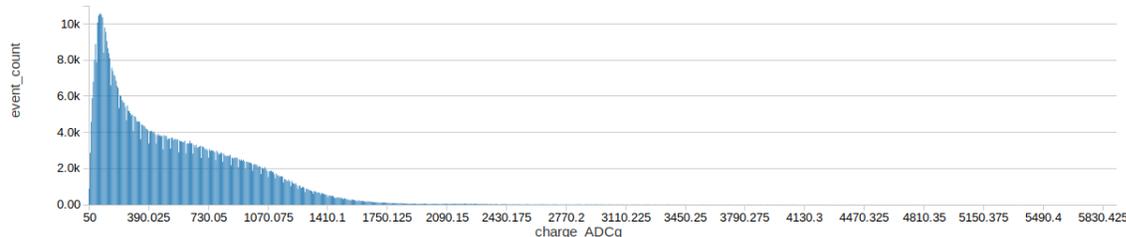


Figura 121: Histograma ADCq

Se aplica logaritmo base diez para enfocar y dar a resaltar el segundo punto máximo. De esta forma se puede obtener con mayor facilidad el punto donde la derivada posea igualdad a cero. Visualmente se puede observar en la Figura 122.

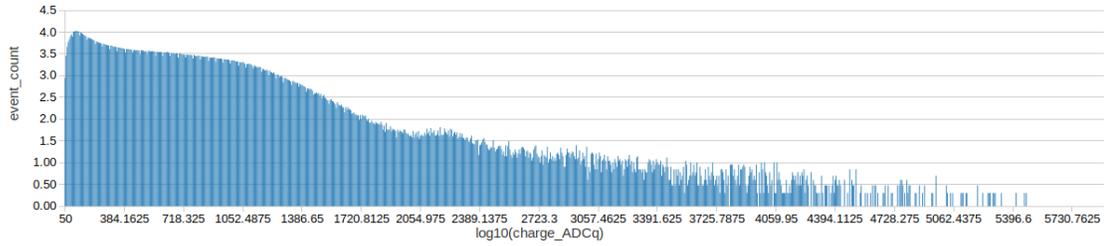


Figura 122: Histograma $\log_{10}(\text{ADCq})$

Se han implementado una serie de filtros sobre los pulsos, orientados a mejorar la calidad de los análisis y eliminar cierto porcentaje de ruido sobre la información anteriormente generada. Se evalúan dos tipos de filtros, Savitzky-Golay y Media Móvil Simple, buscando suavizar los datos por la necesidad de encontrar el segundo máximo y obtener el VEM. Es necesario obtener la derivada que posea igualdad a cero entre los datos, de esta forma se asegura uno que el valor es el segundo máximo.

Sobre todos los datos, luego de aplicarle logaritmo base diez para enfocar y resaltar el segundo punto máximo, se calcula su derivada, buscando el área que posea mas derivadas cercanas a cero. Se genera un histograma de dos dimensiones para localizar la mayor densidad de ocurrencias de derivadas con respecto el rango entre el cual se evalúa.

Por medio de los coeficientes de Savitzky-Golay, se describen métodos para calcular desde la primera a la quinta derivada de la información ya transformada, por lo tanto no es necesario obtener nuevamente la derivada después de haber filtrado por algún suavizador, en cambio en media móvil se debe de aplicar el filtrado de suavizado más alguna técnica de derivación numérica. Se calcula una Figura 123 en modo histograma de dos dimensiones que permite obtener la frecuencia en que más repeticiones existen en un área con derivadas cercanas a cero.

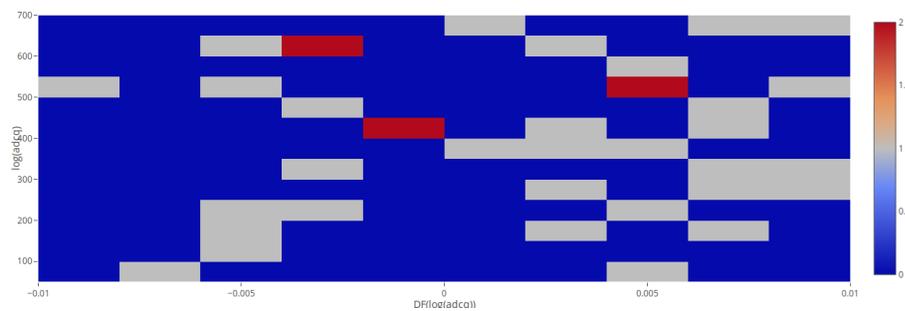


Figura 123: Savitzky-Golay: Histograma 2D conteo derivadas por área

Media móvil es un cálculo utilizado para analizar un conjunto de datos creando promedios sobre los puntos más cercanos, para luego retornar un nuevo valor que reemplaza el punto medio de la serie de información. En este caso, sobre esta información se debe de aplicar un método para obtener la derivada discreta después de haber aplicado el filtro. e calcula una Figura 124 en modo histograma de dos dimensiones que permite obtener la frecuencia en que más repeticiones existen en un área con derivadas cercanas a cero.

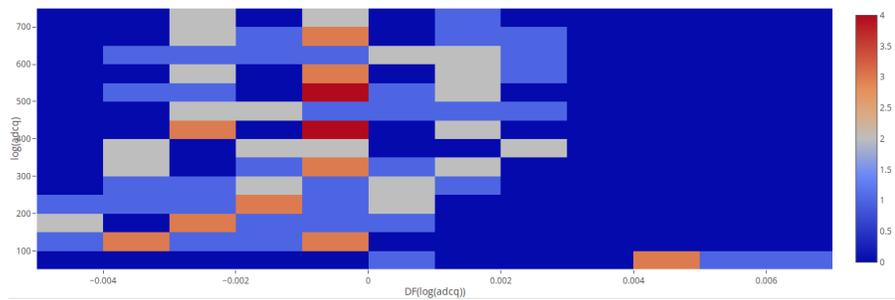


Figura 124: Media Móvil Simple: Histograma 2D Conteo Derivadas por Área

Además se calcula la segunda derivada, de esta forma determinar visualmente un cambio de concavidad, buscando el segundo punto máximo al existir un cambio de signo.

18.6.4. Comparación de algoritmos

Para llevar a cabo la comparación de algoritmos, tradicional versus paralelamente distribuido, se tomaron en cuenta dos factores predominantes que pueden variar conforme se generan los archivos de texto: el tamaño del archivo de texto y el conjunto de datos conforme la hora en que se realizó el muestreo.

El conjunto de datos fue recolectado en febrero 1 del 2,018, el cual solo posee un canal de adquisición activado.

El código que se utiliza para generar los resultados de una forma tradicional fue tomado de la wiki privada de LAGO, creado por Horacio con el framework Numpy 1.15.1 ejecutado en Python 3.6.6.

Se ejecutaron ambos algoritmos en el mismo ambiente, se describen en rojo el análisis realizado por medio de RDDs provisto por medio del API de Spark. En azul se puede observar los resultados de la implementación en Numpy.

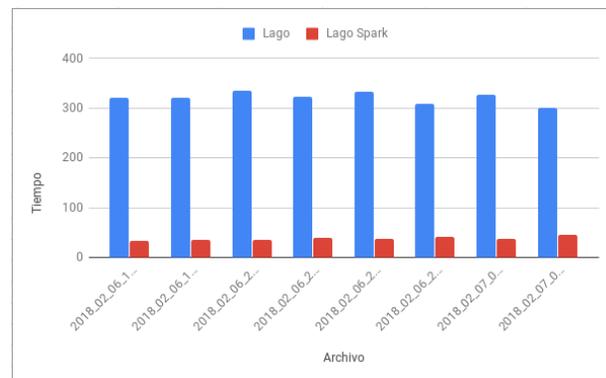


Figura 125: Comparación ejecución normal vs ejecución paralelamente distribuida

En la siguiente tabla se muestra un subconjunto de resultados como resumen. Describe

el tamaño, y los tiempos respectivos en cada implementación de los algoritmos.

Identificador	Tamaño (mb)	Lago (decisegundos)	Lago Spark (decisegundos)
2018_02_06_18h00	16.6	321,751696	34,24
2018_02_06_19h00	16.5	321,224874	35,42
2018_02_06_20h00	16.5	334,535943	35,05
2018_02_06_21h00	16.4	323,444821	40,44
2018_02_06_22h00	16.5	333,728391	37,18
2018_02_06_23h00	16.5	308,514006	40,86
2018_02_07_00h00	16.5	327,596714	38,22
2018_02_07_01h00	16.5	300,076465	45,16

Cuadro 24: Muestra tabla de resultados carpeta febrero 1

Se realizaron los respectivos programas con el diferente conjunto de datos la comparación de algoritmos en cuanto al resultado luego de aplicarle los filtrados.

Filtro	Resultado (ADCq)	Desviación Estándar(ADCq)	Porcentaje de Error
Savitzky-Golay	525	25	8.69
Media Móvil Simple	475	25	0.79

Cuadro 25: Resultado comparación resultado del VEM

18.7. Visualización de análisis de datos

18.7.1. Requisitos funcionales

- Proveer acceso a usuarios permitidos al dashboard.
- Desplegar los resultados del análisis en modo web.
- Filtrar la información por fecha.
- Filtrar la información por lugar.
- Desplegar resultados del análisis.
- Aproximar el segundo máximo local del histograma de cargas
- Calcular VEM

18.7.2. Diseño e integración

Luego de acordar los requisitos funcionales, se estableció con los demás integrantes del megaproyecto la infraestructura que soportará el análisis sobre los datos, al igual que con los demás módulos con los cuales se debe de interactuar ya que estos se encargaran de transmitir, almacenar, generar y analizar la información. A partir de esto se puede definir el ambiente

de ejecución sobre el cual los algoritmos funcionarán, y de esta forma usar tecnologías que aprovechen al máximo el flujo y diseño de la infraestructura establecida.

Se deben almacenar los análisis anteriormente ejecutados. Por parte de la base de datos se tiene el modelo entidad relación mostrado en la siguiente figura.

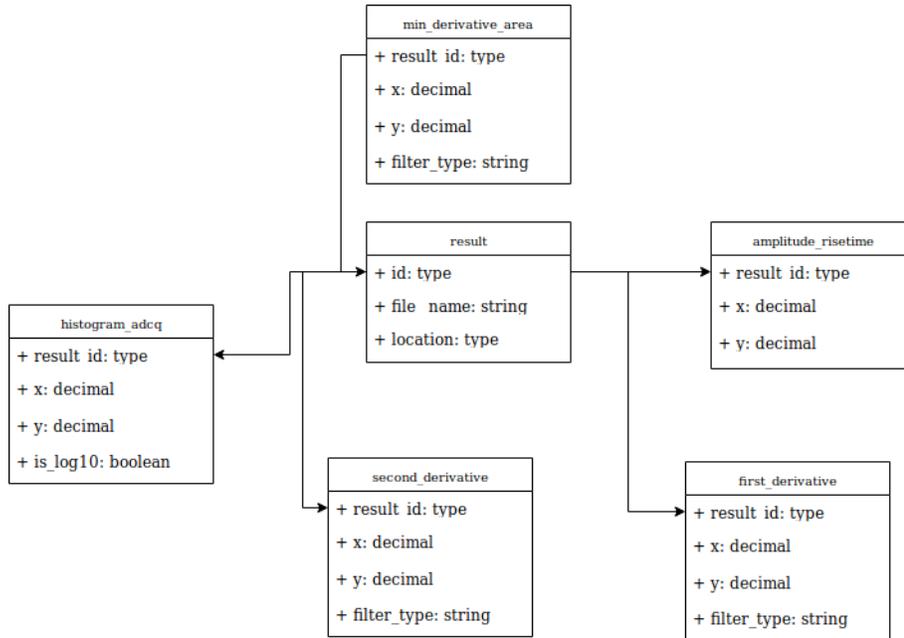


Figura 126: Dashboard: diagrama entidad relación de resultados

18.7.3. Ecosistema

El módulo deberá cumplir con la necesidad de analizar la información desde un sistema distribuido para obtener resultados en menor tiempo, este objetivo se cumple al utilizar Spark como framework para ejecutar cada una de las tareas de análisis.

Además, se debe de contar con un medio para consumir de forma sencilla la información, se utiliza React para la visualización de la información debido a su filosofía para mapear los datos hacia el DOM de forma instantánea y por la razón de ser él más veloz al manipular el DOM creando una copia inicial del mismo de forma virtual en memoria RAM.

Ambos se basan en manipular la información en RAM, Spark al tener la información en RDD distribuidos en cada una de las computadoras que conforman el cluster y React al utilizar su virtual DOM.

Para realizar el app del dashboard, se utilizo VirtualEnv para manejar las dependencias del proyecto y encapsular el proyecto en un solo ambiente de ejecución. Se aíslan las dependencias con respecto al sistema global de Python en el sistema operativo.

18.7.4. Dashboard

Para llevar acabo el dashboard cumpliendo los anteriores requisitos funcionales y además lograr ejecutarlo utilizando React y Flask, se decidió utilizar la herramienta Dash la cual provee la facilidad de escribir complejos visualizadores de información pero con una implementación sencilla.

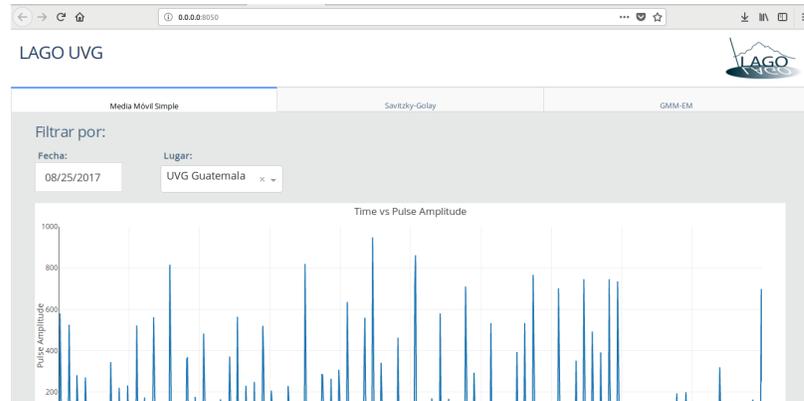


Figura 127: Dashboard: Vista principal, menú para selección por tabs

Además se puede filtrar por fecha, hora y lugar en cuanto a los resultados. De esta forma se puede describir el comportamiento en general de los datos.

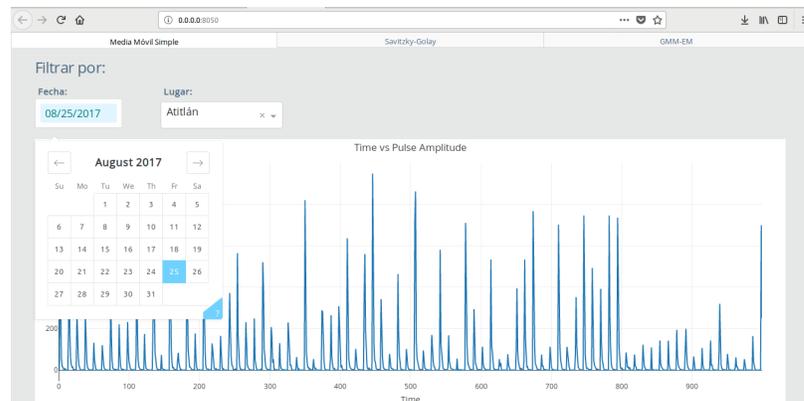


Figura 128: Dashboard: Selección por fecha

Visualización de histograma de dos dimensiones nos permite observar la frecuencia combinada de dos variables, nos enfocamos en la clasificación según carga integrada y el valor de su derivada (Figura 129).

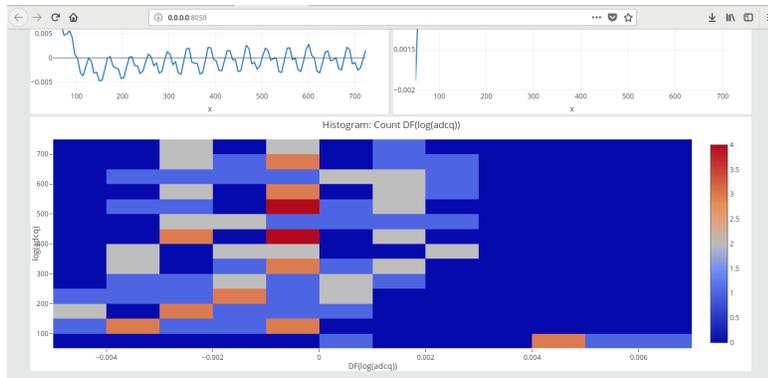


Figura 129: Dashboard: Histograma 2D conteo derivadas por area

Verificación de cuenta por medio login basado en autenticación sencilla con las mismas credenciales para acceder a la wiki de lago (Figura 130).

Figura 130: Dashboard: Vista de Login

Se realiza un gráfico de dispersión para visualizar el comportamiento de la información. El tiempo de subida de un pulso contra amplitud del pulso.



Figura 131: Dashboard: Amplitud de Pulso vs Tiempo hasta Amplitud Máxima

19.1. Diseño de arquitectura

Según el funcionamiento del tanque se sabe que el tanque genera archivos con los pulsos eléctricos del muon pasando por la implementación de LAGO. Estos archivos, que se generan cada hora, tienen un aproximado de 1.5GB a 2GB de tamaño. En la gráfica se puede observar el tamaño de los datos que se tienen que almacenar y analizar por cada implementación.

Para manejar este volumen de datos se planteó realizar una arquitectura que reuniera los recursos para poder almacenar, procesar y analizar los datos. Esta arquitectura la podemos encontrar dentro de la teoría como “Divide and conquer” o su traducción al español “Divide y vencerás”. Esta teoría nos enseña que un gran problema lo podemos dividir en pequeños problemas.

La arquitectura elegida por la teoría para tratar grandes problemas es una arquitectura Maestro – Esclavo. La arquitectura maestro esclavo se basa en dos tipos de componentes. Los componentes tipo maestro son aquellos que distribuyen los trabajos hacia los componentes esclavos. Los componentes esclavos reciben los trabajos y los resuelven.

Sobre este tipo de arquitectura se puede implementar un cluster. Un cluster reúne los recursos de muchos componentes y los utiliza como un componente. Un cluster se puede comparar con una arquitectura tradicional como lo es un data warehouse.

Un data warehouse es un conjunto de equipo conectado por una red. La gran diferencia es que el data warehouse tiene que ejecutar todos sus procesos de transformación de datos en las noches. Esto hace que los resultados que se buscan obtener tienen un retraso de un día.

Esto afecta a las ganancias del negocio. Según Forbes para manejar un petabyte de infor-

mación en una infraestructura tipo data warehouse se necesita de \$100,000,000.00 mientras que manejar este volumen de datos dentro de un cluster se necesita de \$1,000,000.00. La diferencia entre las arquitecturas reside en los procesos para transformar los datos y las herramientas que utilizan. Mientras los data warehouse utilizan herramientas licenciadas la mayoría de las herramientas para un cluster son de libre distribución.

Para poder combatir los problemas de tiempo de análisis, recurso computacional y recurso financiero se planteó una solución de Big Data. Estas palabras reflejan una situación de un conjunto de datos cuyo tamaño está más allá de la capacidad de las herramientas de bases de datos convencionales. Conforme a capacidad nos referimos que las herramientas no pueden tratar de capturar, almacenar, gestionar o analizar esta gran cantidad de datos.

Por medio del cluster se pudo reunir los recursos necesarios para analizar los datos de las implementaciones LAGO.

La infraestructura implementada para este proyecto requiere de dos componentes básicos como lo es el hardware y el software. Para el hardware se utilizó equipo donado por la Universidad del Valle de Guatemala, dentro de este equipo podemos encontrar computadoras, servidores, switches entre otros componentes.

Para el software se utilizará un framework que recrea un sistema distribuido llamado Hadoop. Este framework es un conjunto de herramientas que permiten distribuir recursos y trabajos. Además, las herramientas provistas por este framework permiten el manejo y almacenamiento de grandes cantidades de datos.

Para este proyecto se decidió utilizar la distribución de Hadoop Hortonworks. Este software es un software Open Source y de libre Distribución. No se necesita de la compra de licencias para obtenerlo e implementarlo a diferencia de otras Distribuciones.

19.2. Software y hardware

19.2.1. Hardware

Para lograr que las computadoras y servidores fueran parte del clúster se necesitó que se pudieran identificar y comunicar entre ellas. Las computadoras se pueden comunicar entre ellas cuando pueden intercambiar paquetes de información, para esto todas las computadoras deben de tener el mismo segmento de red o enviarse los paquetes por medio de una VPN.

Tanto el servidor como las computadoras fueron parte de un proceso de formateo de información, esto para asegurar que no tuvieran información de usos pasados. Luego del proceso de formateo el siguiente paso fue la instalación del sistema operativo. Para fines de este megaproyecto se eligió el sistema operativo centOS7.

CentOS7 es una distribución del sistema operativo Linux, fue escogida para este proyecto por ser una distribución totalmente libre, por lo cual no se necesita pagar alguna licencia para poderlo instalar. Además, es una distribución ligera y fácil de manejar.

Durante la instalación del sistema operativo centOS7 se tuvo que configurar las parti-

ciones en los discos duros de los componentes del clúster. Todos los componentes tienen la siguiente configuración de particiones:

- /

- /boot

- /boot/efi

- swap

- /grid_0

La partición / tiene una capacidad de “50 GB”, esta partición tiene esta capacidad ya que dentro de esta partición se guardan los repositorios locales de Ambari y Hadoop.

La partición /boot tiene una capacidad de “1024 MB”, esta partición almacenará los kernels de Linux y no necesita tener mucho tamaño.

La partición /boot/efi tiene una capacidad de “500 MB”, esta partición se tiene que crear cuando los sistemas son booteables desde una interfaz UEFI.

La partición swap tiene que tener el doble de memoria RAM que tiene el dispositivo. Esta partición es un espacio que cuenta Linux para ejecutar procesos que la memoria RAM ya no puede manejar. Por lo cual en vez de ejecutar los procesos con la RAM los ejecuta con el disco duro.

La partición /grid_0 es el restante del disco duro después de crear las otras particiones. Esta partición suele ser la más grande y servirá para almacenar los archivos.

Todo el clúster se encuentra bajo la red 192.168.5.x esta red es prevista por el switch HP. La gestión de los permisos para esta red fue responsabilidad del presente módulo. Se gestionó que la computadora que se encuentra en el laboratorio c112 pertenezca a esta red también para que el traspaso de los archivos generados en el volcán y en UVG campus central se realizara de una manera más rápida.

Todo este equipo fue donado por el departamento de Ciencias de la Computación y por el Centro de Estudios en Informática Aplicada. La mayoría de este equipo se encuentra dentro de un Rack en salón J205 de la Universidad del Valle de Guatemala. Este equipo se encuentra organizado dentro del rack de la siguiente manera:

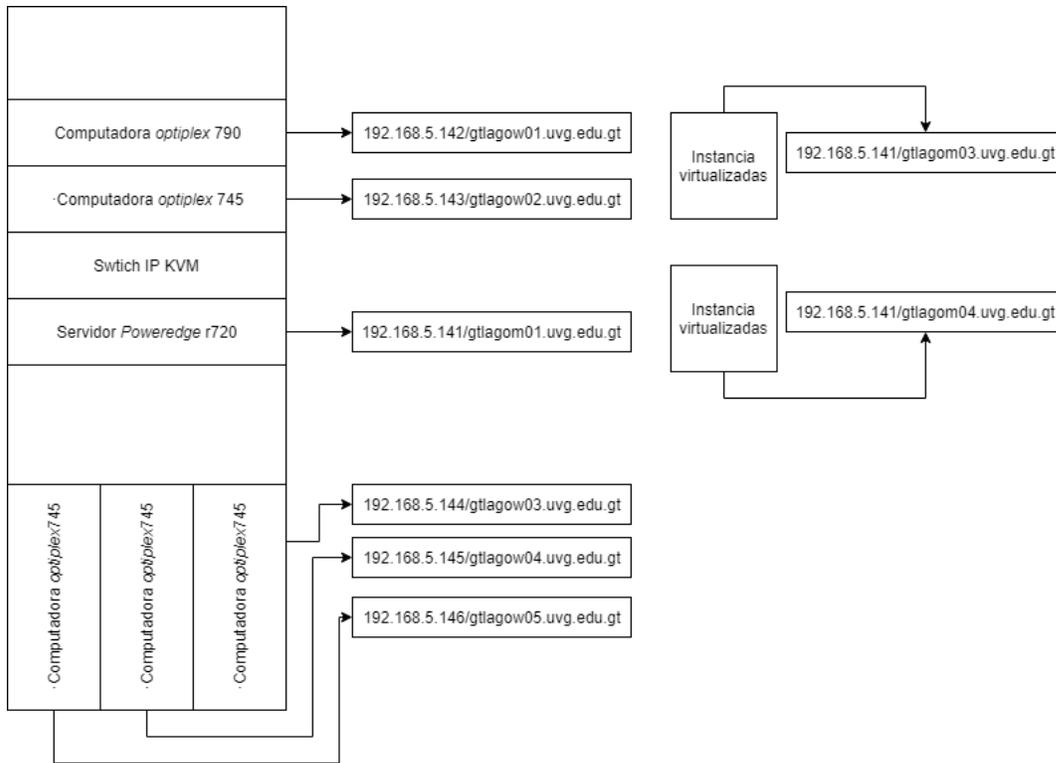


Figura 132: Distribución de equipo dentro del rack

Listado de características de los equipos:

Nombre de Equipo	Disco Duro	Memoria Ram	Cores
Servidor <i>Poweredge</i> r720	600 GB	31.20 GB	24 Cores
Instancia Virtualizada	860 GB	7.64 GB	2 cores
Instancia Virtualizada	860 GB	7.64 GB	2 cores
Computadora <i>Optiplex</i> 745	180 GB	2.77 GB	2 cores
Computadora <i>Optiplex</i> 745	180 GB	2.77 GB	2 cores
Computadora <i>Optiplex</i> 745	180 GB	2.77 GB	2 cores
Computadora <i>Optiplex</i> 745	180 GB	1.79 GB	2 cores
Computadora <i>Optiplex</i> 790	300GB	5.55 GB	4 cores

Cuadro 26: Cantidad de recursos por computador

Por medio de la anterior tabla podemos obtener las métricas finales de recursos para el cluster:

Recurso	Cantidad
Disco Duro	3.17 TB
Memoria RAM	62.13
Cores	38 Cores

Cuadro 27: Cantidad total de recursos

Por medio de la implementación de esta arquitectura se logro recabar la cantidad de recurso mostrado en la tabla numero “8.1”. Uno de los recursos que mas requiere el proyecto es el recurso del espacio. La cantidad de espacio es vital para poder guardar los archivos que producen los tanques.

La cantidad actual de espacio con que cuenta el megaproyecto es 3.34 TB en este espacio se pueden lograr almacenar un total de 1,670 archivos .dat, asumiendo que los archivos generados pesan alrededor de 2 GB. 1,670 archivos .dat es un total de 1,670 horas de toma de datos. Estas horas convertidas en días es un total de 208 días.

Cabe aclarar que el proyecto no necesita un histórico de los archivos crudos. El proyecto necesita de un histórico de los resultados del análisis de datos. Esto reduce el uso del espacio considerablemente. Al reducir el uso del espacio aumenta el tiempo de uso de mantenimiento del cluster.

La cantidad de memoria RAM conseguida ofrece al megaproyecto ahorro en tiempo al momento de ejecutar algoritmos pesados. Se encuentra una mayor diferencia en ejecutar un algoritmo con 2GB y ejecutar el mismo algoritmo con 62 GB de RAM.

Por medio de la cantidad de procesadores conseguida se aumentó la capacidad de paralelismo del sistema. Esto permite aumentar la cantidad de programás que se ejecutan al mismo tiempo. Hadoop aprovecha esto al ejecutar bloques de trabajo paralelamente y poder ejecutar más rápido sus programás.

Hadoop requiere que los nodos maestros puedan acceder por medio del protocolo ssh a los nodos esclavos sin contraseña. Esto permitirá a Hadoop poder instalar los servicios clientes en los nodos esclavos y poder acceder a ellos para ejecutar los trabajos.

Por el tipo de software elegido y el tipo de equipo gestionado se decidio elegir un arquitectura Maestro/Esclavo. En la cual los nodos maestros distribuyen el trabajo sobre los nodos esclavos. A continuacion se puede obser un ejemplo de este tipo de arquitectura.

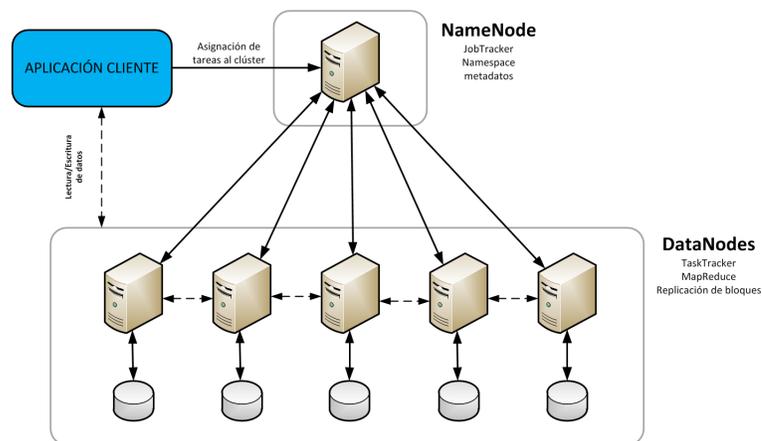


Figura 133: Infraestructura final desarrollada

Por medio de los recursos que presentaba cada uno de los componentes del cluster se pudo diseñar e implementar la siguiente arquitectura:

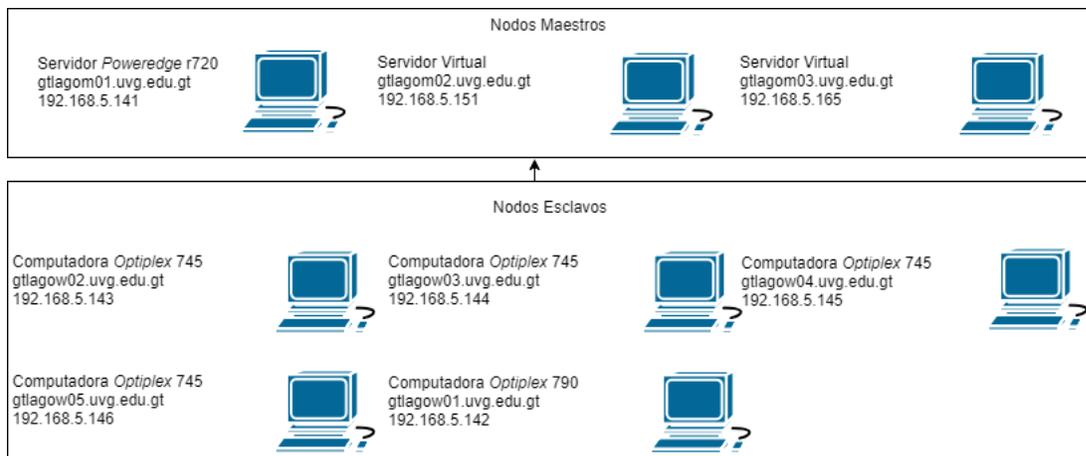


Figura 134: Infraestructura final desarrollada

Como se puede visualizar en el diagrama anterior la infraestructura cuenta con 3 nodos tipo maestro y 5 nodos tipo esclavo.

19.2.2. Software

Luego de asegurar la transferencia de datos entre las computadoras se prosiguió con la guía de instalación de Hortonworks para poder instalar los servicios que su plataforma ofrece.

Cabe recalcar que Hadoop de Hortonworks fue seleccionado como software de procesamiento por diferentes razones que se listan a continuación:

- Libre distribución
- Herramientas Integradas Nativamente
- Desarrollo y Soporte por comunidad
- Amplia Documentacion

La libre distribución es esencial para el proyecto desde el sentido económico. Hortonworks es un software completamente estable y sin costo alguno para su implementación, la forma de ganar dinero de Hortonworks es en su soporte. Ya que el megaproyecto tenía la necesidad de analizar grandes cantidades de datos, pero no contaban con el presupuesto, Hortonworks fue la opción a elegir.

Conforme a las Herramientas Integradas Nativamente, Hortonworks provee una plataforma con un total de 31 servicios. Todos estos servicios son herramientas que ayudan al análisis de datos. Entre estas herramientas encontramos bases de datos, control de flujos de información, lenguajes de programación entre otros.

Hortonworks cuenta con una comunidad registrada de 24,356 [85] usuarios. Estos usuarios dentro de la comunidad se encargan de solucionar problemás del software de Hortonworks. Esta practica de reportar problemás y solucionarlos hacen que Hortonworks sea un software más estable durante el tiempo.

La documentación de Hortonworks para implementar un cluster con su software es clara y concisa. Esto ayuda tanto a principiantes como expertos a que los errores de la implementación sean fáciles de resolver.

Esta instalación de Hadoop cuenta con sus repositorios locales, por lo cual se descargó los repositorios de Ambari y los repositorios de Hadoop. Estos repositorios se sirvieron por medio de un servidor http para que pudieran ser instalados.

Luego de sincronizar los repositorios en el nodo maestro se prosiguió para instalar y configurar Ambari. Ambari, según lo descrito por el marco teórico, es la interfaz gráfica que nos ayuda a observar diferentes métricas del cluster, como también instalar nuevos servicios o eliminar servicios que ya no necesitamos. Una de las funcionalidades de Ambari es que podemos obtener el estado de todos los nodos que pertenecen al clúster. Cabe recalcar que el Servicio Ambari, a pesar de ser un servicio Open Source fue nativamente integrado a Hortonworks, lo cual brinda la facilidad y compatibilidad con otros servicios de la plataforma.

Una vez instalado y configurado Ambari se realizó la configuración de todo el cluster. En estas configuraciones se decide el nombre del cluster, se registran los nodos, se decide dónde estarán los servicios, y por último, se instalan los servicios.

Luego de asegurar la comunicación de los componentes se descargaron tanto los repositorios de HDP como de Ambari y se sirvieron en un servidor http para que la instalación fuera más rápida.

Index of /hdp/centos7

Name	Last modified	Size	Description
 Parent Directory			-
 HDP-2.6.3.0/	2018-10-06 10:44		-
 HDP-UTILS-1.1.0.21/	2018-10-06 12:33		-
 ambari-2.6.0.0/	2018-10-06 12:49		-
 base/	2018-10-06 12:49		-
 extras/	2018-10-06 15:23		-
 updates/	2018-10-06 15:37		-

Figura 135: Vista de los repositorios servidor por un servidor http.

Al descargar los repositorios se prosiguió con la instalación de Ambari y su configuración. Se pudo verificar la correcta instalación de Ambari por medio de poder acceder a la dirección gtlagom01.uvg.edu.gt:8080, en esta dirección encontramos la interfaz gráfica de Ambari.

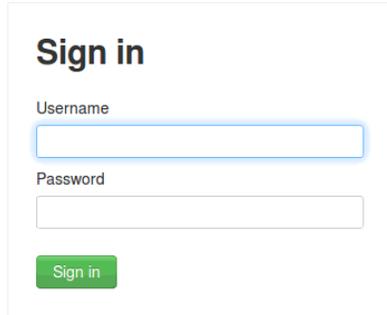


Figura 136: Vista del login de Ambari

Luego de poder acceder a Ambari se inició la configuración del clúster. El nombre del clúster es gtLago y cuenta con los nodos distribuidos de la manera que se planteó en el diseño.

A continuacion podemos ver la vista inicial del software Ambari:

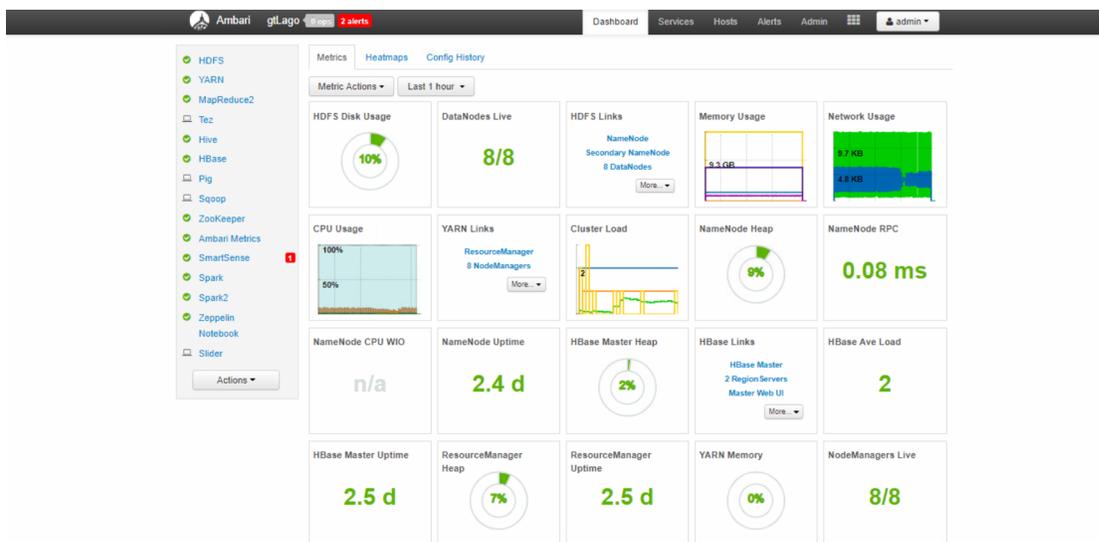


Figura 137: Dashboard de Ambari

En el lado derecho podemos encontrar los servicios instalados. En la esquina superior derecha podemos encontrar el nombre del cluster gtLago y a la par del nombre podemos encontrar las alertas y operaciones que se estan realizando en ese momento. Luego en la esquina superior izquierda podemos encontrar diferentes menus para diferentes componentes. Por ultimo en el centro encontramos el dashboard de Ambari con las diferentes metricas que nos ofrece.

Podemos ver en el dashboard principal de Ambari los siguientes metricas:

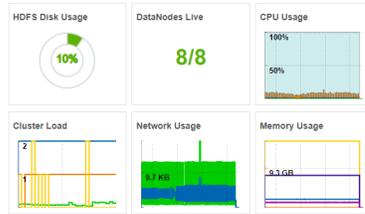


Figura 138: KPIS dentro del dashboard de Ambari

A estos nodos se les instalaron los siguientes servicios:

- HDFS
- YARN
- MapReduce2
- Tez
- Hive
- Hbase
- Pig
- Sqoop
- ZooKeeper
- Ambari Metrics
- SmartSense
- Spark
- Spark2
- Zeppelin Notebook
- Slider

Entre estos servicios encontramos los servicios requeridos por el proyecto como lo son:

- Hive
- Spark
- HDFS

Y servicios que Hadoop o Ambari necesita para su correcto funcionamiento, estos servicios son los siguientes:

- YARN

- MapReduce2

- Tez

- Pig

- Sqoop

- ZooKeeper

- Ambari Metrics

- SmartSense

- Zeppelin Notebook

- Slider

- Namenode

Estos servicios se distribuyen en el cluster de la siguiente manera:

Identificador de Nodo	Tipo de Nodo	Servicios Maestros	Servicios Clientes	
Servidor Poweredge (720 gtlagom01.uvg.edu.gt 192.168.5.141		Nodo Maestro	Activity Analyzer, Actvy Explorer, HST Server, Grafana, NameNode, Spark2 History Server, Spark History Server, Zeppelin Notebook, ZooKeeper Server, DataNode, HST Agent, Metrics Monitor, NodeManager	Hbase Client, Hcat Client, Hive Client, MapReduce2 Client, Pig Client, Slider Client, Spark2 Client, Spark Client, Sqoop Client, Tez Client, Yarn Client, ZooKeeper Client
Servidor Virtual gtlagom02.uvg.edu.gt 192.168.5.151		Nodo Maestro	Metrics Collector, DataNode, HST Agent, Metrics Monitor, NodeManager	Hbase Client, HDFS Client, Hcat Client, Hive Client, MapReduce2 Client, Pig Client, Slider Client, Spark2 Client, Spark Client, Sqoop Client, Tez Client, Yarn Client, ZooKeeper Client
Servidor Virtual gtlagom03.uvg.edu.gt 192.168.5.165		Nodo Maestro	DataNode, HST Agent, Metrics Monitor, NodeManager	Hbase Client, HDFS Client, Hcat Client, Hive Client, MapReduce2 Client, Pig Client, Slider Client, Spark2 Client, Spark Client, Sqoop Client, Tez Client, Yarn Client, ZooKeeper Client
Computadora Optiplex 745 gtlagow02.uvg.edu.gt 192.168.5.143		Nodo Esclavo	StandBy HBase Manager, Hive Metastore, HiveServer2, MySQL Server, WebHCat Server, ZooKeeper Server, DataNode, HST Agent, Metrics Monitor, NodeManager	Hbase Client, HDFS Client, Hcat Client, Hive Client, MapReduce2 Client, Pig Client, Slider Client, Spark2 Client, Spark Client, Sqoop Client, Tez Client, Yarn Client, ZooKeeper Client
Computadora Optiplex 745 gtlagow05.uvg.edu.gt 192.168.5.146		Nodo Esclavo	DataNode, HST Agent, Metrics Monitor, NodeManager	Hbase Client, HDFS Client, Hcat Client, Hive Client, MapReduce2 Client, Pig Client, Slider Client, Spark2 Client, Spark Client, Sqoop Client, Tez Client, Yarn Client, ZooKeeper Client
Computadora Optiplex 745 gtlagow03.uvg.edu.gt 192.168.5.144		Nodo Esclavo	DataNode, RegionServer, HST Agent, Metrics Monitor, NodeManager	Hbase Client, HDFS Client, Hcat Client, Hive Client, MapReduce2 Client, Pig Client, Slider Client, Spark2 Client, Spark Client, Sqoop Client, Tez Client, Yarn Client, ZooKeeper Client
Computadora Optiplex 790 gtlagow01.uvg.edu.gt 192.168.5.142		Nodo Esclavo	App Timeline Server, History Server, ResourceManager, SNameNode, ZooKeeper Server, DataNode, HST Agent, Metrics Monitor, NodeManager	Hbase Client, HDFS Client, Hcat Client, Hive Client, MapReduce2 Client, Pig Client, Slider Client, Spark2 Client, Spark Client, Sqoop Client, Tez Client, Yarn Client, ZooKeeper Client
Computadora Optiplex 745 gtlagow04.uvg.edu.gt 192.168.5.145		Nodo Esclavo	DataNode, RegionServer, HST Agent, Metrics Monitor, NodeManager	Hbase Client, HDFS Client, Hcat Client, Hive Client, MapReduce2 Client, Pig Client, Slider Client, Spark2 Client, Spark Client, Sqoop Client, Tez Client, Yarn Client, ZooKeeper Client

Figura 139: Servicios ubicados en cada uno de los nodos del cluster

19.3. Ingesta de datos

Actualmente se tienen dos implementación del proyecto Lago a cargo de la Universidad del Valle de Guatemala. Un tanque está localizado en la central de la Universidad del Valle de Guatemala y el otro tanque está localizado en la reserva Quetzal a las faldas del volcán Atitlán.

Los dos tanques generan archivos con extensión .dat estos archivos contienen tres columnas de datos. Cada una de las columnas representa a cada uno de los canales de la electrónica. Actualmente los tanques de la Universidad del Valle de Guatemala solo utilizan un canal.

El archivo .dat tiene un formato como el siguiente:

v 5

```

# #
# # This is a LAGO raw data file, version 5
# # It contains the following data:
# # <N1> <N2> <N3> : line with values of the 3 ADC for a triggered pulse
# # # t <C> <V> : end of a trigger
# # # c <C> : internal trigger counter
# # # x f <V> : 40 MHz frequency
# # # x r C1-DD <V> : raw temperature and pressure sensor value
# # # x r D1 <V> : raw temperature/pressure value
# # # x r D2 <V> : raw temperature/pressure value
# # # x g <LAT> <LON> <ALT> : GPS data - latitude, longitude, altitude
# # # x b <B1> <B2> <B3> : baselines (NOT IMPLEMENTED IN LAGO)
# # In case of error, an unfinished line will be finished by # E @@@
# # # E 1 : read timeout of 2 seconds
# # # E 2 : too many buffer reading tries
# # # E 3 : unknown word from FPGA
# # Current registers setting
# x c T1 80
# x c T2 1000
# x c T3 1000
# x c HV1 1200
# x c HV2 0
# x c HV3 0
# x c GPSTM UTC
# #
# # This file was started on luthier02
# # Machine local time was Wed Jun 13 11:52:38 2018
# # WARNING, there is no GPS, using PC time
# #
# x f 39999999
# x r D2 35632
# x r D1 42433
# x s 20.3 C 922.30 hPa 786 m
# x h 14:52:39 13/06/2018 1528901559
50 49 51
52 50 50
95 55 49
73 50 48
55 49 50
59 50 49
51 48 49
50 51 48
50 51 50
52 50 53
55 50 50
53 50 51
# t 1 279207

```

Este tipo de archivo se genera cada hora y tiene un tamaño aproximado de 1GB a 1.5GB como máximo 2GB. Estos archivos tuvieron que seguir un proceso de traslado de datos.

19.3.1. UVG Sur - UVG Central

Por medio del módulo “módulo de transmisión de datos” se enviaron los archivos del volcán a UVG campus sur. En la computadora de UVG campus sur se tienen 2 servicios de Linux que siempre se están ejecutando. El primer servicio pertenece al módulo “módulo de transmisión de datos”, este servicio recibe por primera vez el archivo en la carpeta /raw-data, modifica ciertos datos del archivo y luego envía el archivo a la carpeta /data. Esta carpeta es controlada por el servicio desarrollado por el módulo “Big Data - Infraestructura y Arquitectura” el cual lo envía a UVG campus central.

19.3.2. UVG Central - cluster

En UVG central se almacena el archivo en /root/data/CAMPUSSUR, esta carpeta también es controlada por otro servicio desarrollado por el módulo “Big Data - Infraestructura y Arquitectura” que envía el archivo al nodo maestro número 2 llamado “gtlagom02.uvg.edu.gt” en este nodo se guarda el archivo dentro de /data.

Para el caso de la segunda implementación de LAGO los datos se guardan en la carpeta /root/data/UVGCENTRAL, esta carpeta también es controlada por otro servicio desarrollado por el módulo “Big Data - Infraestructura y Arquitectura” que envía el archivo al nodo esclavo número 1 llamado “gtglagow01.uvg.edu.gt” en este nodo se guarda el archivo dentro de /data.

Tanto en el nodo maestro número 1 como en el nodo esclavo número 2, las carpetas /data están siendo controladas por otro servicio de Linux. Este servicio es el encargado de descomprimir el archivo .dat y empezar la limpieza del archivo.

En el siguiente diagrama se puede observar como interactúan los servicios en los diferentes puntos del proyecto:

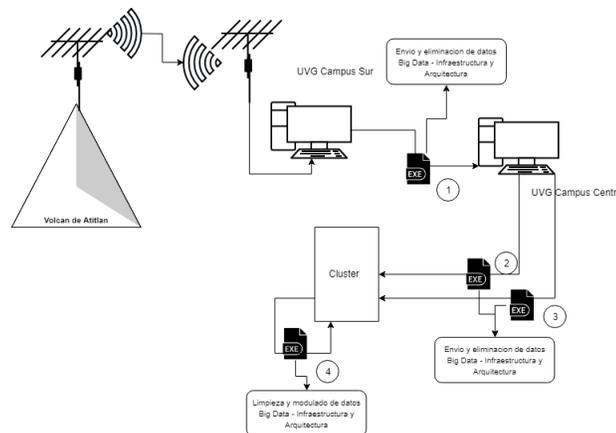


Figura 140: Flujo de envío de información

La conectividad del sistema se puede observar en los anexos.

19.4. Limpieza y estructurado de datos

Tanto en el nodo maestro número 1 como en el nodo esclavo número 2, las carpetas /data están siendo controladas por otro servicio de Linux. Este servicio es el encargado de descomprimir el archivo .dat y empezar la limpieza del archivo.

Como se puede ver en el formato del archivo .dat este tiene información, como los comentarios, que no aportan un valor al análisis de datos por lo cual este archivo se tiene que analizar para obtener los datos que realmente aportan valor al análisis.

El formato del archivo .dat contiene tres columnas para 3 posibles tanques. Actualmente la implementación de LAGO en Guatemala solo tiene 1 tanque por canal de la electrónica, por lo cual los pulsos eléctricos generados por la caída de muon solo se almacenan en la primera columna del archivo.

Además de los pulsos eléctricos se tiene que obtener otras variables como presión atmosférica, temperatura, altitud, donde se generó entre otras variables. Estas variables son detectadas y guardadas para poder generar un archivo CSV que contenga la información de valor.

Dentro de los servicios que se encuentran en el nodo maestro número 2 y el nodo esclavo número 1 podemos encontrar los servicios de LDatos. Estos servicios se encargan de extraer la información de valor para el análisis de datos.

Estos servicios también se encargan de insertar los nuevos datos dentro del csv. Para insertar los nuevos datos solo se tienen que anexar los nuevos datos al csv que previamente había sido generado. Luego el mismo servicio se encarga de cargar este documento a HDFS.

El entregable de la limpieza de datos es un archivo csv con los datos que realmente aportan valor al análisis de datos.

Este csv tendrá el siguiente encabezado

- PULSO
- FECHAHORA
- TEMPERATURA
- PRESION
- ALTITUD
- NOMBRECOMPUTADORA
- LUGAR

La siguiente columna de datos es una pequeña extracción de la tabla creada:

```

50|14:52:39 13/06/2018|20.3|922.30|786 m|luthier02|UVG CENTRAL
52|14:52:39 13/06/2018|20.3|922.30|786 m|luthier02|UVG CENTRAL
95|14:52:39 13/06/2018|20.3|922.30|786 m|luthier02|UVG CENTRAL
73|14:52:39 13/06/2018|20.3|922.30|786 m|luthier02|UVG CENTRAL
55|14:52:39 13/06/2018|20.3|922.30|786 m|luthier02|UVG CENTRAL
59|14:52:39 13/06/2018|20.3|922.30|786 m|luthier02|UVG CENTRAL
51|14:52:39 13/06/2018|20.3|922.30|786 m|luthier02|UVG CENTRAL
50|14:52:39 13/06/2018|20.3|922.30|786 m|luthier02|UVG CENTRAL
50|14:52:39 13/06/2018|20.3|922.30|786 m|luthier02|UVG CENTRAL
52|14:52:39 13/06/2018|20.3|922.30|786 m|luthier02|UVG CENTRAL
55|14:52:39 13/06/2018|20.3|922.30|786 m|luthier02|UVG CENTRAL
53|14:52:39 13/06/2018|20.3|922.30|786 m|luthier02|UVG CENTRAL

```

Una vez este archivo csv esta dentro de HDFS puede ser consumido por una tabla externa del servicio Hive. Hive es una base de datos distribuida que provee un lenguaje tipo SQL para hacer consultas. Hive también provee una manera eficiente de consumir los datos por medio de las tablas externas. Estas tablas externas son tablas tipo SQL que modelan los datos, aunque los datos sigan almacenados en un csv dentro de HDFS.

Cuando los servicios anexan los nuevos datos al archivo que se encuentra dentro de HDFS no se necesita de una operación tipo insert para ingresar la información a la tabla. La tabla se actualizará instantáneamente al anexar los datos.

El servicio número 4 es el encargado de limpiar cada uno de los archivos .dat generados por los tanques. A continuación, se puede observar un diagrama de flujo del servicio número 4:

Para poder modelar los datos del csv se genera una tabla externa en hive de la siguiente manera:

```

CREATE EXTERNAL TABLE IF NOT EXISTS DATOS(
PULSO STRING,
FECHAHORA STRING,
TEMPERATURA STRING,
PRESION STRING,
ALTITUD STRING,
NOMBRECOMPUTADORA STRING,
LUGAR STRING,
IDENTIFICADORPULSO STRING
)
ROW FORMAT DELIMITED
FIELDS TERMINATED BY '|'
location '/user/lago/data/';

```

Los datos guardados en hive, pueden ser cargados a spark por medio de instrucciones de scala. Esto permite que los datos puedan ser analizados fácilmente. En la siguiente imagen se observa la cantidad de datos que se almacenan en la tabla de datos.

```
scala> var DATOS = sc.textFile("/user/root/lago/data/*").map(x=>(x + "\n").split('|')).repartition(100)
DATOS: org.apache.spark.rdd.RDD[Array[String]] = MapPartitionsRDD[12] at repartition at <console>:24

scala> DATOS.count
res2: Long = 2000000

scala> █
```

Figura 141: Conteo de datos dentro de cluster

El tipo de dato, provisto por el modelado, se puede observar en la siguiente imagen:

```
scala> datos.printSchema
root
 |-- pulso: string (nullable = true)
 |-- fechahora: string (nullable = true)
 |-- temperatura: string (nullable = true)
 |-- presion: string (nullable = true)
 |-- altitud: string (nullable = true)
 |-- nombrecomputadora: string (nullable = true)
 |-- lugar: string (nullable = true)
 |-- identificadorpulso: string (nullable = true)
```

Figura 142: EDatos

20.1. Sistemas de adquisición de datos

20.1.1. Adquisición de datos

Se le dice así al proceso de medir un fenómeno eléctrico o físico en una computadora o similar. Estos fenómenos pueden ser voltajes, corrientes, temperatura, presión, etc. Para esto se emplean sistemas de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés), el cual está compuesto por sensores, hardware para medición y software programable. Generalmente incluyen una etapa de acondicionamiento de señales y un convertidor analógico-digital para poder transmitir estos datos a la computadora [86]. Debido a que muchos fenómenos ocurren a una velocidad muy alta (en el orden de los microsegundos), es necesario emplear sistemas de adquisición de datos que se puedan manejar a la velocidad del fenómeno. Entre estos sistemas de adquisición se encuentran las matrices de compuertas programables [87].

20.1.2. Matriz de compuertas programables (FPGA)

Una *Field Programmable Gate Array* (FPGA) es un dispositivo semiconductor basado en una matriz de bloques lógicos conectados que pueden ser configurados mediante la programación de la interconexión de ellos. Estos bloques pueden ser programados, mediante lenguaje descriptivo de hardware, para cumplir con el funcionamiento de una tarea específica. Son utilizadas en el área aeroespacial, automotriz, electrónica de consumo, médico, procesamiento de imágenes, entre otras áreas [88]. La interconexión de las compuertas lógicas da origen a lógica combinatorial, secuencial, síncrona y asíncrona [89]. Las FPGAs utilizadas por LAGO son la Nexys 2 y la Red Pitaya [90].

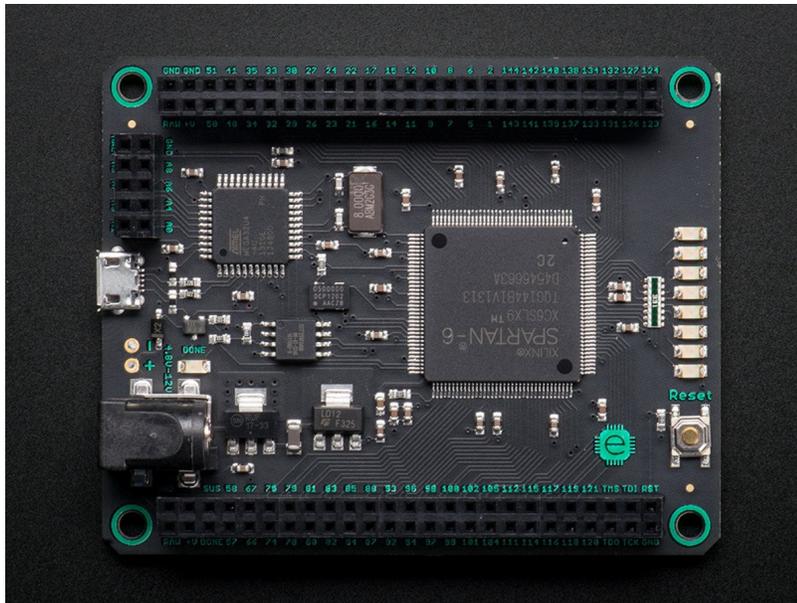


Figura 143: Placa de desarrollo Mojo FPGA hecha por Adafruit.com

Lenguaje descriptivo de hardware (HDL)

Es un lenguaje de programación utilizado para definir la arquitectura de circuitos eléctricos para una tarea en específico. Son utilizados para la programación de FPGAs y otros dispositivos lógicos. Este lenguaje permite interconectar desde compuertas lógicas hasta protocolos de comunicación [89].

Verilog HDL

Es un lenguaje descriptivo de hardware utilizado para diseñar sistemas electrónicos. Este lenguaje permite diseñar códigos en distintos niveles de abstracción. En el año 1993 se estableció un grupo de trabajo de la IEEE bajo el Sub-Comité de Diseño de Automatización con el fin de producir el estándar de Verilog IEEE 1364. En 1995, Verilog se volvió un Estándar IEEE 1364. Gracias a esto, Verilog tuvo un crecimiento en el mercado, por lo que el valor de simuladores de Verilog tuvo un aumento [91]. Este lenguaje es utilizado para la programación de la FPGA incorporada en la Red Pitaya. Esto se lleva a cabo en el entorno de programación Vivado, proveído por Xilinx [92].

Xilinx Vivado

Es un ecosistema para el desarrollo de programas en lenguaje descriptivo de hardware para Sistemas en un Chip (SoC). Trabaja a niveles de síntesis e implementación. Permite la compilación de diseños, análisis de tiempos, evaluación de diseños RTL y simulaciones [93].

Synthesis: Es el proceso de transformar un diseño de lenguaje de transferencia de

registros (RTL, por sus siglas en inglés a una representación a nivel de compuertas lógicas. Soporta los lenguajes SystemVerilog, VHDL y Verilog. Para ejecutarlo en un proyecto se debe de presionar el botón “Run Synthesis” que se muestra en la Figura 10 [94].



Figura 144: Sección Synthesis de Vivado

Implementation: La implementación es el proceso de colocar y direccionar la red de interconexión entre las compuertas lógicas de una FPGA. Esto lo hace tomando en cuenta el diseño lógico, físico y las restricciones de tiempos. Para ejecutarla en un proyecto se debe de hacer clic en el botón “Run Implementation” de la Figura 11 [94].

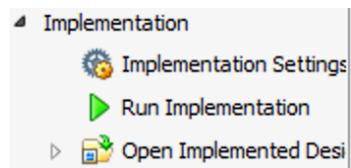


Figura 145: Sección Implementation de Vivado

Bitstream: El bitstream contiene los datos de la programación de la FPGA física. Al ejecutar el comando "Generate Bitstream", Figura 12, se generará un archivo binario *.bit*. Este es el archivo que se debe de cargar a la FPGA para poder correr el programa realizado [93].

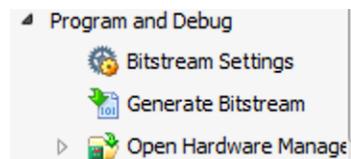


Figura 146: Sección Program and Debug de Vivado

20.1.3. Microprocesador

Es el encargado de recibir, analizar y calcular los datos en un dispositivo. Ejecuta las instrucciones necesarias para llevar a cabo un proceso. Está conformado por una unidad lógica aritmética (ALU), registros, buses internos y conexiones periféricas [95].

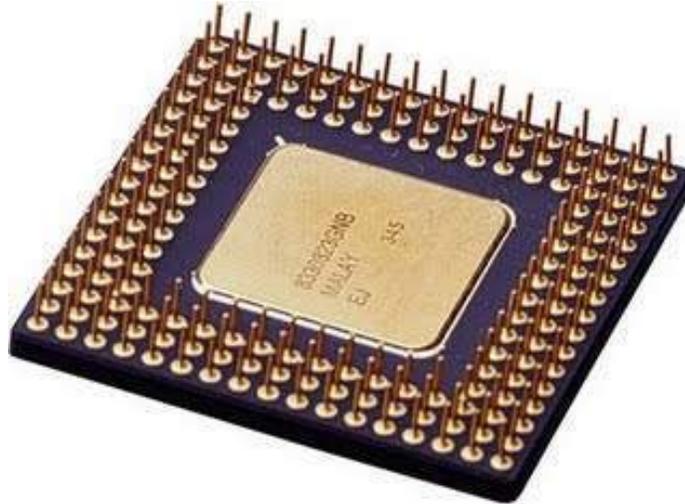


Figura 147: Microprocesador

20.1.4. Red Pitaya®

Red Pitaya® es un hardware *open-source* utilizado como un multi-instrumento para laboratorios, plataformas de adquisición de datos, herramienta para enseñanza de programación, entre otras aplicaciones. Incorpora una FPGA Xilinx Zynq 7010, dos convertidores analógico-digital de alta precisión y dos convertidores digitales-analógicos de alta precisión. El sistema operativo que utiliza es Ubuntu. Actualmente existen dos modelos disponibles: la STEMLab 125-10 y la STEMLab 125-14 que cuentan con un convertidor analógico-digital de 10 y 14 bits, respectivamente. Cuenta con cuatro conectores coaxiales de radio frecuencia (RF) con un ancho de banda de 50 MHz a una frecuencia de muestreo de 125 MHz [92].

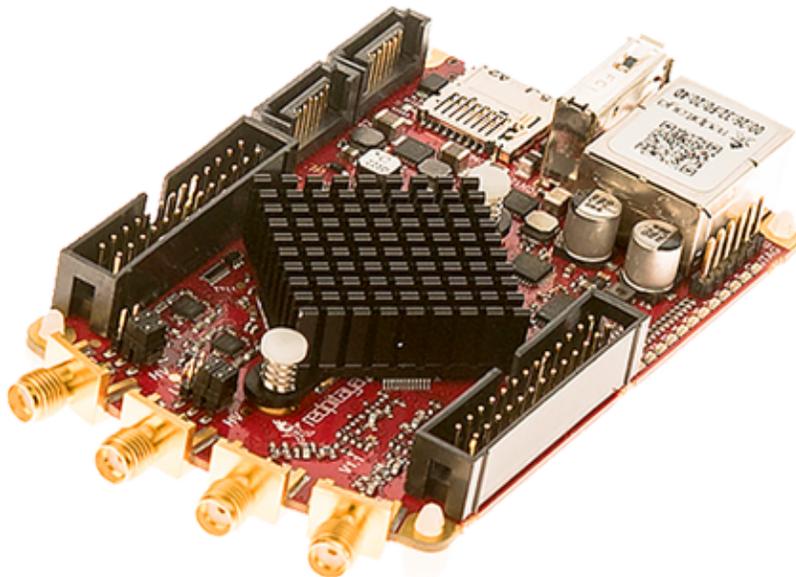


Figura 148: Placa Red Pitaya

La Red Pitaya® es capaz de muestrear señales de bajo voltaje (± 1 V) y de alto voltaje (± 20 V) mediante dos de sus conectores RF. Las entradas RF poseen una impedancia de 1 Mohm, con protección de sobrecarga brindada por diodos. Los otros dos conectores RF, utilizados como salidas, tienen una impedancia de 50 Ohm y un *slew rate* 200 V/s [96].

También posee dos conectores de extensión de 26 pines cada uno. Entre ellos se encuentran disponibles pines con voltajes de +5 V/500 mA, +3.3 V/500 mA y -3.3 V(50mA). Entre los pines del conector de extensión E1 se encuentran 16 pines de entrada y salida, con nivel lógico de 3.3V, y una fuente de energía de +3.3 V. Entre los pines del conector de extensión E2 se encuentran pines SPI, UART e I2C, 4 pines convertidores analógico-digitales, 4 pines convertidores digital-analógico, reloj externo para el convertidor analógico-digital de las entradas RF, y fuentes de poder de +5 V y -3.3 V [96].

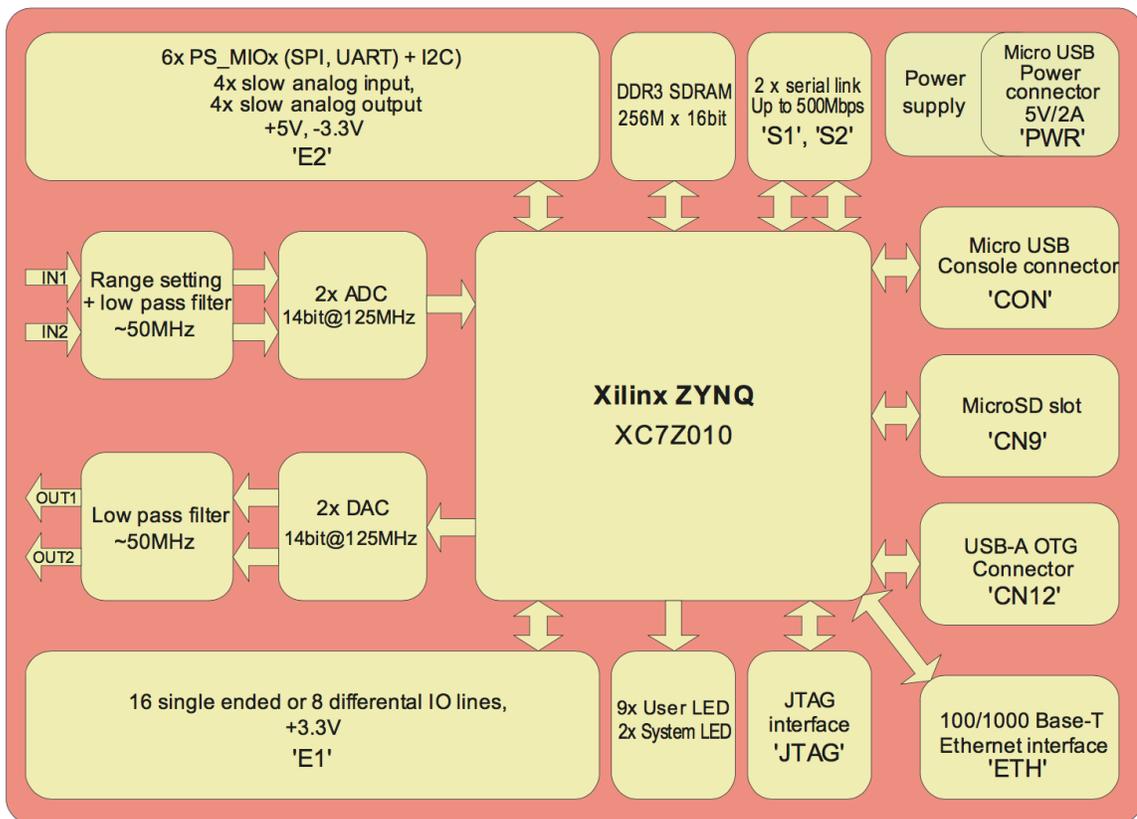


Figura 149: Arquitectura de la Red Pitaya

FPGA Zynq 7010

Es una FPGA producida por Xilinx, que cuenta con 28 mil celdas lógicas, 2.1Mb de RAM y hasta 100 pines de entrada o salida. Pertenece a la familia Zynq®-7000, que se basa en la arquitectura *System on a Chip* (SoC) de Xilinx. Incorpora un procesador ARM® Cortex™-A9 [97].

Procesador ARM® Cortex™-A9

Es un procesador de 32 bits, con un desempeño 25 % mejor que el Cortex-A8. Implementa la arquitectura ARMv7-A. Cuenta con una pipeline de alta eficiencia, unidad de punto flotante, cachés de primer nivel optimizados y controlador de caché segundo nivel [98].

Ubuntu

Ubuntu es un sistema operativo *open-source* utilizado en computadoras personales, servidores y la nube. También es utilizado en distintos dispositivos de desarrollo, como la Raspberry Pi y la Red Pitaya. La palabra "ubuntu" proviene del lenguaje africano Zulu, que significa "humanidad para otros". Cuenta con una interfaz gráfica y un conjunto de aplicaciones para Linux [99]. Red Pitaya® brinda una versión de Ubuntu que incorpora nuevas aplicaciones en cada actualización. Sin embargo, la comunidad LAGO implementa una versión con Linux más apropiada para la adquisición de datos [100].



Figura 150: Interfaz de Ubuntu

Versión estable de LAGO:

La versión estable de LAGO utiliza el sistema operativo Ubuntu 14.04.5 LTS, distribución Trusty. Este se instala en la memoria a utilizar en la Red Pitaya para poder ejecutar los comandos, por medio de comunicación Secure Shell con un cliente, para ajustar los parámetros necesarios para la adquisición de datos. Al instalar este sistema operativo se encontrará dentro de él los códigos necesarios para realizar las mediciones [100].

Linux

Linux es un sistema operativo *open-source* que maneja todos los recursos de hardware asociados al dispositivo en el que se encuentra instalado. Está compuesto por Bootloader, Kernel, Daemons, Shell, Servidor gráfico, Ecosistema de escritorio y aplicaciones [100].

Protocolo Secure Shell (SSH)

Es un protocolo que permite la comunicación remota segura entre dos sistemas utilizando una arquitectura cliente-servidor. A diferencia de otros protocolos, la sesión de la conexión es encriptada, por lo que es imposible obtener contraseñas no encriptadas. El paquete de Linux necesario para poder utilizar este protocolo es OpenSSH [99].

20.1.5. Digilent Nexys 2

Es una tarjeta utilizada como una plataforma de desarrollo. Utiliza la FPGA Xilinx Spartan 3E, que posee 500 mil compuertas lógicas y una velocidad de reloj de 50 MHz. Cuenta con un puerto USB 2.0, 16 Mb de RAM y ROM, y 60 pines de entrada y salida. Además, cuenta con un procesador Xilinx. MicroBlaze (Digilent, ND). Es la tarjeta previamente utilizada por la comunidad LAGO [90].

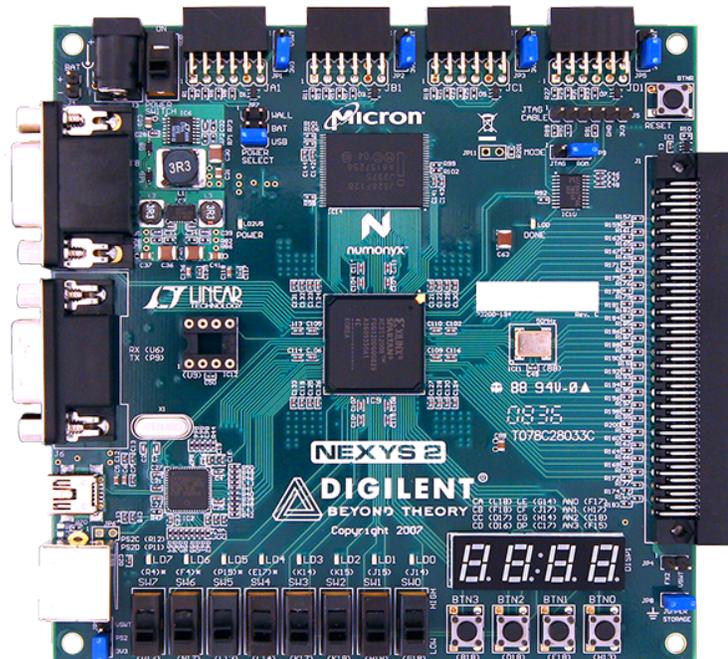


Figura 151: Tarjeta Nexys 2

20.1.6. Señales analógicas

Una señal analógica es aquella que tiene una variación continua en el tiempo. Al ser variable en el tiempo, esta se representa por sus valores de frecuencia. Es decir, puede descomponerse en su frecuencia fundamental e infinitos armónicos. Las señales analógicas más comunes son la sinusoidal, la triangular y la cuadrada. Este tipo de señales se encuentra presente en muchos dispositivos de uso cotidiano, aunque también se pueden obtener mediante un generador de funciones [101].

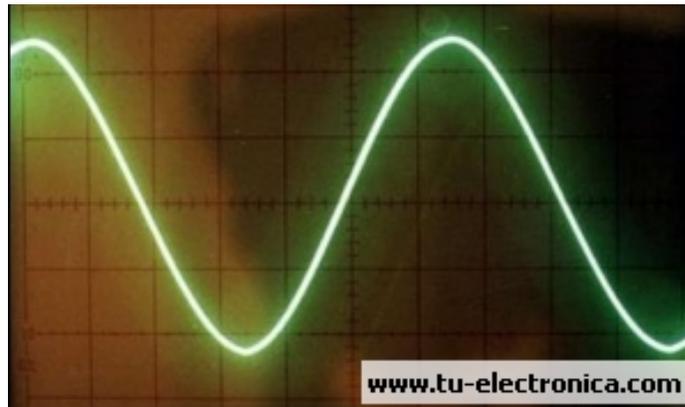


Figura 152: Señal sinusoidal

Generador de funciones

Un generador de señales, también conocido como generador de funciones, es un instrumento utilizado en electrónica para generar o simular señales específicas con ciertas características. Estos pueden ser capaces de generar una señal sinusoidal, triangular o cuadrada a una determinada frecuencia y amplitud. Estas señales se pueden aplicar a un circuito electrónico para observar la respuesta de este ante la señal [102].

Como todo instrumento, posee limitantes. Estas limitantes son la frecuencia máxima a la cual puede llegar, y la amplitud máxima del voltaje que este puede generar. A mayor frecuencia, menor calidad tendrá la señal. Otro parámetro que también se puede ajustar es el ciclo de trabajo (regulación del tiempo de duración de cada mitad de la señal) y el desfase (desplazamiento de la señal en el eje vertical) [102].



Figura 153: Generador de funciones BK Precision 4033

Generador de funciones BK Precision 4011A:

El generador de funciones BK Precision 4011 es una fuente de diferentes tipos de señales. La frecuencia mínima que este brinda es de 0.5 Hz y la máxima es de 5 MHz. Permite variar tanto la amplitud de la señal como el desfase de esta. Las señales que permite generar son: sinusoidal, cuadrada, triangular, pulso positivo y negativo, y rampa positiva y negativa [103].



Figura 154: Generador de funciones BK Precision 4011A

20.1.7. Proesamiento de señales digitales

Convertidor analógico-digital

Un ADC (Analog to Digital Converter, por sus siglas en inglés) convierte una señal continua, ya sea corriente o voltaje, a una secuencia de números discretos. Matemáticamente hablando, un ADC se puede describir como la cuantificación de una función con un gran dominio para producir una función con un dominio más pequeño. La ecuación que describe al ADC es la siguiente:

$$V_{in} = \sum_{n=0}^{N-1} b_n 2^n \frac{V_{ref}}{2^N} \quad (109)$$

donde V_{in} es la señal a convertir, b_n es la resolución deseada y V_{ref} es un voltaje igual o mayor que el valor máximo de V_{in} . En un convertidor analógico-digital se debe de considerar el teorema de Nyquist, el cual indica que la frecuencia de muestreo debe de ser de por lo menos el doble de la frecuencia de la señal a muestrear para poder ser reconstruida [104].

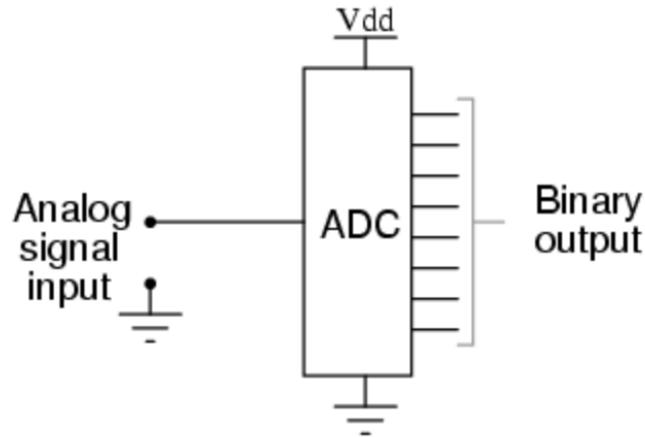


Figura 155: Esquema de convertidor analógico-digital

Muestreo: Una señal continua en el dominio del tiempo tiene que ser tanto cuantificada en términos de amplitud como en términos del tiempo. Por esta razón, una señal muestreada se define, matemáticamente, de la siguiente manera:

$$y(y)x(y) * \delta(t - nT_s) \quad (110)$$

Donde (δ) representa la función Delta de Dirac (Smith, 2015).

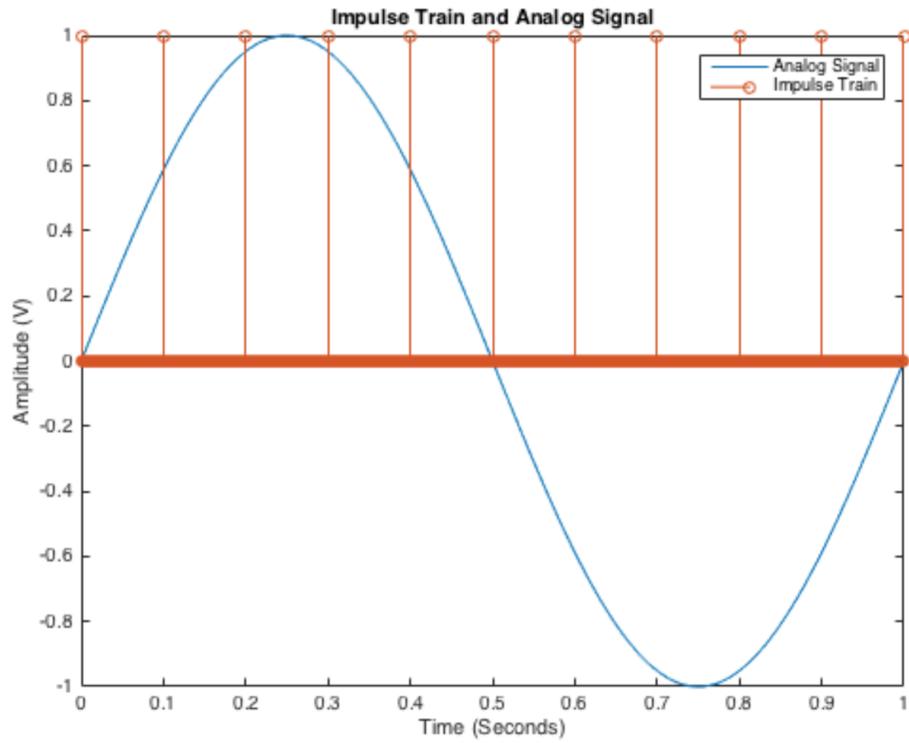


Figura 156: Señal sinusoidal al ser muestreada por impulsos

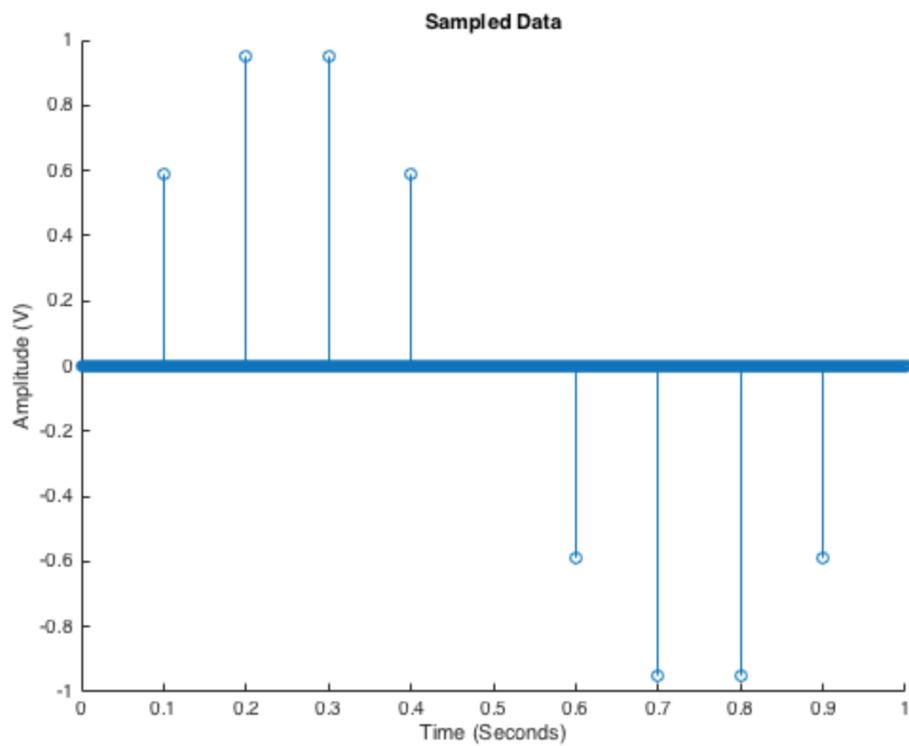


Figura 157: Muestreo de señal sinusoidal

Convertidor digital-analógico

Es un dispositivo que transforma datos digitales en una señal analógica. Esta señal puede ser de voltaje o de corriente. Si la señal muestreada cumplió con el teorema de Nyquist, esta podrá ser reconstruida [105].

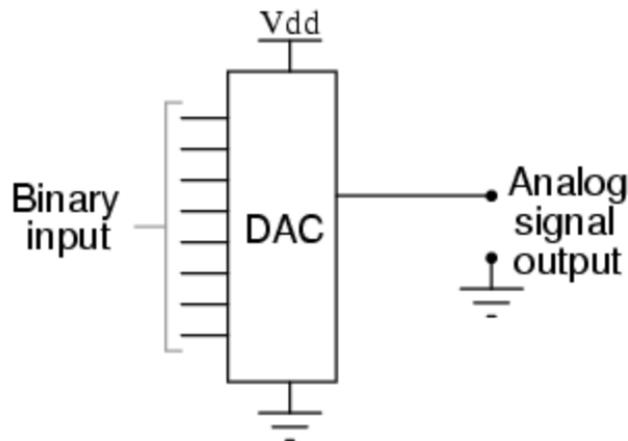


Figura 158: Esquema de convertidor digital-analógico

20.1.8. Sensores

Es un instrumento que convierte un fenómeno físico, como una fuerza aplicada a un objeto o su temperatura, en una señal eléctrica medible. También se les conoce como transductores. Dependiendo del sensor, este puede entregar un valor de voltaje, corriente, resistencia o alguna otra propiedad eléctrica variante en el tiempo [86].

BMP180

Es un sensor utilizado para medir presión absoluta y temperatura. Posee un regulador de 3.3 V, y se comunica con otros dispositivos por medio del protocolo I2C. Por esta razón se debe de tener instalado dicho protocolo en el dispositivo que se desee emplear este sensor. Para utilizarlo se debe de conectar 5V al pin Vin, tierra a GND, señal de reloj a SCL y pin para envío y recepción de datos al pin I2C. Para la medición de presión tiene un rango de 300 a 1100 hPa con una resolución de 0.03 hPa. Para la medición de temperatura posee un rango de -40 a +85°C con una precisión de $\pm 2^\circ\text{C}$ (Adafruit, 2013). Este sensor es utilizado en el lanzamiento de LAGO para Red Pitaya [106].

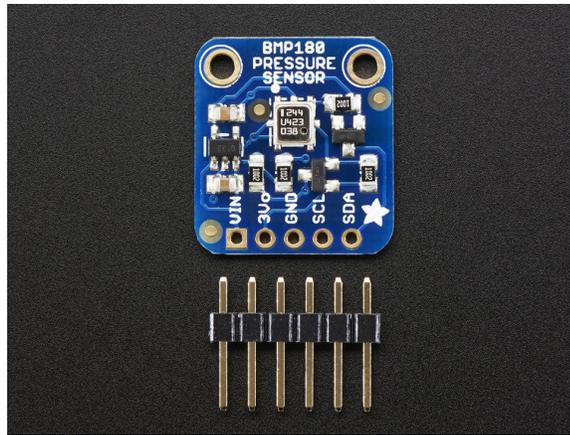


Figura 159: Sensor BMP180

Keweisi KWS-10VA

Es un sensor indicador de voltaje y corriente que pasa a través de él cuando se le conecta un dispositivo a alimentar. Cuenta con dos puertos USB hembra para conectar dos dispositivos, ya sea un teléfono celular, o algún otro dispositivo que utilice un cable USB como conector para alimentación, como un dispositivo de adquisición de datos. Su entrada es un puerto USB macho el cual se conecta a un cubo de alimentación. Puede operar en un rango de voltaje de 3 a 7.5 Vdc y un rango de corriente de 0 a 2.5 A. El error en su voltaje es de aproximadamente $\pm 1\%$, y para la corriente de aproximadamente $\pm 2\%$. El voltaje y la corriente que mide se muestran en 6 pantallas de 7 segmentos independientes. 3 de estas muestran el valor de la corriente y las otras 3 muestran el valor del voltaje [107].



Figura 160: Keweisi KWS-10VA

20.1.9. Protocolo I2C

Es un protocolo con el propósito de permitir la comunicación entre circuitos integrados como maestro(s) y esclavo(s). Es utilizado solo para distancias cortas. Necesita únicamente de dos puertos de transmisión de señales para intercambiar información. La mayoría de los dispositivos I2C se pueden comunicar a una frecuencia entre 100 kHz y 400 kHz. Las dos señales utilizadas se denominan SCL, en la que viaja la señal de reloj; y SDA, en la que viaja la señal de datos. La señal de reloj se genera por el bus maestro que desee transmitir datos [108].

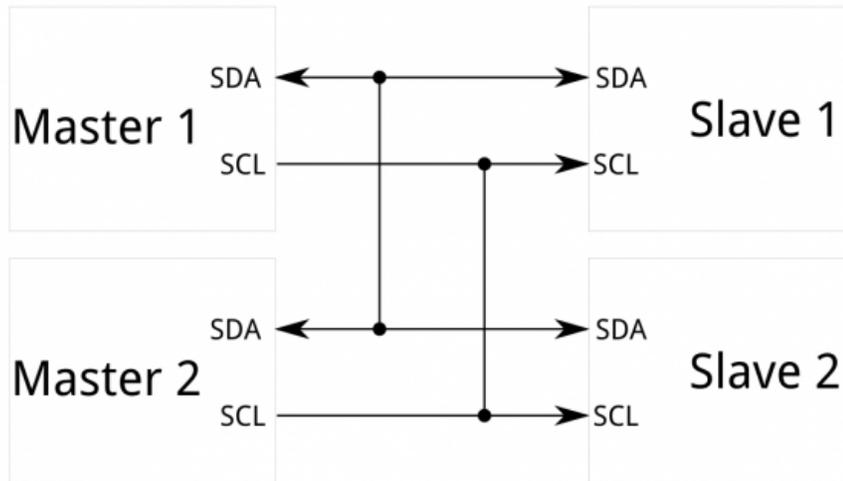


Figura 161: Esquema de protocolo I2C

20.1.10. Protocolo SPI

Es un protocolo de comunicación síncrono serial que trabaja en modo *full duplex* para la recepción y transmisión de datos. Se debe de definir un maestro, el cual transmite la información a los demás esclavos, quienes reciben información y también envían información al maestro [109].

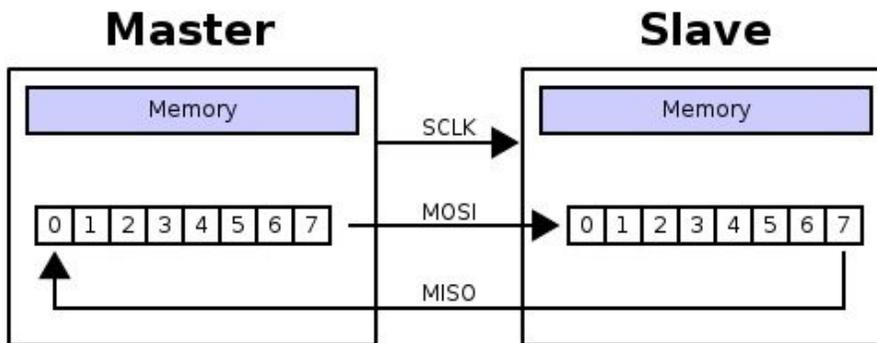


Figura 162: Esquema de protocolo SPI

20.2. Metodología nuevo sistema de adquisición de datos

20.2.1. Familiarización con Red Pitaya®

Este módulo inició con la familiarización del hardware Red Pitaya®. Para ello se estudió el manual de uso que se encuentra en el sitio del proveedor y se leyeron foros de Red Pitaya. Esto se hizo ya que la plataforma es reciente, por lo que fue necesario investigar cuál es el proceso de instalación del ecosistema que incluye las dependencias necesarias, qué sistema operativo utiliza, qué lenguajes de programación se pueden correr, entre otros. Habiendo realizado esto, se prosiguió a la programación de códigos en alto nivel utilizando MATLAB y Python para observar el funcionamiento de la placa de desarrollo.

En estos códigos se hicieron pruebas que manejaran los puertos de entrada y salida GPIO y se emplearon los protocolos de comunicación I2C y SPI. Finalmente se realizaron pruebas de los canales analógico-digital que la placa trae integrados. Esto se hizo con el fin de determinar si este convertidor era óptimo para la adquisición de datos de los rayos cósmicos. Para llevar a cabo esto se utilizó primeramente el WCD Kinich Ahau. El detector Kinich Ahau se encontraba ubicado en la Universidad del Valle Campus Central, y este brinda pulsos negativos cuando ocurre un evento. Se conectó la salida de dicho detector a la entrada del ADC a probar y se utilizó la aplicación de osciloscopio que viene instalada en la versión oficial del software para Red Pitaya®.

20.2.2. Instalación de la versión oficial LAGO

La instalación se realizó con base en la guía brindada por Horacio Arnaldi, quien realizó la guía para la comunidad LAGO. En esta se encuentra lo necesario para instalar el ecosistema LAGO, desde la configuración de la IP estática de la Red Pitaya, hasta la adquisición de datos. Para realizar esto fue necesario tener instalada la versión de Ubuntu LTS 14.04.5 de 64 bits.

20.2.3. Instalación de Vivado HLx 2016.4

La versión de Vivado HLx utilizada por LAGO es la 2016.4. Para ello se descargó el archivo de instalación "Vivado HLx 2016.4: All OS installer Single-File Download Vivado HLx 2016.4: All OS installer Single-File Download (TAR/GZIP - 20.59 GB)", que se encuentra en la sección de "Downloads" en el sitio de web de Xilinx. El enlace directo a esta sección se encuentra en la sección de anexos. En el área de "Version" se hizo hacer click en "Archive". Luego, se buscó la versión 2016.4, y se hizo click en el hipervínculo de "Vivado HLx 2016.4: All OS installer Single- File Download (TAR/GZIP - 20.59 GB)". Para poder descargarlo fue necesario realizar una cuenta de Xilinx. Luego de que se descargó, se descomprimió y se creó una carpeta del mismo.

Para iniciar la instalación se debió de navegar en la Terminal a la carpeta donde se encuentra el archivo de instalación y ejecutar `sudo ./xsetup`. Cuando se abrió el instalador de Vivado se tuvo que aceptar los términos y condiciones necesarios y luego, en uno de los

pasos de la instalación, se debió de seleccionar la casilla de “Vivado HL Design Edition”. En la siguiente ventana, se chequeó la opción de “Software Development Kit (SDK)” y se destildaron las opciones “UltraScale” y “UltraScale++”. Esto se vio como en la Figura 28 Se eligió la carpeta de instalación “/opt/Xilinx”. Al finalizar la instalación, se debió de descargar un archivo de licencia en la página de Xilinx, sección “Licensing Help” en Downloads and Licensing. En la pestaña “Create New Licences”, se chequearon las casillas de “ISE WebPACK service” y “Vivado HLS Evaluation License” y se descargaron. En este punto la instalación de Vivado finalizó.

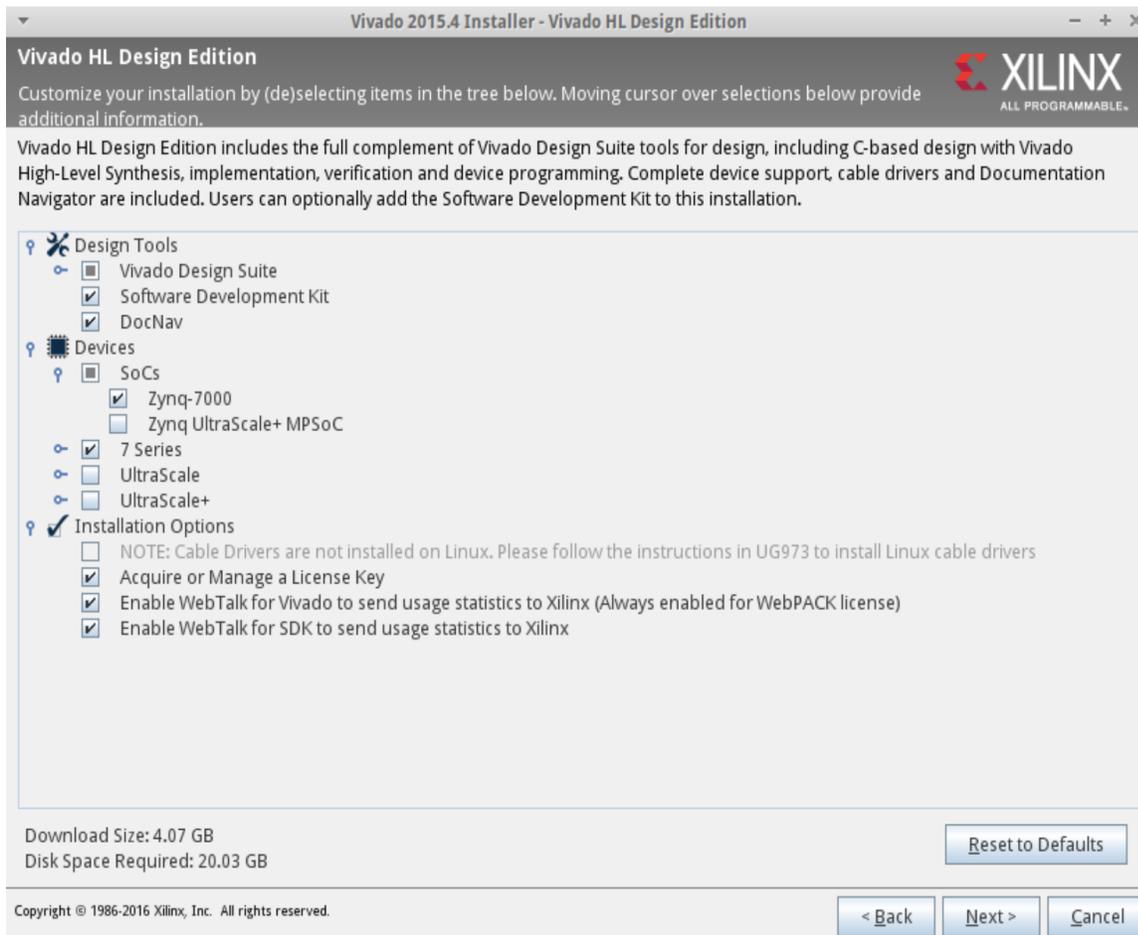


Figura 163: Instalación Vivado

Para abrir vivado, se debió de abrir una ventana de Terminal, dirigirse a la carpeta `/opt/Xilinx/Xilinx/2016.4/Vivado/2016.4` y ejecutar `source settings64.sh`. Luego, se escribió `vivado` y la interfaz gráfica de Vivado se abrió.

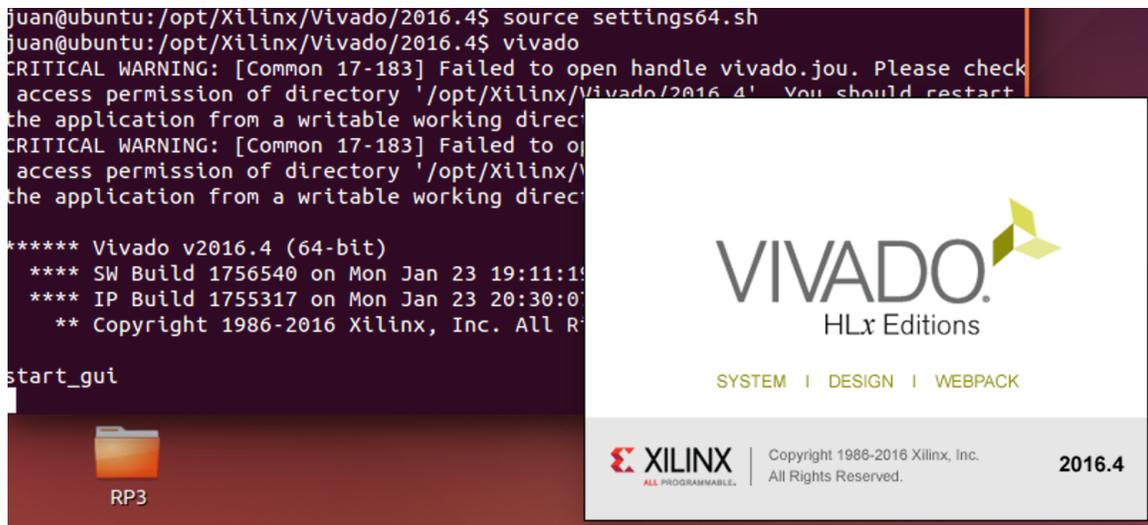


Figura 164: Finalización proyecto Vivado

20.2.4. Generación del bitstream

La generación del archivo *.bit* es necesaria para definir la programación de la FPGA y sus conexiones con el resto de módulos de la Red Pitaya. Para ello se ejecutaron los siguientes pasos:

1. Abrir una ventana de terminal.
2. Ejecutar las siguientes líneas para instalar dependencias:
 - a) `sudo apt-get install device-tree-compiler`
 - b) `sudo apt-get install uboot-mkimage`
 - c) `sudo apt-get install u-boot-tools`
 - d) `sudo apt-get install uboot-mkimage`
3. Dirigirse a la carpeta en donde se haya descargado `lago_ecosystem`.
4. Una vez dentro de esta carpeta, ejecutar el comando “`make NAME=lago_v1_0`” o “`make NAME=lago_v1_0`”. Cualquiera de las dos versiones funciona.
5. Se abrirá Vivado en la consola y el proyecto comenzará a crearse. Este proceso durará aproximadamente 15 minutos.
6. Al finalizar el proceso, se verá algo similar a la Figura 30.

```
patching file tmp/lago_v1_1.tree/system.dts
Hunk #1 succeeded at 17 (offset 1 line).
Hunk #2 succeeded at 38 (offset 1 line).
Hunk #3 succeeded at 56 (offset 1 line).
Hunk #4 succeeded at 86 with fuzz 1 (offset 1 line).
Hunk #5 succeeded at 104 (offset -1 lines).
tmp/linux-xilinx-xilinx-v2016.4/scripts/dtc/dtc -I dts -O dtb -o devicetree.dtb \
-i tmp/lago_v1_1.tree tmp/lago_v1_1.tree/system.dts
make -C tmp/u-boot-xilinx-xilinx-v2016.4 ARCH=arm CFLAGS="-O2 -march=armv7-a -mcpu=cortex-a9 -mtune=cortex-a9 -mcpu=neon -mfloat-abi=hard" \
CROSS_COMPILE=arm-linux-gnueabihf- env
make[1]: Entering directory `/home/juan/Desktop/RP4/lago_ecosystem/tmp/u-boot-xilinx-xilinx-v2016.4'
LD      tools/env/built-in.o
HOSTCC  tools/env/aes.o
HOSTCC  tools/env/crc32.o
HOSTCC  tools/env/ctype.o
HOSTCC  tools/env/env_attr.o
HOSTCC  tools/env/env_flags.o
HOSTCC  tools/env/fw_env.o
HOSTCC  tools/env/linux_string.o
AR      tools/env/ltb.a
HOSTCC  tools/env/fw_env_main.o
HOSTLD  tools/env/fw_printenv
STRIP   tools/env/fw_printenv
make[1]: Leaving directory `/home/juan/Desktop/RP4/lago_ecosystem/tmp/u-boot-xilinx-xilinx-v2016.4'
cp tmp/u-boot-xilinx-xilinx-v2016.4/tools/env/fw_printenv fw_printenv
juan@ubuntu:~/Desktop/RP4/lago_ecosystem$
```

Figura 165: Finalización proyecto Vivado

20.2.5. Instalación del software en memoria microSD

La versión oficial de Ubuntu para Red Pitaya se encuentra en la Wiki de LAGO, en la sección de electrónica. Ocupa aproximadamente 350 MB. Para instalarla, se conectó la microSD, de al menos 2 GB, a la computadora. Para determinar el nombre de la memoria se ejecutó el comando `lsblk`. Se pudo ver que el nombre era `/dev/sdc`. Luego, en la Terminal, se dirigió a la carpeta en donde se encuentra el archivo descargado y se ejecutó la siguiente línea:

```
sudo gzip -dc lago_linux_OS_stable_v1_0.gz | sudo dd bs=4M of=/dev/sdc
```

Hecho esto, se removió la microSD de la computadora y se insertó en la Red Pitaya. Luego, se conectó la placa a la alimentación y se encendieron dos LEDs: uno verde y otro azul.

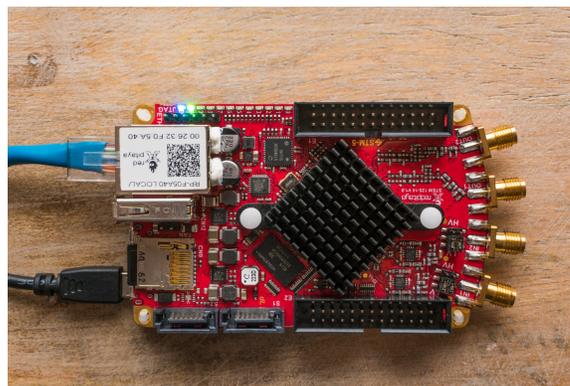


Figura 166: Red Pitaya encendida

Se pudo determinar cuándo la Red Pitaya ya estaba lista para usarse haciéndole, en una ventana de Terminal, ping a la IP establecida. Al inicio se mostraba que no había ruta al servidor, pero luego de unos minutos ya hubo envío de paquetes.

```

MacBook:~ JuanDiego$ ping 192.168.2.100
PING 192.168.2.100 (192.168.2.100): 56 data bytes
Request timeout for icmp_seq 0
Request timeout for icmp_seq 1
Request timeout for icmp_seq 2
Request timeout for icmp_seq 3
64 bytes from 192.168.2.100: icmp_seq=4 ttl=64 time=270.872 ms
64 bytes from 192.168.2.100: icmp_seq=5 ttl=64 time=5.081 ms
64 bytes from 192.168.2.100: icmp_seq=6 ttl=64 time=3.111 ms
64 bytes from 192.168.2.100: icmp_seq=7 ttl=64 time=3.698 ms
64 bytes from 192.168.2.100: icmp_seq=8 ttl=64 time=2.761 ms
64 bytes from 192.168.2.100: icmp_seq=9 ttl=64 time=2.705 ms

```

Figura 167: Ping a Red Pitaya

Cuando ya hubo envío de paquetes, se hizo una comunicación por ssh:
`ssh root@192.168.2.100`



```

MacBook:~ JuanDiego$ ssh root@192.168.2.100
[root@192.168.2.100's password:
Welcome to Ubuntu 14.04.5 LTS (GNU/Linux 4.6.0-xilinx armv7l)

 * Documentation:  https://help.ubuntu.com/
Last login: Wed Dec 31 21:00:48 1969 from macbook
root@lago:~#

```

Figura 168: Comunicación por SSH

20.2.6. Configuración de fecha y hora

Cada vez que la Red Pitaya se desconecta de la alimentación su fecha y hora se desajustan. Ya que la fecha y hora son datos importantes para la comunidad LAGO es necesario que el sistema los tenga ajustados correctamente. Para ajustarlas nuevamente se ejecutaron las siguientes líneas:

```

date +%Y%m%d -s .AñoMesDías
date +%T -s "Horas:Minutos:Segundos"

```

Por ejemplo, si se deseaba ajustar la fecha 23/08/2018 10:55:00 se debía de hacer:

```

date +%Y%m%d -s "20180823"
date +%T -s "10:55:00"

```

Para comprobarlo, se ejecutó `date` en la línea de comando.

```

[root@lago:~# date +%Y%m%d -s "20180823" ]
20180823
[root@lago:~# date +%T -s "10:55:00" ]
10:55:00
[root@lago:~# date ]
Thu Aug 23 10:55:04 -03 2018
root@lago:~# █

```

Figura 169: Prueba de sensor de temperatura BMP180

20.2.7. Instalación de dependencias

El sensor BMP180 utiliza el protocolo I^2C , por lo que fue necesario instalarlo. Para esto, se ejecutaron las siguientes líneas:

```

apt update
apt install i2c-tools libi2c-dev python-smbus build-essential

```

20.2.8. Pruebas del sensor de presión y temperatura

Ya que la presión y temperatura influyen en la incidencia de rayos cósmicos en el tanque, es necesario saberlos. El sensor utilizado por la comunidad LAGO es el BMP180. Para probar su funcionamiento se ejecutó el código que se encuentra en el repositorio de Github de Horacio Arnaldi. El enlace al repositorio se encuentra en la sección de anexos. La conexión entre el sensor y la Red Pitaya® se realizó como se muestra en la Figura 35. Al ejecutar el código se obtuvieron 10 muestras de la temperatura en grados Celsius, presión en Pascales y altitud en metros.

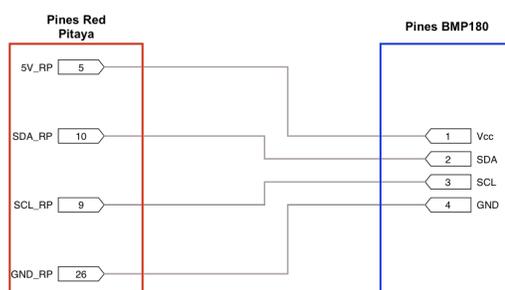


Figura 170: Prueba de sensor de temperatura BMP180

Para enviar la carpeta *lago_ecosystem* hacia la Red Pitaya se debió de enviar por medio del comando *scp*. Para ello se abrió una ventana aparte de Terminal, se dirigió al directorio en donde se encuentra esta carpeta y se ejecuta la siguiente línea:

```

scp -r lago_ecosystem

```

root@192.168.2.100:

Cuando se terminó de enviar el archivo, se cerró esa ventana de Terminal.

En la ventana donde se hizo la comunicación por ssh se dirigió a la carpeta `/tmp` y se ejecutó `/tmp/lago_v1_0.bit >/dev/xdevcfg`. En este punto, el LED 0 se encendió. Luego, se dirigió al directorio `/lago_ecosystem/projects/lago_v1_0/src` y compiló los archivos ejecutando la siguiente línea:

```
gcc -pthread -o lago lago.c zynq_io.c bmp180.c nmea_rp.c gps_rp.c uart_rp.c -lm
```

Cuando se finalizó la compilación, al ejecutar `ls` se pudo observar los archivos de los códigos fuente y un ejecutable (**lago**). Se ejecutó la línea `./lago -h` para observar las opciones disponibles.

```
[root@lago:~/RedPi/lago_ecosystem/projects/lago_v1_0/src# ./lago -h ]
The LAGO ACQUA suite
Data acquisition system for the LAGO BRC electronic
(c) 2012–Today, The LAGO Project, http://lagoproject.org
(c) 2012, LabDPR, http://labdpr.cab.cnea.gov.ar

The LAGO Project, lago@lagoproject.org

DPR Lab. 2018
H. Arnaldi, lharnaldi@gmail.com
X. Bertou, bertou@gmail.com
LAGO v2r0 comms soft

Usage: ./lago <action> <register> <value> [options]

Actions:
-a          Get all registers status
-s          Set registers
-f          Start DAQ and save data to file
-o          Start DAQ and send data to stdout
-g          Get GPS data
-t          Get Pressure and Temperature data
-i          Initialise registers to default values
-x          Read the voltage in the XADC channels
-v          Show DAQ version

Registers:
t1, t2     Specify triggers 1 and 2
sc1, sc2   Specify scaling factor 1 and 2
hv1, hv2   Specify high voltages
ov1, ov2, ov3, ov4 Specify output voltages

Options:
-f <filename> Specify file name

root@lago:~/RedPi/lago_ecosystem/projects/lago_v1_0/src# █
```

Figura 171: Comandos de LAGO disponibles

20.2.9. Adquisición de datos

Configuración de la alimentación del PMT

La señal de control de la alimentación del fotomultiplicador es una onda cuadrada, de 0 a 2 V con una frecuencia de aproximadamente 2 kHz. Posteriormente esta señal se conecta a un filtro RC, ubicado en una placa exterior, la cual elimina los armónicos de la señal dejando únicamente la componente DC. Asimismo, esta placa también se encarga de amplificar la señal a un máximo de aproximadamente 5 V. Esta señal puede ser producida en los siguientes pines del puerto E2 de la Red Pitaya:

Registro	Pin
hv1	17
hv2	18
ov1	17
ov2	18
ov3	20
ov4	19

Cuadro 28: Denominación pines puerto E2

La configuración de estos registros se hace de la siguiente forma:

```
./lago -s registro voltaje
```

El rango del valor de *voltaje* es de 0 a 2500, donde 0 equivale a 0 mV y 2500 a 2,500 mV o 2.5 V. Este voltaje es el que tendrá como entrada la fuente de alto voltaje, la cual amplifica en un factor de 1,000 su voltaje de salida. Es decir, el voltaje de salida de la fuente de alto voltaje está dado por:

$$Voltaje_{fuenteHV} = voltaje_{entrada} * 1000 \quad (111)$$

```
[root@lago:~/RedPi/lago_ecosystem/projects/lago_v1_0/src# ./lago -s hv1 1250 ]
Initializing registers...
The Voltage is: 1250 mV
The DAC value is: 32586 DACs
root@lago:~/RedPi/lago_ecosystem/projects/lago_v1_0/src# █
```

Figura 172: Configuración fuente de alto voltaje

La configuración del voltaje es importante ya que este será el voltaje con el que se alimentará el PMT. Dependiendo de las partículas que se deseen detectar, el voltaje debe de ser configurado a cierto voltaje.

Caracterización de la fuente de alto voltaje EMCO C20

Para caracterizar la fuente se construyó el circuito que se muestra en la Figura 38, el cual es proveído por la productora de la fuente (EMCO). En él se pueden observar cómo

se conectaron las entradas y salidas de la fuente de alto voltaje. Se midió el voltaje que se obtenía al realizar variaciones en el voltaje de entrada, midiendo desde 0 V hasta 2.55 V ya que el multímetro utilizado soportaba una medición de voltaje máxima de 900 V.

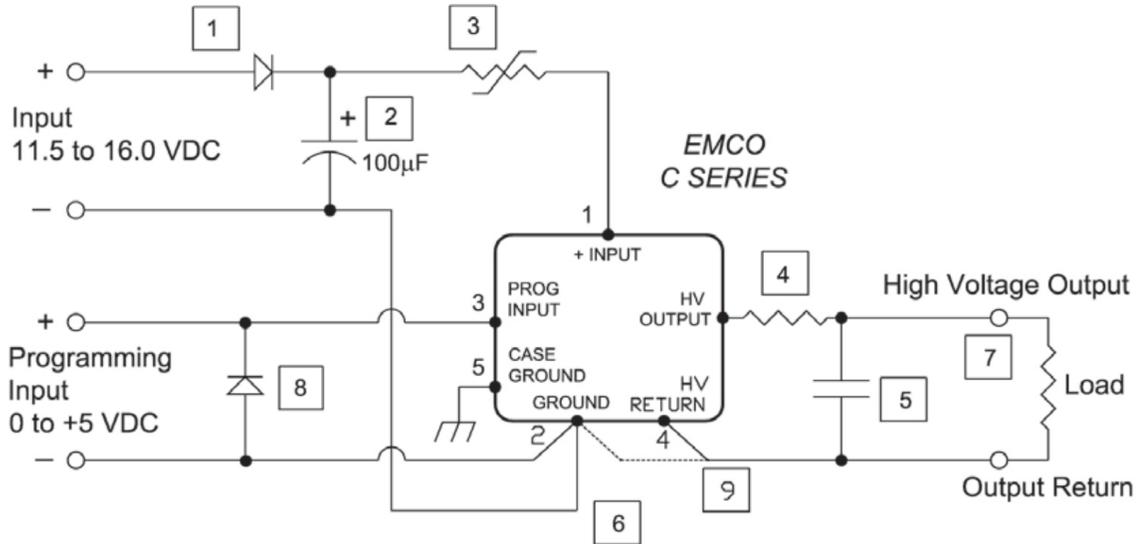


Figura 173: Circuito de control para fuente EMCO C20

Configuración del trigger

A diferencia de la Nexys 2, el valor de cada ADC es distinto, ya que Nexys 2 se trabajaba con 10 bits y Red Pitaya con 14 bits. El rango del valor del ADC es de 0 a $2^{14} - 1$, donde 0 equivale a -1 V y $2^{14} - 1$ equivale a +1 V. Esto quiere decir que el ADC es capaz de medir hasta una diferencia de 2 V. Por esta razón, el valor de cada ADC pico, $1ADC_p$, está dado por:

$$1ADC_p = \frac{2V}{2^{14} - 1} \approx 0.122mV \quad (112)$$

Entonces, el valor del número a asignarle al trigger está dado por:

$$ValorTrigger = \frac{voltaje_{base} * 1ADC}{0.122mV} \quad (113)$$

donde $voltaje_{base}$ es el valor del voltaje de línea de base, en milivolts.

Entonces, para configurar el trigger se ejecutó:

```
./lago -s trigger valorTrigger
```

donde **trigger** podía ser *t1* si se deseaba medir con el canal CH1, o *t2* si se deseaba medir con el canal CH2; y **valorTrigger** fue el valor previamente calculado.

```
[root@lago:~/RedPi/lago_ecosystem/projects/lago_v1_0/src# ./lago -s t1 300 ]
Complete. Data written: 0x0000012c
root@lago:~/RedPi/lago_ecosystem/projects/lago_v1_0/src# █
```

Figura 174: Configuración trigger

El valor del trigger es de suma importancia ya que dependiendo del valor de este se considerará un pulso como evento. Además, también debe de tener en cuenta el voltaje que pueda haber por ruido, por lo que el trigger se debe de ajustar a un valor mayor que el del ruido.

Ejecución de la adquisición de datos

El inicio de la adquisición de datos se realizó ejecutando la siguiente línea:

```
./lago -f nombre_archivo
```

Para terminar la adquisición de datos se presionó *ctrl + c*. Al escribir *ls* se pudo observar el archivo *.dat* generado. Para enviar este archivo a la computadora se utilizó el comando *scp* de la siguiente manera:

```
scp nombre_archivo usuario@ip:directorio
```

20.2.10. Generación de señales

Ya que el nuevo detector brinda pulsos positivos cuando se detecta una partícula, a diferencia del anterior que proporciona pulsos negativos, fue necesario determinar si era necesario realizar modificaciones en el código fuente. Para simular estos pulsos positivos se utilizó un generador de funciones BK Precision 4011A. La señal de salida de este fue una señal cuadrada a una frecuencia de 1.5MHz. Esta señal se puede observar en la Figura 40. Sin embargo, dada la alta frecuencia, el generador producía pulsos muy similares a los que brinda el detector. Entonces, en la entrada CH1 se conectó la salida del generador de funciones y se realizó una adquisición de datos con un trigger de 100.

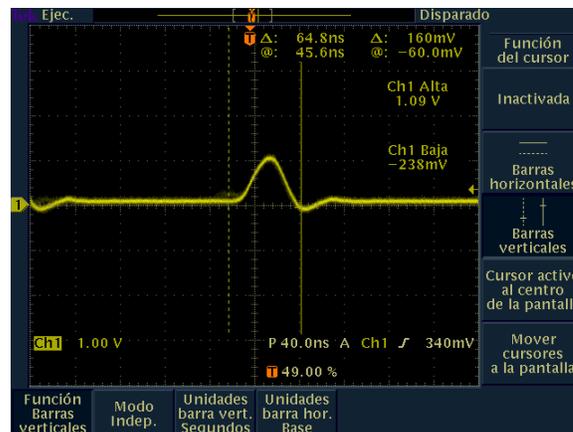


Figura 175: Pulso positivo generado

Ya que el PMT trasladado al volcán Atitlán genera pulsos positivos, también se realizaron mediciones de pulsos negativos obtenidos con el mismo generador de funciones. Los pulsos negativos se obtuvieron de la misma manera que los pulsos positivos, como se observa en la Figura 41. Para leerlos con la Red Pitaya se conectó la salida del generador a la entrada CH1 y se realizó una adquisición de datos con un trigger de 300.

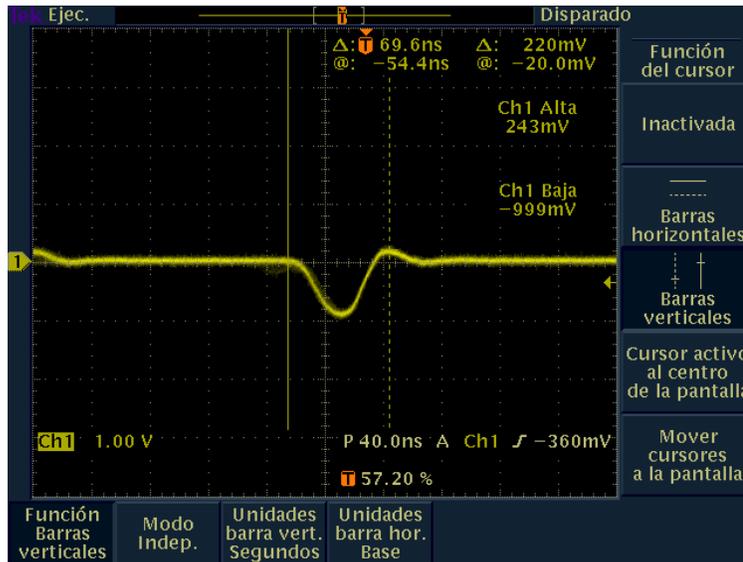


Figura 176: Pulso negativo generado

Además de realizar mediciones de pulsos positivos y negativos también se realizaron adquisiciones de datos para señales sinusoidales y triangulares. Las señales muestreadas se muestran en las figuras 42 y 43.

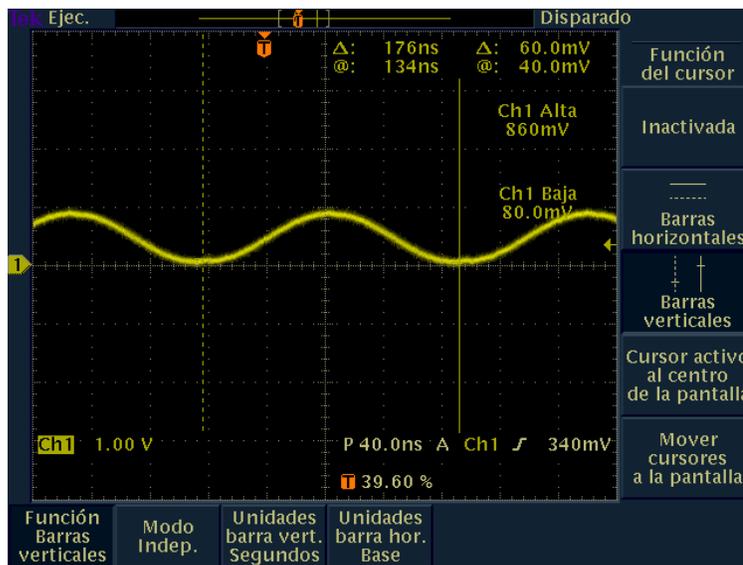


Figura 177: Señal sinusoidal positiva generada

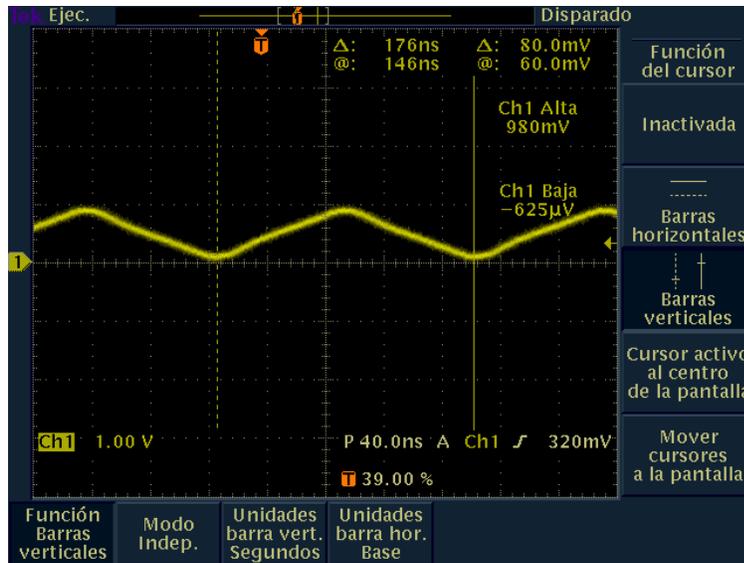


Figura 178: Señal triangular positiva generada

20.2.11. Consumo de energía

El tanque trasladado al volcán Atitlán se alimenta por medio de un panel solar, por lo que si se deseara implementar la nueva tecnología es necesario determinar la carga que esta representaría. Para ello se midió el consumo de energía utilizando el medidor Keweisi KWS-10VA, el cual brindó los datos de voltaje y corriente.

Se realizaron dos corridas: una en donde la Red Pitaya se encontraba encendida sin que se estuviera ejecutando algún código o adquisición de datos, y otra en donde se encontraba realizando la adquisición de datos junto con el sensor de temperatura y presión, y produciendo la señal de control de la fuente de alto voltaje. Cada corrida tuvo una duración de 30 minutos, en los que se tomaron los datos de voltaje y corriente en cada minuto transcurrido. Esta misma prueba también se realizó para la Raspberry Pi 2.



Figura 179: Medición de corriente y voltaje en la placa Red Pitaya



Figura 180: Medición de corriente y voltaje en Raspberry Pi 2

El cálculo de la potencia requerida para alimentar la placa se empleó la siguiente ecuación:

$$P = Corriente * Voltaje \quad (114)$$

Para el cálculo de la energía consumida por la placa se utilizó la siguiente ecuación:

$$E_{consumida} = MAX(potencia) * 1hora \quad (115)$$

20.3. Resultados nuevo sistema de adquisición de datos

20.3.1. Medición de pulsos provenientes del WCD Kinich Ahau

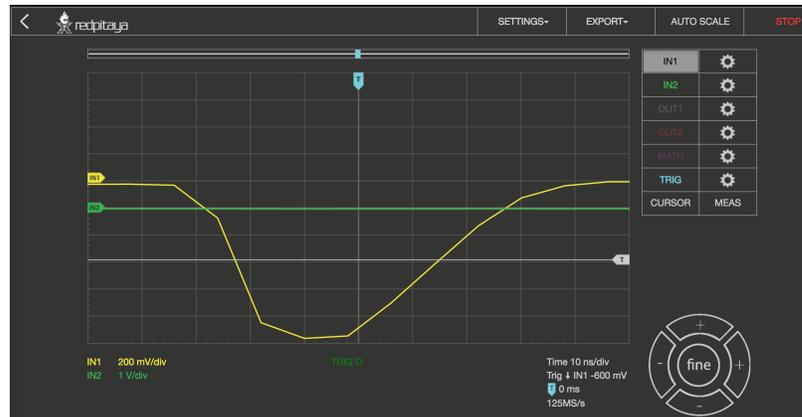


Figura 181: Medición salida Kinich Ahau (Osciloscopio Red Pitaya)

20.3.2. Medición de pulsos provenientes del generador de funciones

Pulsos positivos

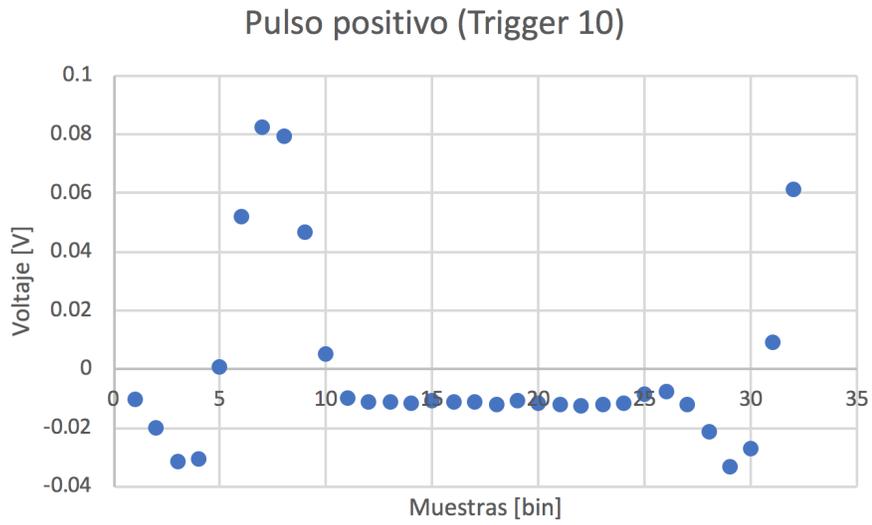


Figura 182: Medición pulso positivo con trigger de 10

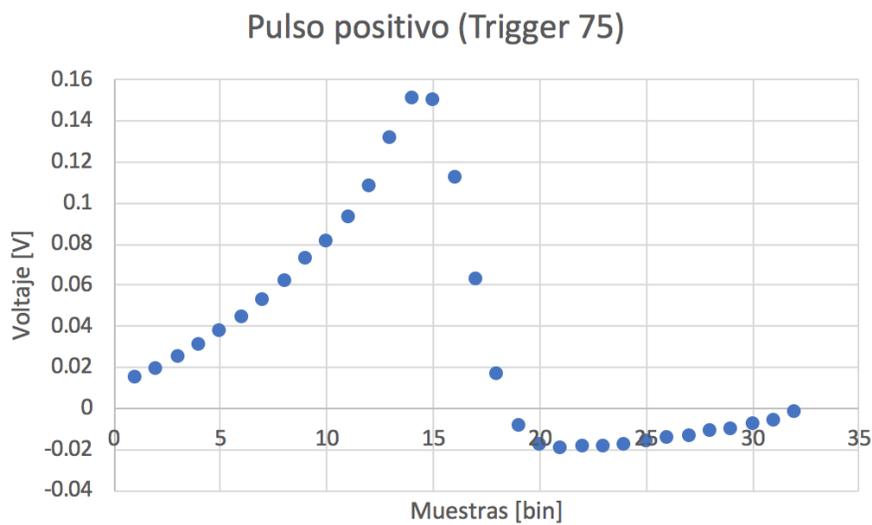


Figura 183: Medición pulso positivo con trigger de 75

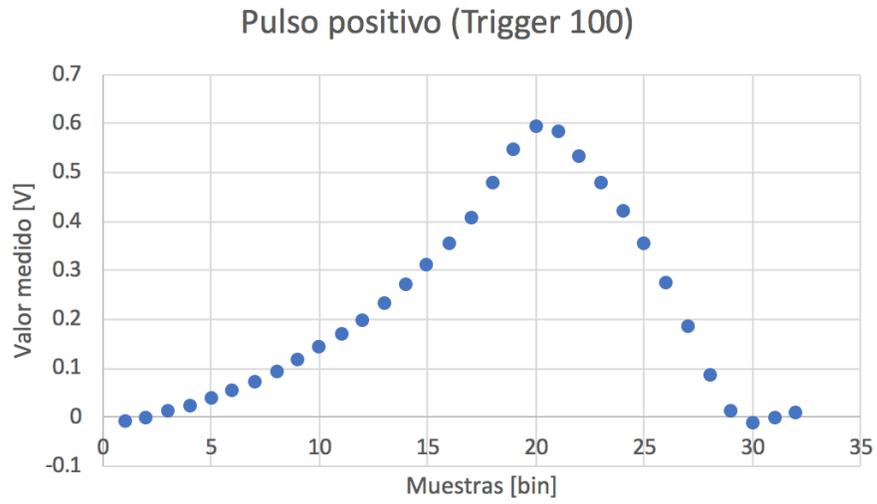


Figura 184: Medición pulso positivo con trigger de 125

20.3.3. Pulsos negativos

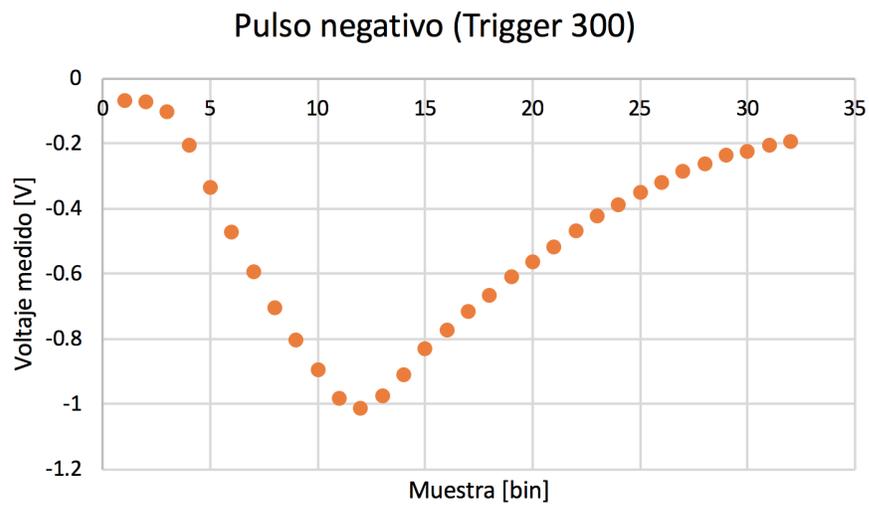


Figura 185: Medición pulso negativo con trigger de 300

20.3.4. Señales analógicas

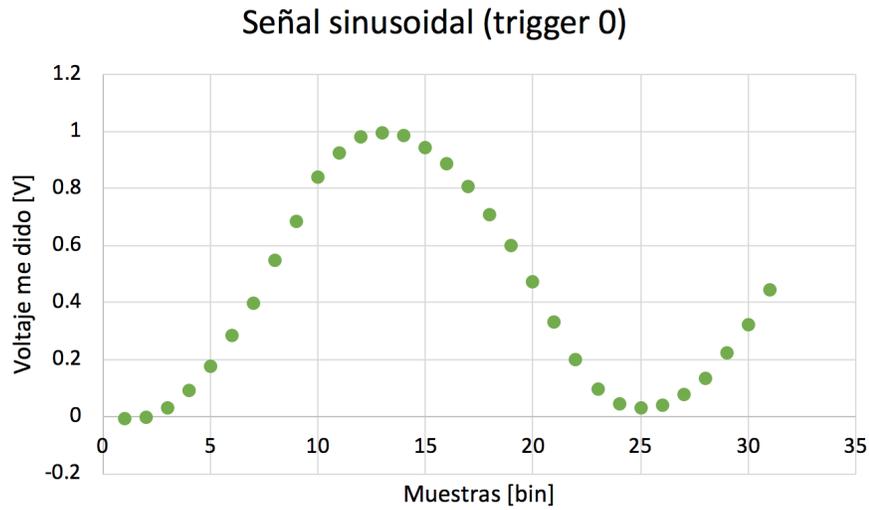


Figura 186: Medición de señal sinusoidal positiva con trigger de 0

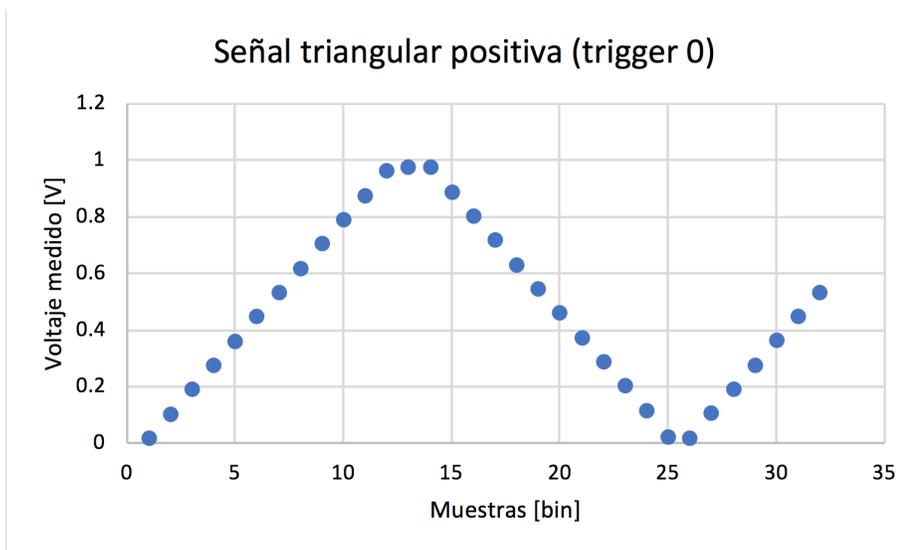


Figura 187: Medición de señal triangular positiva con trigger de 0

20.3.5. Formato de archivo generado al realizar una adquisición de datos

```
# v 5
##
## This is a LAGO raw data file, version 5
## It contains the following data:
## <N1> <N2>      : line with values of the 2 ADC for a triggered pulse
## # t <C> <V>    : end of a trigger
##               : gives the channel trigger (<C>: 3 bit mask) and 125 MHz clock count (<V>) of the trigger time
## # c <C>        : internal trigger counter
## # x f <V>      : 125 MHz frequency
## # x t <V>      : temperature value
## # x p <V>      : pressure value
## # x h <HH:MM:SS> <DD/MM/YYYY> <S> : GPS time (every new second, last number is seconds since EPOCH)
## # x s <T> C <P> hPa <A> m : temperature <T>, pressure <P> and altitude (from pressure) <A>
## # x g <LAT> <LON> <ALT> : GPS data - latitude, longitude, altitude
## # x b <B1> <B2> <B3> : baselines (NOT IMPLEMENTED IN LAGO)
## In case of error, an unfinished line will be finished by # E @@@
## Followed by a line with # E <N> and the error message in human readable format, where <N> is the error code:
## # E 1 : read timeout of 2 seconds
## # E 2 : too many buffer reading tries
## # E 3 : unknown word from FPGA
##
## Current registers setting
##
# x c T1 100
# x c T2 8190
# x c HV1 4.1 mV
# x c HV2 4.1 mV
# x c SC1 1
# x c SC2 1
## This file was started on lago
## Machine local time was Wed Dec 31 21:02:47 1969
## WARNING, there is no GPS, using PC time
##
51 104
92 107
118 105
165 108
191 107
216 105
250 98
267 111
295 106
307 95
318 111
272 98
110 118
-239 102
-987 107
-1788 98
-2424 92
-2486 99
-2167 100
-1796 108
-1524 109
-1341 91
-1193 103
-1013 109
-881 105
-735 99
-624 96
-519 103
-426 105
-337 108
-257 114
-178 116
# t 1 66
# c 1
43 105
93 112
```

Figura 188: Medición de señal triangular positiva con trigger de 0

20.3.6. Señal de control para placa de alto voltaje

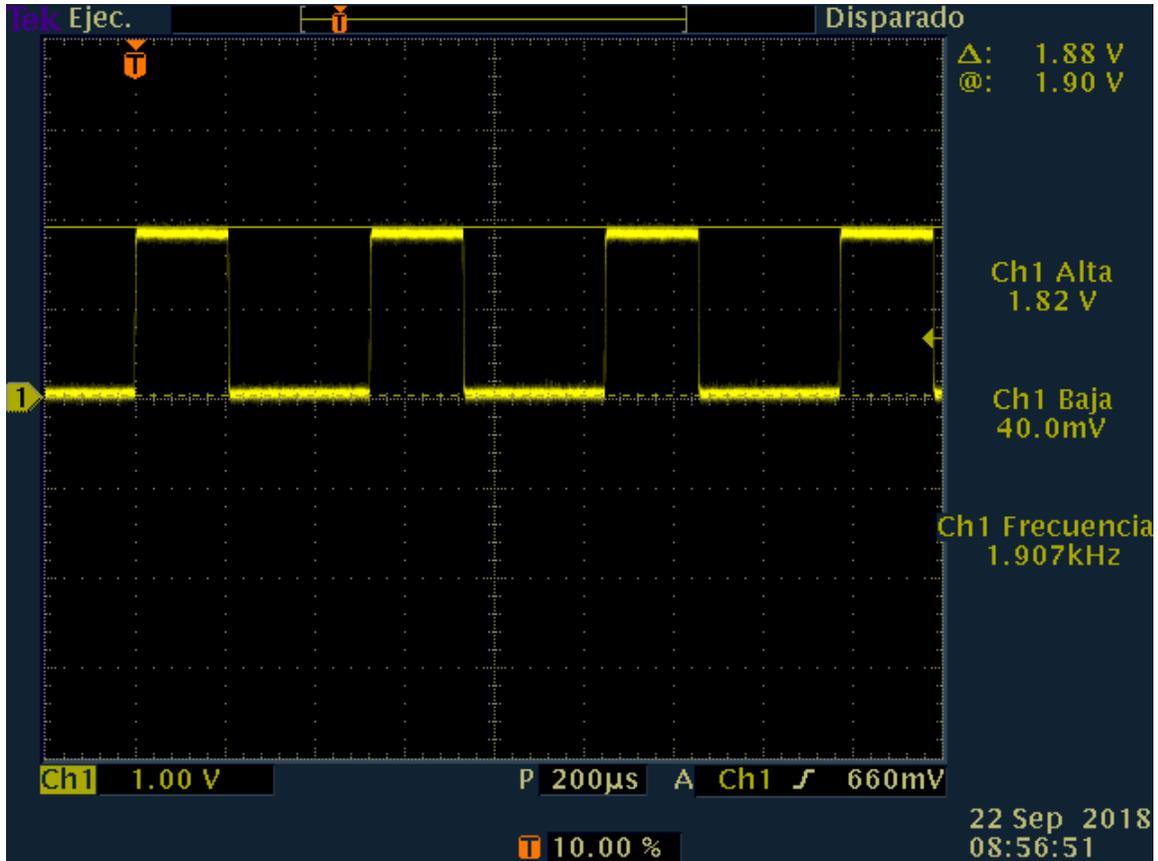


Figura 189: Medición de señal triangular positiva con trigger de 0

20.3.7. Caracterización de fuente de alto voltaje EMCO C20

Voltaje de entrada [V]	Voltaje de salida [V]
0.19	75.2
0.45	173.9
0.84	321
1	381
1.3	492
2.11	793
2.55	953

Cuadro 29: Voltaje de salida vs voltaje de entrada fuente EMCO C20

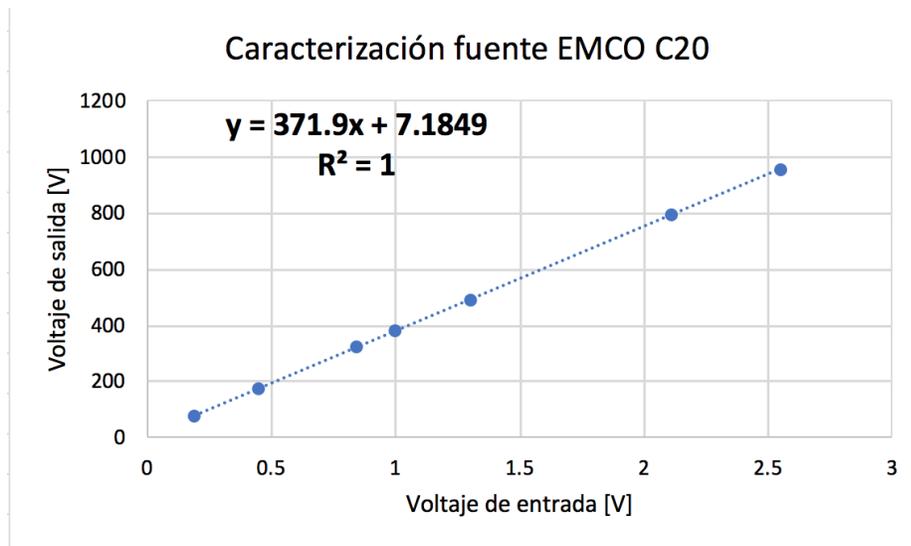


Figura 190: Voltaje de salida vs voltaje de entrada

Voltaje de entrada [V]	Corriente de consumo [mA]
0.19	3.00
0.45	7.00
0.84	14.0
1.0	17.0
1.3	22.0
2.11	37.0
2.55	45.0

Cuadro 30: Corriente de consumo vs voltaje de entrada

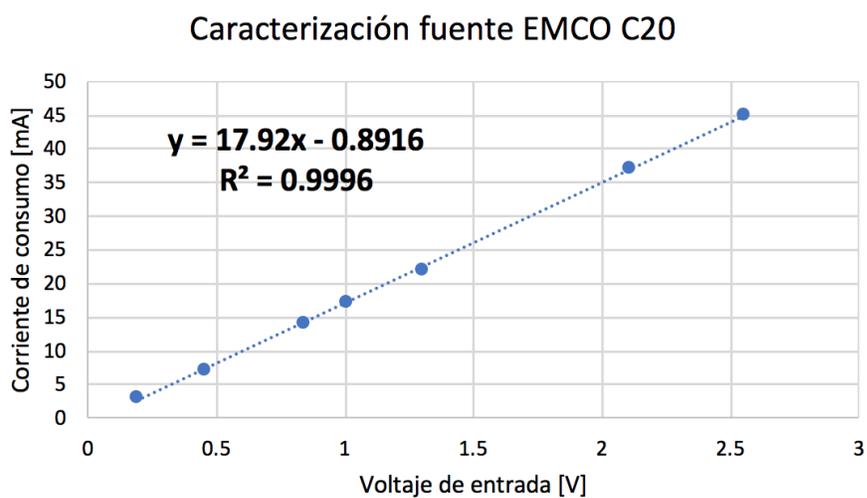


Figura 191: Corriente de consumo vs voltaje de entrada

20.3.8. Mediciones de presión, temperatura y altitud

```

root@lago:~/rp_bmp180/src# ./test
Temperature = 25.3, Pressure = 86018, Altitude= 1360.6
Temperature = 25.2, Pressure = 86021, Altitude= 1359.3
Temperature = 25.2, Pressure = 86040, Altitude= 1359.7
Temperature = 25.2, Pressure = 86023, Altitude= 1359.4
Temperature = 25.2, Pressure = 86020, Altitude= 1360.2
Temperature = 25.2, Pressure = 86026, Altitude= 1359.8
Temperature = 25.1, Pressure = 86007, Altitude= 1359.9
Temperature = 25.1, Pressure = 86025, Altitude= 1360.7
Temperature = 25.1, Pressure = 86024, Altitude= 1359.7
Temperature = 25.1, Pressure = 86024, Altitude= 1360.1

```

Figura 192: Medición de temperatura y presión con sensor BMP180

20.3.9. Energía y potencia consumida

Tiempo [minutos]	Voltaje [V]	Corriente de consumo [mA]	Potencia [W]
1	5.08	600	3.048
2	5.08	590	2.997
3	5.08	600	3.048
4	5.08	600	3.048
5	5.08	600	3.048
6	5.08	600	3.048
7	5.08	600	3.048
8	5.08	580	2.946
9	5.08	600	3.048
10	5.09	600	3.054
11	5.09	610	3.105
12	5.09	600	3.054
13	5.09	600	3.054
14	5.09	590	3.003
15	5.09	600	3.054
16	5.09	600	3.054
17	5.09	600	3.054
18	5.09	610	3.105
19	5.10	620	3.162
20	5.10	610	3.111
21	5.10	600	3.060
22	5.10	600	3.060
23	5.10	600	3.060
24	5.10	600	3.060
25	5.10	600	3.060
26	5.10	610	3.111
27	5.10	600	3.060
28	5.10	600	3.060
29	5.11	580	2.964
30	5.11	600	3.066

Cuadro 31: Potencia consumida por Red Pitaya sin ejecución de programas

Tiempo [minutos]	Voltaje [V]	Corriente de consumo [mA]	Potencia [W]
1	5.04	700	3.528
2	5.04	700	3.528
3	5.04	700	3.528
4	5.04	700	3.528
5	5.04	730	3.679
6	5.04	730	3.679
7	5.04	700	3.528
8	5.04	700	3.528
9	5.04	700	3.528
10	5.03	700	3.521
11	5.04	730	3.679
12	5.04	730	3.679
13	5.04	730	3.679
14	5.04	730	3.679
15	5.04	700	3.528
16	5.04	700	3.528
17	5.04	700	3.528
18	5.04	700	3.528
19	5.04	700	3.528
20	5.04	700	3.528
21	5.04	730	3.679
22	5.04	730	3.679
23	5.04	730	3.679
24	5.04	730	3.679
25	5.04	730	3.679
26	5.04	730	3.679
27	5.04	730	3.679
28	5.03	790	3.974
29	5.02	800	4.016
30	5.03	790	3.974

Cuadro 32: Potencia consumida por Red Pitaya mientras se realiza la adquisición de datos

Energía consumida por placa sin ejecutar algún código [Wh]	Energía consumida por la placa mientras se realiza una adquisición de datos [Wh]	Diferencia [%]
3.69	4.03	27.26

Cuadro 33: Consumo de energía Red Pitaya

Tiempo [minutos]	Voltaje [V]	Corriente de consumo [mA]	Potencia [W]	Potencia total [W]
1	5.09	290	1.476	2.5021
2	5.09	290	1.476	2.5021
3	5.09	290	1.476	2.5021
4	5.09	290	1.476	2.5021
5	5.09	300	1.527	2.553
6	5.09	300	1.527	2.553
7	5.09	300	1.527	2.553
8	5.09	290	1.476	2.5021
9	5.09	290	1.476	2.5021
10	5.09	300	1.527	2.553
11	5.09	300	1.527	2.553
12	5.1	290	1.479	2.505
13	5.1	300	1.530	2.556
14	5.1	290	1.479	2.505
15	5.09	290	1.476	2.5021
16	5.09	290	1.476	2.5021
17	5.09	290	1.476	2.5021
18	5.09	290	1.476	2.5021
19	5.09	290	1.476	2.5021
20	5.09	300	1.527	2.553
21	5.09	300	1.527	2.553
22	5.09	300	1.527	2.553
23	5.09	300	1.527	2.553
24	5.09	300	1.527	2.553
25	5.09	290	1.476	2.5021
26	5.09	290	1.476	2.5021
27	5.09	300	1.527	2.553
28	5.09	300	1.527	2.553
29	5.09	300	1.527	2.553
30	5.09	290	1.476	2.5021

Cuadro 34: Potencia consumida por Raspberry Pi 2 sin ejecución de programas

Tiempo [minutos]	Voltaje [V]	Corriente de consumo [mA]	Potencia [W]	Potencia total [W]
1	5.05	490	2.475	3.2605
2	5.04	510	2.570	3.3564
3	5.04	520	2.621	3.4068
4	5.04	520	2.621	3.4068
5	5.04	530	2.671	3.4572
6	5.04	530	2.671	3.4572
7	5.04	530	2.671	3.4572
8	5.05	530	2.677	3.4625
9	5.04	540	2.722	3.5076
10	5.04	530	2.671	3.4572
11	5.04	530	2.671	3.4572
12	5.04	520	2.621	3.4068
13	5.04	510	2.570	3.3564
14	5.04	510	2.570	3.3564
15	5.05	500	2.525	3.311
16	5.05	500	2.525	3.311
17	5.05	510	2.576	3.3615
18	5.04	510	2.570	3.3564
19	5.04	510	2.570	3.3564
20	5.04	500	2.520	3.306
21	5.04	510	2.570	3.3564
22	5.04	510	2.570	3.3564
23	5.04	500	2.520	3.306
24	5.04	490	2.470	3.2556
25	5.05	500	2.525	3.311
26	5.05	510	2.576	3.3615
27	5.04	520	2.621	3.4068
28	5.04	520	2.621	3.4068
29	5.05	530	2.677	3.4625
30	5.05	520	2.626	3.412

Cuadro 35: Potencia consumida por Raspberry Pi 2 mientras se realiza la adquisición de datos

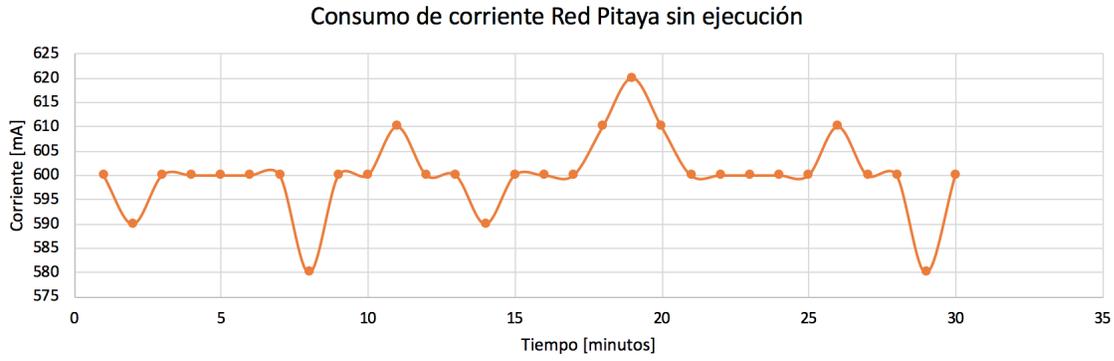


Figura 193: Consumo de corriente Red Pitaya en estado de espera



Figura 194: Potencia Red Pitaya en estado de espera

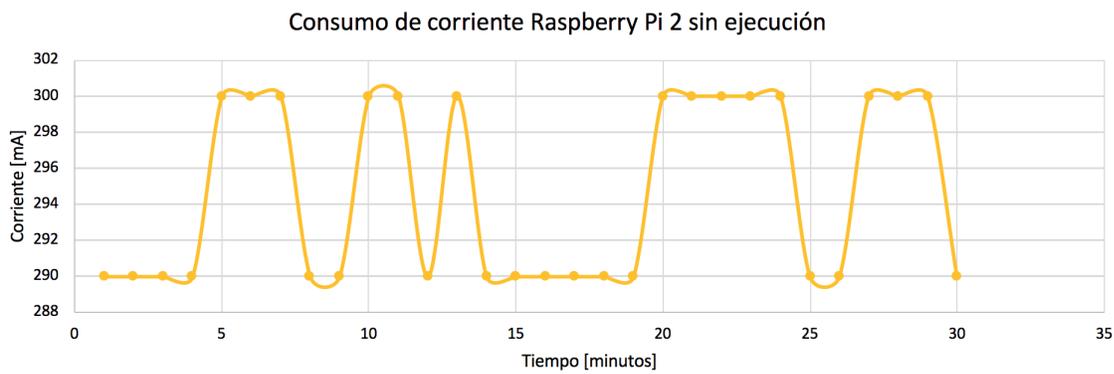


Figura 195: Consumo de corriente Raspberry Pi 2 en estado de espera

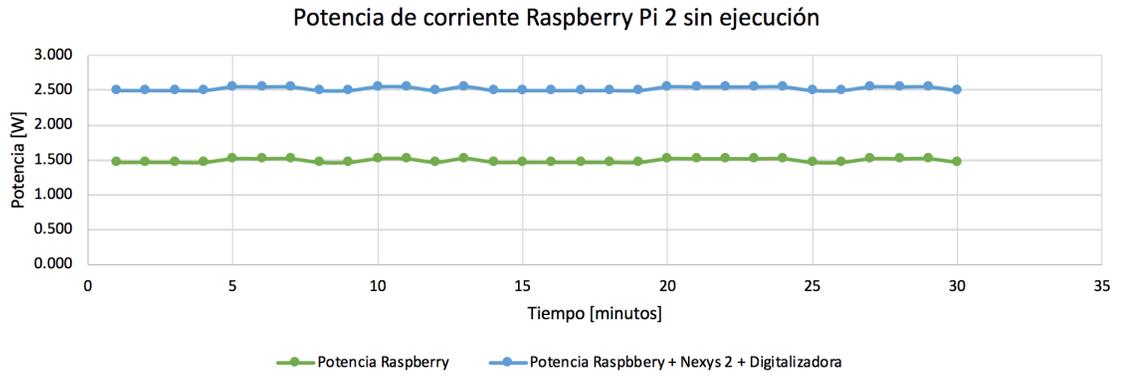


Figura 196: Potencias Raspberry Pi 2 y sistema completo en estado de espera

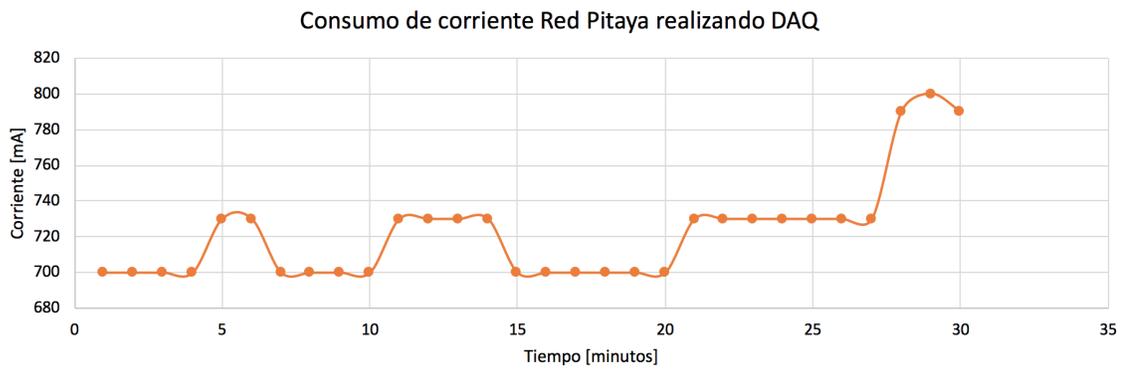


Figura 197: Consumo de corriente Red Pitaya realizando adquisición de datos

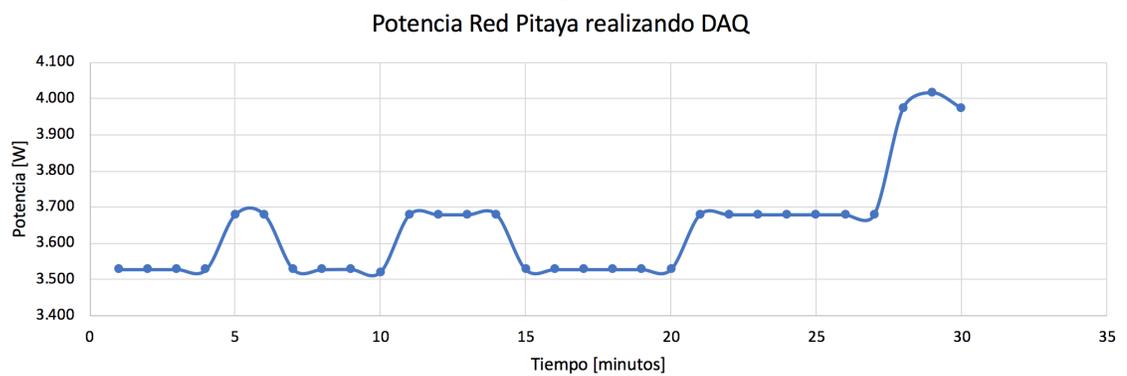


Figura 198: Potencia Red Pitaya realizando adquisición de datos

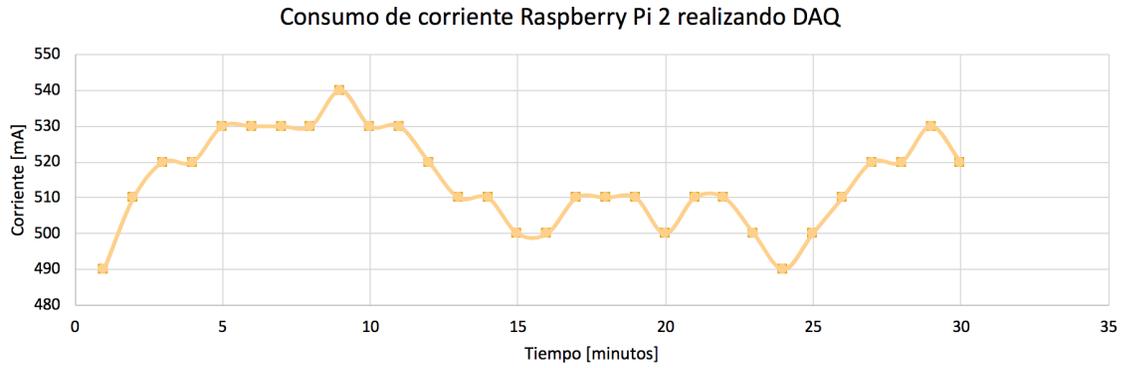


Figura 199: Consumo corriente Raspberry Pi 2 realizando adquisición de datos

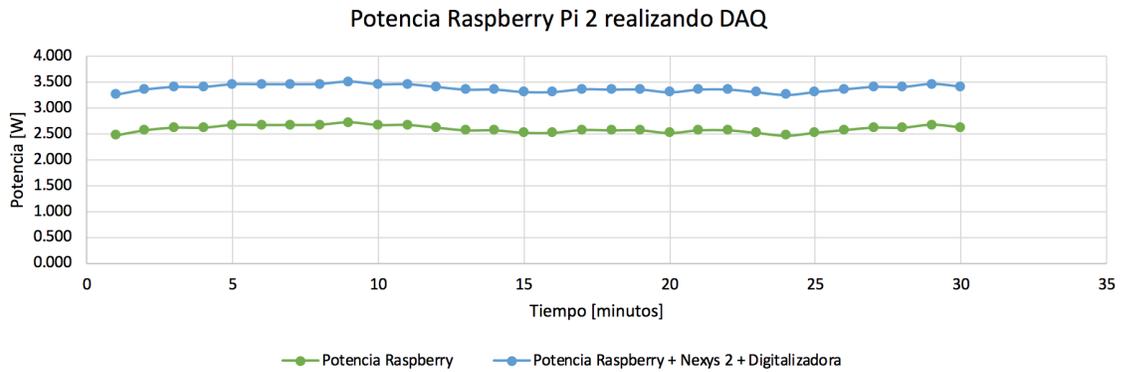


Figura 200: Potencias Raspberry Pi 2 y sistema completo realizando adquisición de datos

Energía consumida por el sistema sin ejecutar algún código [Wh]	Energía consumida por el sistema mientras se realiza una adquisición de datos [Wh]	Diferencia [%]
2.56	3.51	37.23

Cuadro 36: Consumo de energía del sistema trasladado

Diferencia de energía consumida en estado de espera [%]	Diferencia de energía consumida realizando adquisición de datos [%]
44.1	14.8

Cuadro 37: Diferencia de consumos de energía sistema trasladado y sistema Red Pitaya

Los centelleadores son materiales que tienen la capacidad de emitir luz al ser expuestos a radiación. Por lo mismo han sido utilizados como detectores de muones en diversas aplicaciones. Un buen centelleador debe cumplir con los siguientes criterios:

- Alta eficiencia para convertir la energía de la radiación en luz.
- Dar una respuesta lineal en la cantidad de luz emitida en relación con la energía absorbida
- No absorber la luz que él mismo produce.
- La luminiscencia debe tener un corto tiempo de decaimiento
- No contener materiales no centelleadores.
- Tener un índice de refracción que concuerde con el tubo fotomultiplicador utilizado para detectar la luz producida [110]



Figura 201: Ejemplos de centelleadores orgánicos comerciales, [111]

21.1. Centelleadores inorgánicos

Los centelleadores inorgánicos son cristales inorgánicos con la capacidad de centellear, o bien con dopantes que pueden hacerlo gracias a iones fluorescentes como talio (Tl) o cerio (Ce). Normalmente están compuestos de sales como NaI(Tl), CsI(Tl), CsI(Na) y BaF₂. Suelen tener entre 4 y 8 g/cm³ de densidad y un alto número atómico efectivo, razón por la cual suelen ser usados en aplicaciones que necesiten gran eficiencia de conversión de energía, o bien un gran poder de frenado. Pueden ser usados como calorímetros de absorción electromagnética total, o bien como detectores de radiación gamma entre un amplio rango de energías [112].

Estos cristales tienen un gran rendimiento lumínico, permitiendo así una resolución excelente para aplicaciones de baja energía [112]. Sin embargo, generalmente tienen un tiempo de respuesta en el orden de microsegundos y muchos son higroscópicos, haciendo así que estos se queden cortos en aplicaciones de conteo rápido, como el conteo de muones [113].

21.2. Centelleadores orgánicos

Por su parte, los centelleadores orgánicos están basados en moléculas orgánicas con sistemas de anillos aromáticos. Están clasificados en tres tipos: cristalinos, líquidos y plásticos, siendo estos últimos los más utilizados gracias a su flexibilidad en diseño y su bajo costo de fabricación. Sus densidades suelen variar entre 1.03 y 1.20 g/cm³, y dar aproximadamente un fotón por cada 100 eV de energía depositada [114]. Los primeros centelleadores orgánicos fueron hechos de cristales de antraceno o estilbeno puro. Hoy en día se utilizan mezclas de moléculas fluorescentes (flúors) disueltas en una matriz líquida o sólida, según la aplicación [110]. Algunas de las composiciones más comunes se encuentran representadas en el Cuadro 38:

Base	Flúor primario	Flúor secundario
Poliestireno	2 % TP	0.1 % POPOP
Polivinil Xileno	2 % TP	0.1 % POPOP
Polivinil Tolueno	2 % TP	0.1 % POPOP
Poliestireno	1.5 % TP	-
Poliestireno	1.5 % DF	-
Poliestireno	1.5 % BPO	-
Poliestireno	1.5 % PPO	-
Poliestireno	1.5 % B α NE	-
Poliestireno	1.5 % TP	-
Poliestireno	2.0 % TP	0.1 % POPOP
Poliestireno	2.0 % TP	0.1 % BBO
Poliestireno	2.0 % TP	0.1 % 3P- Δ^2
Poliestireno	2.0 % TP	0.4 % BBE

Cuadro 38: Composición de centelleadores comunes [110]

Al contrario de los centelleadores inorgánicos, los centelleadores orgánicos no presentan una respuesta lineal ante la densidad de ionización (energía absorbida) y una menor cantidad de luz emitida con relación a la energía absorbida, pero presentan tiempos de respuesta más rápidos (en el orden de ns) siendo así los detectores por excelencia en aplicaciones de conteo rápido [110].

21.3. Proceso de centelleo

Cuando una molécula cargada atraviesa la materia deja tras de sí un halo de moléculas excitadas. Los centelleadores liberan parte de esta energía (aproximadamente un 3%) en forma de mediante un proceso conocido como centelleo. El mismo es especialmente marcado en sustancias orgánicas con anillos aromáticos, como las presentadas en el Cuadro 38. A pesar de que todos los compuestos presentados anteriormente son sólidos, líquidos como tolueno, xileno y pseudocumeno también pueden centellear [114].

El espectro de emisión obtenido por este proceso es idéntico al espectro de fluorescencia del compuesto base en sistemas de un solo componente (centelleadores sin solutos, como antraceno puro). En la actualidad se utilizan centelleadores con uno o varios solutos, con el fin de que los mismos disminuyan la longitud de onda de emisión del sistema. En un sistema binario, la energía de las moléculas excitadas del componente base es transferida a las moléculas del soluto, haciendo que el espectro de emisión de estos centelleadores sea idéntico al espectro de fluorescencia del soluto. De la misma manera ocurre para sistemas con más de dos componentes, hasta llegar a un espectro de emisión en el rango deseado del espectro electromagnético (visible) [110]. Para ejemplificar lo anterior, la Figura 202 se presenta los espectros de emisión de algunos centelleadores comerciales donde, a pesar de tener como base el mismo compuesto (polivinil tolueno) el espectro de emisión cambia según los flúors de cada uno. Se utiliza el término “fluor” para hacer referencia a las moléculas

dopantes en los centelleadores, las cuales son fluorescentes.

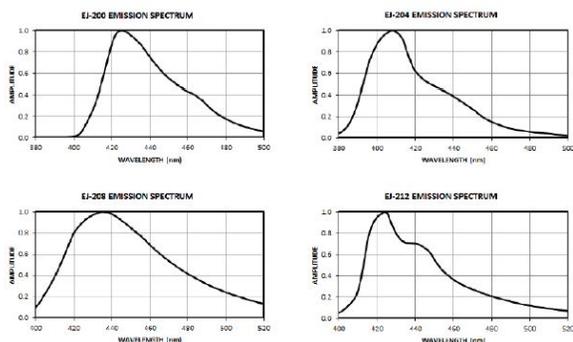


Figura 202: Espectro de emisión de los centelleadores EJ-200, EJ-204, EJ-208 y EJ-212, de Eljen Technologies, [111]

De manera general, un centelleador ocurre según el mecanismo presentado en la Figura 203. En la misma se puede apreciar que el proceso está dividido en tres subprocesos: el primero, transferencia de energía no radiativa de Förster entre las moléculas base y el flúorprimario; el segundo y tercero son procesos de absorción y emisión de energía por fluorescencia [114].

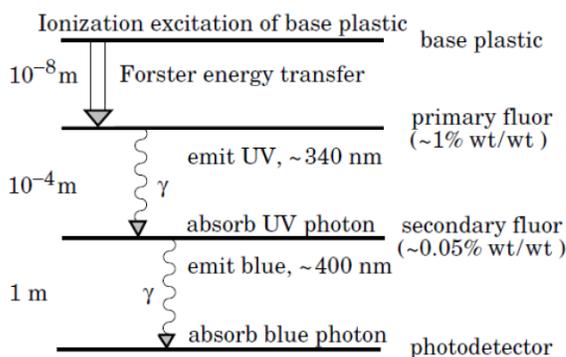


Figura 203: Representación del mecanismo de operación de un centelleador orgánico, [114]

21.3.1. Transferencia de energía resonante de Förster (FRET)

A una concentración igual o mayor al 1% (p/p) de moléculas fluorescentes, la distancia promedio entre una molécula fluorescente y las moléculas del compuesto base es cercana a los 100 armstrong, mucho menor que la longitud de onda de la luz emitida. A estas distancias, la transmisión de energía entre moléculas no ocurre por emisión y absorción de un fotón, sino por una interacción de resonancia dipolo-dipolo conocida como transferencia de energía resonante de Förster (FRET, por sus siglas en inglés) [114], [115].

La transferencia de energía resonante de Förster involucra la transferencia no radiativa de energía de excitación de un fluoróforo donador, D, a un fluróforo aceptor en estado basal, A, en la cercanía que puede emitir un fotón de baja energía. Este proceso ocurre gracias a interacciones dipolo-dipolo y depende de qué tanto se traslapan los espectros de

fotoluminiscencia del donador y de absorción del aceptor, y de la sexta potencia de distancia entre las moléculas [116].

A grandes rasgos, la eficiencia de este proceso, E , que es la fracción de energía transferida entre donador y receptor de manera no radiativa, está definida por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{k_{DA}}{k_{DA} + \tau_D^{-1}} = \frac{R_0^6}{R_0^6 + r^6} \quad (116)$$

donde r^6 es la distancia entre el donador y aceptor, R_0 es la distancia de separación de Förster cuando la velocidad de FRET iguala la velocidad de decaimiento radiativo, k_{DA} es la velocidad de transferencia de energía no radiativa, y τ_D es la vida media del estado excitado del donador [116].

R_0 es a su vez una función del índice de refracción del medio, n_D ; el número de Avogadro, N_A ; el rendimiento cuántico del donador, Q_D ; la integral de superposición, I ; y un parámetro, κ_p , que depende de la orientación relativa de los dipolos del donador y aceptor [116]. Ello se expresa según la siguiente ecuación:

$$R_0 = \left(\frac{9000(\ln 10) \kappa_p^2 Q_D}{N_A 128 \pi^5 n_D^4} I \right)^{1/6} \quad (117)$$

21.3.2. Fluorescencia

La fluorescencia es el proceso por el cual una molécula absorbe energía en forma de un fotón y posteriormente la libera en forma de otro fotón, normalmente de una longitud de onda mayor que el fotón original. Los estados excitados de fluorescencia suelen tener una vida corta (menor a 10^{-5} s) debido a que, durante los mismos, el spin del electrón no cambia [117].

Muchas especies químicas tienen la capacidad de fluorescer. Algunas, como los vapores atómicos diluidos, emiten la radiación a la misma longitud de onda que la que absorbieron. Tal es el caso del vapor de sodio, que absorbe y emite radiación en 589.6 y 589.0 nm. Este tipo de fluorescencia se conoce como fluorescencia de resonancia. Sin embargo, la mayoría de las moléculas no emiten radiación a la misma longitud de onda que la radiación de absorción, sino que la longitud de onda de emisión es mayor que la de absorción. A este desplazamiento hacia longitudes de onda mayores (fotones menos energéticos) se le conoce como desplazamiento de Stokes [117].

En un centelleador orgánico las moléculas fluorescentes, flúors, son utilizadas para cambiar la longitud de onda de emisión, cambiar la luz de centelleo hacia una longitud de onda más conveniente. En moléculas complejas la emisión y absorción de radiación ocurre en una amplia banda del espectro electromagnético, no en una longitud de onda puntual, por lo que muchas veces puede ocurrir que la longitud de onda de emisión coincida con la de la absorción, provocando que esta luz sea reabsorbida. Como se mencionó previamente, una de las condiciones para que un material sea un buen centelleador es que no absorba la radiación

que el mismo emite. Por ello, se desea que un flúor presente un amplio desplazamiento de Stokes, para disminuir la auto-absorción de la luz [114].

21.4. Relación entre energía absorbida y fotones emitidos

El número de fotones emitidos depende de la partícula y el tipo de energía que fue absorbida. Las partículas pesadas dañan las moléculas del centelleador cuando interactúan con ellas. Las moléculas dañadas cercanas se combinan, reduciendo así el número de estados de electrones π excitados en un proceso conocido como extinción (quenching en inglés) [110].

Si no hubiera efecto de extinción, la energía absorbida y la respuesta de centelleo poseen una relación lineal explicada por:

$$\frac{dL}{dx} = S \frac{dE}{dx} \quad (118)$$

donde dL/dx es la respuesta de centelleo, dE/dx la energía absorbida y S la eficiencia absoluta del centelleador [110]. Esto es lo que ocurre con los centelleadores inorgánicos.

En el caso de los centelleadores orgánicos ocurre un efecto de ionización-extinción al interactuar con partículas pesadas que generan una gran densidad de iones. Esto provoca una respuesta no lineal, provocando que se emita menos luz de la esperada usando una relación lineal [110]. Según ello, se han desarrollado modelos semi-empíricos, como el de Birk, para explicar los efectos de extinción, en base a la introducción de un término de extinción kB . La fórmula propuesta por Birk es la siguiente:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}} \quad (119)$$

donde kB es un factor de corrección determinado por medición y es específica para cada centelleador [114], [118].

Además, en modificación a la fórmula de Birk, se han propuesto modelos que incluyen un término cuadrático como factor de corrección. Tal es el caso de la siguiente ecuación, propuesta por Smith *et al.*:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx} + C \left(\frac{dE}{dx}\right)^2} \quad (120)$$

Donde C sería el factor de corrección cuadrático [110]

21.5. Agentes dopantes en centelleadores

21.5.1. Moléculas fluorescentes (Flúors)

Los centelleadores orgánicos son soluciones binarias o terciarias donde los solutos, o moléculas dopantes, son moléculas fluorescentes (flúors) disueltas en una matriz líquida o sólida de un compuesto aromático. Estos flúors pueden dividirse en primarios o secundarios, según su función y concentración [114]. Las soluciones entre el polímero y uno o varios dopantes eficientes pueden dar una eficiencia cuántica cercana a 1, siendo así un centelleador de alta eficiencia. El término eficiencia cuántica es la probabilidad de que la relajación de un estado excitado en el polímero produzca la liberación de un fotón por el dopante [119].

Los flúors primarios son aquellos que se encuentran acoplados a la excitación primaria producida por el solvente, y se encuentran en una concentración mayor (cercana al 1% en peso). Estos tienen dos funciones: aumentar la cantidad de fotones por unidad de energía liberados (eficiencia cuántica) de la combinación solvente-dopante, y cambiar la longitud de onda media de la fluorescencia final del centelleador a una longitud de onda mayor [119]. El aumento en la eficiencia cuántica se debe al fuerte acoplamiento que existe entre las moléculas de la base y las del flúorprimario, gracias a la transferencia de energía no radiativa de Förster, descrita anteriormente [114].

Por su parte, los flúors secundarios se encuentran en una concentración en peso entre 0.01% y 2%. Su función es aumentar aún más la longitud de onda de emisión del centelleador, por lo que la luz emitida suele quedar en la parte roja del espectro electromagnético. Al hacer esto, reduce la auto-absorción de fotones por parte del centelleador al aumentar el desplazamiento de Stokes [119].

21.5.2. Técnicas para dopar centelleadores

Hay diversas técnicas para dopar un centelleador, ya sea partiendo de la molécula base ya polimerizada o no, siendo las bases más frecuentes poliestireno y polivinil tolueno. Entre las técnicas para dopar una matriz polimérica como la siguiente están:

- Disolver los dopantes en el polímero derretido.
- Disolver los dopantes en el monómero, para luego ser polimerizado a baja temperatura (50 °C) con un catalizador.
- Disolver los dopantes en el monómero, para luego polimerizarlo a temperatura media (125 °C) sin catalizador, durante varios días.
- Disolver los dopantes en el monómero, para luego polimerizarlo a altas temperaturas (200 °C) sin catalizador, durante 12 a 15 horas [119].

El método a utilizar depende de las dimensiones del centelleador deseado. Sin embargo, de manera general se podría decir que el proceso para la preparación de un plástico centelleador consiste en lo siguiente: 1) purificación del monómero por destilación al vacío, para eliminar

los inhibidores que posea, 2) agregar los agentes dopantes, 3) remover los gases disueltos (en especial, el oxígeno), 4) polimerización de los monómeros en una atmósfera inerte y 5) un recocido cuidadoso del plástico, para eliminar defectos o pequeñas grietas en el plástico [119].

Dado que la fabricación de los centelleadores es relativamente costosa para aplicaciones que requieran detectores de gran tamaño (arriba de \$40 por kilogramo de material) se han buscado alternativas para disminuir los costos de fabricación, entre ellas los centelleadores plásticos extruidos. El término extruido hace referencia a la técnica de extrusión utilizada de manera comercial para producir pastillas plásticas que pueden ser derretidas posteriormente para generar un plástico de la forma deseada [120].

Utilizando esta técnica, se han logrado formar pastillas centelladoras de poliestireno en base a pastillas de poliestireno de grado comercial y los agentes dopantes, en una fábrica de producción estándar. En primer lugar, se purgan las pastillas de poliestireno por varios días en un gas inerte para eliminar el oxígeno disuelto. Posteriormente se añaden los dopantes, junto con aceite de silicona para asegurar la homogeneidad en la distribución de los mismos. Finalmente, el plástico derretido fue extruido y se dividió en pequeñas pastillas para su posterior moldeo en la forma final del centelleador. A pesar de que esta resulta una alternativa más económica para la fabricación de grandes cantidades de plástico centelleador, el material presenta propiedades ópticas inferiores y pequeñas rajaduras producto de impurezas no centelleadoras introducidas por la misma maquinaria, al igual que los cambios bruscos de temperatura producto del proceso de extrusión en sí [120].

21.6. Cuidados de los centelleadores orgánicos

A pesar de que los centelleadores orgánicos suelen ser robustos, es necesario tener ciertos cuidados al momento de manejarlos y almacenarlos. La exposición de los centelleadores a vapores de solventes orgánicos, altas temperaturas, estrés mecánico, un manejo brusco o incluso la misma radiación, puede degradar lentamente el material. La superficie es una parte delicada de los centelleadores, ya que puede desarrollar micro-rajaduras que degradarán la transmisión de luz y la reflexión interna total. Esto ocurre especialmente en zonas donde el centelleador entró en contacto con aceites, solventes orgánicos o, incluso, huellas dactilares. En el caso de solventes orgánicos y altas temperaturas, estas pueden lastimar la superficie del centelleador, o bien alterar su geometría [114].

De manera similar, la cantidad de luz emitida decrece con el aumento de la presión parcial de oxígeno, llegando a ser de hasta un 10% menos en una atmósfera artificial. La cantidad de luz emitida cambia en presencia de un campo magnético, reportándose aumentos de hasta un 3% en un campo de 0.45 T [114].

Los centelleadores plásticos crean centros de color, regiones en las cuales la absorción de luz UV y azul (radiación de mayor energía) se ve favorecida en relación al resto del espectro visible (radiación menos energética). La razón por la cual ocurre este fenómeno no es del todo conocida, pero se sabe que reduce la cantidad de luz emitida y la longitud de onda de atenuación. Depende de varios parámetros antes, durante y después de la irradiación como: temperatura, la atmósfera, difusión de oxígeno y propiedades del material en sí como el largo

de la cadena del polímero. Para evitar o reducir este daño, se utiliza una estrategia conocida en inglés como “better red than dead”, haciendo referencia a que se prefieren longitudes de onda mayores (menos energéticas) a longitudes de onda menores que puedan dañar el material. Por lo mismo, se prefieren flúors con un gran desplazamiento de Stokes [114].

21.7. Metodología

21.7.1. Resumen de cada procedimiento

Síntesis de hojas de óxido de nano-grafeno

Agregar 100 g de grafito pulverizado y 50 g de nitrato de sodio en ácido sulfúrico concentrado. Mezclar en un recipiente de 15 L y mantener en baño de hielo. Agregar lentamente y con agitación 300 g de permanganato de potasio cuidando que la temperatura no supere los 20 °C. Quitar del baño de hielo y mantener a 35 °C por media hora. Agregar 4.6 L de agua con cuidado, la solución aumentará hasta 98 °C, donde se mantiene por 15 minutos. Diluir a un volumen total de 14 L y tratar con peróxido de hidrógeno al 3 % para reducir el permanganato residual a sales incoloras, hasta una solución amarilla. Filtrar en caliente y quedarse con el precipitado. Lavar 3 veces con un total de 14 L de agua tibia. Redisolver en 32 L de agua, remover impurezas de sales con resinas de intercambio iónico. Sonicar 3 veces por 6 h, después de la primeras dos centrifugar a 5000 rpm por 15 minutos, y la última a 10000 rpm por 20 minutos.

Oxidación de p-xileno a ácido tereftálico

Disolver 1 mmol de p-xileno en peróxido de hidrógeno 7 eq y acetona (5:1), hojas de óxido de nano-grafeno 100 % (p/v). Mantener a 100 °C por 24 horas

Síntesis de cloruro de terftaloílo

Agregar 6.3 g (0.03 mol) de pentacloruro de fósforo en un balón de fondo redondo de 200 mL con condensador conectado a una trampa de HCl. Agregar 2.5 g (0.015 mol) de ácido tereftálico, mezclar con agitación y calentar en baño maría. Pasados unos 10 minutos (cuando reaccione todo el sólido) calentar a un reflujo gentil por un minuto con llama pequeña. Enfriar, y agregar 25 mL de éter de petróleo. Calentar en baño maría para disolver el cloruro de tereftaloílo. Filtrar la solución caliente en campana, enfriar el filtrado a temperatura ambiente y luego en baño de hielo. Remover el sólido por filtración al vacío, haciendo lavados del sólido con 5-10 mL de éter de petróleo. Recristalizar nuevamente a partir del éter de petróleo, dejar secar por 5-10 minutos en un vidrio de reloj.

Síntesis del POPOP

Disolver 3.5 g (0.043 mol) de acetato de sodio anhidro en 35 mL de ácido acético glacial. Agregar 8.25 g (0.05 mol) de hidrocloreuro de 2-aminoacetofenona y mezclar por 20 minutos. Agregar lentamente 4.14 g (0.020) mol de cloruro de tereftaloilo, por un total de 40 minutos con agitación vigorosa. Agregar otros 3.5 g de acetato de sodio y calentar en baño maría por 30 minutos. Echar la solución resultante en 350 mL de agua fría y filtrar, haciendo lavados al sólido con agua fría. Dejar secar. Mezclar el sólido obtenido (6.13 g) con 60 mL de ácido sulfúrico concentrado, mezclar en baño maría con agitación magnética por media hora. Pasados los 30 minutos, echar nuevamente la solución en 150 mL de agua y luego filtrar, hacer varios lavados con agua y luego secar el sólido en una cápsula de porcelana a 60 °C por 3 horas hasta que esté completamente seco.

Para purificar, disolver el sólido final en THF y luego pasar la solución por una columna de alúmina ácida. Realizar una destilación al vacío del solvente, y finalmente secar por 24 horas a 60 °C hasta que esté completamente seco.

Producción del centelleador por método de extrusión

Purgar las pastillas de polivinil tolueno por varios días con un gas inerte (argón), mezclar el polivinil tolueno y los agentes dopantes en una tómbola por 15 minutos, agregando aceite de silicona para una mejor distribución de los dopantes. Asegurarse que la entrada y salida del extrusor se encuentren cubiertos por una corriente de gas inerte y agregar las pastillas al extrusor. Volver a convertir en pastillas las tiras de material centelleador obtenido y finalmente derretir e inyectar en un molde con la forma deseada.

No.	Nombre	Reactivos	Equipo
1	Síntesis de hojas de óxido de nano-grafeno (NGO) [121], [122]	<ul style="list-style-type: none">● Grafito pulverizado (325 mesh)● Nitrato de sodio● Ácido sulfúrico concentrado● Permanganato de potasio● Agua● Peróxido de hidrógeno (3%)● Pentóxido de fósforo	<ul style="list-style-type: none">● Centrifugadora● Baño de ultrasonido● Termómetro (hasta 150 °C)● Baño de hielo● Secado al vacío a 40°C

Cuadro 39: Reactivos y equipo utilizado en cada parte del procedimiento, primera parte.

No.	Nombre	Reactivos	Equipo
2	Oxidación de p-xileno a ácido tereftálico [121]	<ul style="list-style-type: none"> • P-xileno • Peróxido de hidrógeno • Acetona • Acetonitrilo • Etanol • Agua • NGO 	<ul style="list-style-type: none"> • Termómetro (hasta 150 °C) • Estufa u horno
3	Síntesis del cloruro de tereftaloilo [123]	<ul style="list-style-type: none"> • Pentacloruro de fósforo • Ácido tereftálico (por oxidación de p-xileno) • Éter de petróleo 	<ul style="list-style-type: none"> • Trampa de HCl • Sistema de reflujo • Baño maría • Sistema de filtración al vacío
4	Síntesis del POPOP [124]	<ul style="list-style-type: none"> • Hidrocloruro de 2-aminoacetofenona • Acetato de sodio anhidro • Ácido acético glacial • Dicloruro de tereftaloilo (Obtenido anteriormente) • Ácido sulfúrico concentrado • Tetrahidrofurano (THF) • Alúmina ácida 	<ul style="list-style-type: none"> • Columna para cromatografía • Destilación al vacío • Estufa • Baño maría • Baño de hielo • Sistema de filtración al vacío • Sistema de destilación al vacío
5	Producción del centelleador por método de extrusión [120]	<ul style="list-style-type: none"> • Polivinil tolueno • POPOP • PT • Argón (O gas inerte) • Aceite de silicona 	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de extrusión industrial • Tómbola para mezclar • Molde • Equipo para inyección del plástico en molde

Cuadro 40: Reactivos y equipo utilizado en cada parte del procedimiento, segunda parte.

21.7.2. Descripción de variables

Definición	Tipo	N de medición	Codificación
Tiempo (t, min, horas):			Se controla el tiempo de adición del permanganato de potasio, a manera que la temperatura no sea superior a 20 °C.
Periodo en el cual la reacción o la muestra se mantienen en un mismo estado.	Cuantitativa	De razón	La temperatura de 35 ± 3 °C se mantiene por 30 minutos. La temperatura de 98 °C se mantiene por 15 minutos. La muestra está en baño de ultrasonido 3 veces, por 6 horas cada una.
Temperatura (T, °C):			No debe superar los 20 °C al agregar el permanganato de potasio.
Medida de la energía cinética de las moléculas del reactivo	Cuantitativa	Intervalo	Mantenerse a 35 ± 3 °C al remover el baño de hielo, acompañado de un cambio de color y textura a una pasta café grisáceo Mantenerse a 98 °C al agregar agua, acompañado de efervescencia violenta.

Cuadro 41: Variables definidas para la síntesis de hojas de óxido de nano-grafeno

Definición	Tipo	N de medición	Codificación
Temperatura (T, °C):			Se espera una temperatura constante de 100 °C
Medida de la energía cinética de las moléculas del reactivo	Cuantitativa	Intervalo	
Tiempo (t, min, horas):			
Periodo en el cual la reacción o la muestra se mantienen en un mismo estado.	Cuantitativa	De razón	La temperatura se mantiene por 24 horas.

Cuadro 42: Variables definidas para la oxidación de p-xileno a ácido tereftálico.

Definición	Tipo	N de medición	Codificación
Temperatura (T, °C): Medida de la energía cinética de las moléculas del reactivo	Cuantitativa	Intervalo	Se calienta hasta un reflujo gentil, se elimina casi por completo el sólido. Se enfría a temperatura ambiente (25 °C) y luego en baño de hielo para cristalizar (0 °C)
Tiempo (t, min, horas): Periodo en el cual la reacción o la muestra se mantienen en un mismo estado.	Cuantitativa	De razón	La reacción inicial dura entre 5 y 10 minutos. El reflujo dura 1 minuto. Se seca la muestra al aire de 5 a 10 minutos.

Cuadro 43: Variables definidas para la síntesis del cloruro de tereftaloilo

Definición	Tipo	N de medición	Codificación
Temperatura (T, °C): Medida de la energía cinética de las moléculas del reactivo	Cuantitativa	Intervalo	Baño maría luego de agregar el acetato de sodio por segunda vez. Otro baño maría luego de agregar ácido sulfúrico. Secado a 60°C.
Tiempo (t, min, horas): Periodo en el cual la reacción o la muestra se mantienen en un mismo estado.	Cuantitativa	De razón	Los dos baños maría por un tiempo de 30 minutos. El primer secado se hace por 3 horas, el siguiente por 24 horas.

Cuadro 44: Variables definidas para la síntesis del POPOP

Definición	Tipo	N de medición	Codificación
Temperatura (T, °C): Medida de la energía cinética de las moléculas del reactivo	Cuantitativa	Intervalo	Se definirá con la empresa a trabajar

Cuadro 45: Variables definidas para la producción del centelleador por método de extrusión, primera parte.

Definición	Tipo	N de medición	Codificación
Presencia de oxígeno:			
Presencia o ausencia de oxígeno en los alrededores del plástico y en las salidas y entradas del equipo utilizado.	Cualitativa	Ordinal	Debe haber ausencia de oxígeno en la entrada y salida del extrusor, al ponerse un flujo de Argón.
Uniformidad de la muestra	Cualitativa	Ordinal	La mezcla entre los dopantes y el PVT debe ser lo más homogénea posible.
Limpieza del equipo:			
Presencia o ausencia de otros materiales en el equipo utilizado que puedan contaminar la muestra.	Cualitativa	Ordinal	Se espera que el equipo esté completamente limpio y libre de contaminantes.
Uniformidad de la superficie del centelleador:			
Presencia de imperfecciones (grietas, zonas opacas, entre otras) en la superficie del centelleador que puedan afectar su captación o emisión de luz.	Cualitativa	Ordinal	La superficie resultante del centelleador debe ser uniforme y lisa, a lograrse en la fase de pulido.
Tiempo (t, min, horas):			
Periodo en el cual la reacción o la muestra se mantienen en un mismo estado.	Cuantitativa	De razón	Se definirá con la empresa a trabajar

Cuadro 46: Variables definidas para la producción del centelleador por método de extrusión, segunda parte.

PMI y las buenas prácticas de gestión de proyectos en LAGO

Las actividades que se realizaron dentro del megaproyecto fueron variadas. Se involucraron nueve personas, con diferentes conocimientos y habilidades, que desempeñaron cada uno de las tareas que se les asignaron, dentro del período establecido para la ejecución del proyecto. En este capítulo se describen las metodologías y herramientas utilizadas para la documentación del proyecto. El uso e implementación de la teoría y buenas prácticas de gestión de proyectos establecidas por el Project Management Institute (PMI) contribuyó a la correcta ejecución del Megaproyecto LAGO, y facilitará la continuidad de este a futuro.

22.1. PMI: Project Management Institute

El Project Management Institute (PMI), una institución sin fines de lucro, fue fundado en 1969 con el objetivo de promover y apoyar la profesión de gestión de proyectos. El PMI ha llegado a más de 170 países, y cuenta con alrededor de 500,000 miembros certificados en todo el mundo. Esta organización es altamente reconocida por sus estándares de gestión de proyectos y los aportes teóricos-académicos que ha desarrollado para esta rama. Sus colaboradores han participado activamente en la mejora de los programas de gestión de proyectos dentro de múltiples empresas.

El PMI ha creado recursos y herramientas para guiar a todas aquellas personas o instituciones que están interesadas en especializarse dentro de esta rama o buscan desarrollar proyectos. Esto con la finalidad de desarrollar la práctica, ciencia y profesión de la gestión de proyectos en el mundo, de una forma estandarizada. Su visión es que las organizaciones reconozcan, valoren y utilicen las buenas prácticas que el PMI ha estudiado y probado.

22.2. Definición de proyecto

Según el PMI, un proyecto es un esfuerzo temporal, que involucra una o varias personas, o una o varias organizaciones, que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único. El resultado del proyecto puede ser tangible o intangible. Aunque puede existir elementos repetitivos en algunos entregables y actividades entre proyectos, estas similitudes no afectan las características fundamentales del proyecto, y tanto los paquetes de trabajo o actividades siempre llegarán a diferir hasta cierto punto; no existen dos proyectos exactamente iguales. Por ello, se encontrará incertidumbre o diferencias entre los productos, servicios o resultados que cada proyecto genera [125].

A pesar de que dos proyectos no pueden ser exactamente igual, el PMI reconoce que todos los proyectos, sin excepción alguna, poseen tres características intrínsecas:

- Son temporales, pues tienen un inicio y un fin.
- Crean resultados únicos
- Su elaboración es gradual

Es importante mencionar que el final de todo proyecto es alcanzado cuando se cumple con los objetivos del mismo, finaliza porque sus objetivos no se cumplirán o no pueden ser cumplidos, o cuando ya no existe la necesidad que dio origen al inicio del proyecto. No obstante, que sea temporal no connota que la duración del proyecto deba ser corta; la temporalidad hace referencia a los compromisos del proyecto y a su longevidad. Dentro de esta idea tiempo, es necesario describir los ciclos de vida en proyectos para definir y entender el “inicio y fin” de los mismos [125].

22.3. Ciclo de vida en proyectos

Todas las fases que se integran y desarrollan dentro de un proyecto comprenden y definen el ciclo de vida de este. Mientras que cada proyecto tiene un inicio y un final definidos, los entregables específicos y las actividades que se llevan a cabo varían ampliamente dependiendo del proyecto. Es por ello que es importante definir el ciclo de vida de un proyecto, pues este proporciona el marco de referencia necesario para dirigir el proyecto, sin importar el trabajo específico involucrado. Además, se hace más sencillo secuenciar las actividades y programar el proyecto para su correcta y ordenada ejecución. importante aclarar que, sin importar el tipo del proyecto, el PMI reconoce que todos estos esfuerzos temporales deben atravesar etapas: inicio, planificación, ejecución, seguimiento y control, y cierre del proyecto [125].

Las actividades y tareas se pueden agrupar en fases según los objetivos funcionales, resultados intermedios, hitos, o disponibilidad de recursos. El número de fases se relaciona directamente con el grado de control que se busca alcanzar en el proyecto y la complejidad e impacto de este. Según los intereses o necesidades del proyecto las fases pueden tener relaciones secuenciales o superpuestas, o puede requerirse una única fase. Se debe aclarar que los tipos de relaciones entre las fases no son mutuamente excluyentes; los proyectos pueden

tener tantas relaciones de fases secuenciales y superpuestas. Las imágenes a continuación servirán de apoyo para aclarar esta idea.

Luego de determinar las relaciones entre las fases, es imperativo determinar el tipo de ciclo de vida del proyecto a trabajar. En la quinta edición del PMBOK se reconocen tres tipos: ciclo predictivo, adaptativo e iterativo.

Por la naturaleza del proyecto, se concluyó que la nueva etapa de LAGO tuvo 3 fases; culminadas las fases, el proyecto se consideró terminado:

- Fase 'Diseño': diseño del sistema
- Fase 'M&T': montaje y traslado del sistema
- Fase 'Implementación': pruebas de los módulos integrados

Con base en las fases, se determinó que existieron relaciones de fases superpuestas y secuenciales. Adicional, se concluyó que el proyecto tuvo un enfoque predictivo. Por tanto, se estableció que los resultados eran conocidos, y que el alcance fue definido con claridad. El tiempo del proyecto puede predecirse, disponiendo de 1 año de trabajo. El ciclo de vida del proyecto fue en cascada, dada la cronología de hitos.

22.4. Áreas de conocimiento de la dirección de proyectos

Para facilitar la gestión de proyectos y fomentar las buenas prácticas dentro de esta metodología, el PMI agrupa todas las actividades de gestión y dirección dentro de áreas de conocimientos. De esta cuenta, un área de conocimiento es un conjunto completo de conceptos, términos y actividades que comprenden un marco referencial (guía) dentro de la gestión del proyecto. A lo largo del marco teórico se explicará cómo cada área de conocimiento se integra a los grupos de procesos de la dirección de proyectos [125].

El PMI lista diez áreas de conocimiento diferenciadas que, entre sí, agrupan 47 actividades de gestión y dirección que el administrador del proyecto puede utilizar, según las necesidades y características del mismo. Las áreas de conocimiento son: integración, alcance, tiempo, costo, calidad, recursos humanos, comunicaciones, riesgos, adquisiciones e interesados. Dentro del megaproyecto LAGO se implementaron todas las áreas de conocimiento.

22.4.1. Gestión de la integración del proyecto

Como se puede inferir en el nombre del área de conocimiento, la integración del proyecto agrupa los procesos y actividades necesarios para identificar, definir, combinar, unificar y coordinar las diferentes tareas a realizar dentro de los grupos de procesos de la gestión de proyectos. En esta área se incluyen las características que buscan que la gestión del proyecto sea controlada, para cumplir con el alcance del proyecto, sin obviar los requerimientos de este y de los interesados. El PMI describe las siguientes actividades como parte de la integración del proyecto [125]:

- Project Charter
- Desarrollo del plan para la dirección del proyecto
- Dirección y gestión del trabajo del proyecto
- Monitoreo y control del trabajo del Proyecto
- Desarrollo del control integrado de cambios
- Cierre del proyecto

Project charter

Dentro de este proceso se desarrolló un documento que autorizó formalmente la existencia del proyecto y confirió al director de proyecto, y a los interesados, un resumen sobre los recursos y actividades que se requirieron para el proyecto y cómo se asignaron. Adicionalmente, dentro del documento, se incluyeron los requerimientos más importantes del proyecto, los riesgos, tiempos, costos y el alcance del proyecto. Por ello, el project charter fue vital, ya que todos los procesos restantes lo utilizaron de base [125].

Plan de dirección

En esta área, se registró toda la documentación que detalla la forma en que se ejecutó el proyecto, se monitoreó, controló y finalizó. Aquí se definieron todos los planes para gestionar cada una de las áreas de conocimiento del proyecto.

Dirección y gestión del trabajo

La dirección del proyecto estuvo a cargo de Luis Mijangos, el asesor del proyecto, mientras que la gestión de la documentación la llevó a cabo el estudiante de Ingeniería en Ciencia de la Administración. El rol de estas personas fue direccionar, supervisar y validar el desarrollo todos los entregables requeridos para cumplir con el alcance del proyecto, bajo las necesidades del Departamento de Física.

Monitoreo y control del trabajo

La idea principal dentro de esta área de conocimiento es realizar mediciones; no se puede mejorar aquello que no se puede medir. Por ello, se recopiló, medió y distribuyó toda la información relativa al desempeño, y evaluación de las mediciones y las tendencias que permitieron mejoras en los procesos de gestión.

Control integrado de cambios

Fundamentalmente, el control integrado de cambios da seguimiento y analiza todas las solicitudes de cambios, las aprueba y vela por su correcta gestión. Dentro de la dirección de proyectos, los cambios pueden ser solicitados para los entregables del proyecto, el plan de dirección y los registros (documentación) del mismo. Dentro del megaproyecto LAGO se registraron dos cambios. Ambos se atendieron bajo el procedimiento establecido. Ningún cambio afectó el alcance del proyecto.

ID	Riesgo	Descripción	Causa
CMB-01	Ubicación y base de la antena	Se solicita cambiar la ubicación de la antena dentro de la reserva "El Quetzal". Por ende, se deberá desmontar y adecuar en otra posición con otra base.	El día 28 de abril se instaló la antena en el techo de la casa de la reserva "El Quetzal". Sin embargo, no se logró establecer el enlace con la antena de Campus Sur, pues había árboles de por medio. Estos interfieren con la conexión, y la inhiben.
CMB-02	Panel eléctrico	Se deberá diseñar e implementar otro panel eléctrico (componente de control del sistema de radiación Cherenkov)	La instalación del panel eléctrico se complicó más de lo esperado. El regulador de voltaje destinado para la cámara de seguridad se quemó. Adicionalmente, Luis Mijangos no aprobó la presentación y diseño de la circuitería.

Figura 204: Cambios registrados en el proyecto.

Cierre del proyecto

El cierre del proyecto implica la finalización de todas las actividades, y, si todo sale bien, indica formalmente que el proyecto fue completado. Dentro de esta área se sugiere presentar los resultados del proyecto a todos los interesados, y se hace entrega oficial del diario de lecciones aprendidas. Este portafolio es el conjunto de toda la documentación y registros realizados a lo largo del proyecto, y las recomendaciones y sugerencias para futuros proyectos por parte del administrador y los interesados. Este proceso asegura la transferencia de la información a terceros [125]. El proyecto se concluyó el 29 de noviembre de 2018, y se presentó el 10 de diciembre, del mismo año, a los interesados del proyecto.

22.4.2. Gestión del alcance del proyecto

Para describir esta área de conocimiento, es importante aclarar la definición de alcance dentro de la gestión de proyectos. El PMI reconoce los conceptos de alcance, alcance del producto y alcance de proyecto. El primer término hace referencia a la suma de productos, servicios y resultados que el proyecto debe proporcionar. En contraste, el alcance del producto describe los rasgos y funciones que van a caracterizar el producto, servicio o

resultado. Por último, el alcance del proyecto contiene todo el trabajo por realizar para entregar un producto, servicio o resultado bajo las especificaciones (requerimientos) deseadas. Consecuentemente, la gestión del alcance del proyecto incluye los procesos necesarios para completar el proyecto con éxito; se garantiza la realización de todas las actividades y tareas para cumplir con el alcance proyecto. El PMI describe las siguientes actividades como parte del área del alcance [125]:

- Recopilación de requisitos
- Definición del alcance
- Creación de EDT
- Validación del alcance
- Control del alcance

Requisitos o requerimientos

Esta área de conocimiento brinda al administrador del proyecto una pauta de lo que los interesados buscan en el resultado final, y aquello que no está permitido, o debe ser evitado, durante la realización del proyecto. Dentro de este proceso se documentó cada uno de los requerimientos de los interesados del proyecto, mismos que fueron necesarios para cumplir con el alcance y los objetivos planteados. A continuación, se listan las herramientas a utilizadas para el estudio de los requisitos:

- Entrevistas a interesados
- Revisión del libro de lecciones aprendidas de LAGO
- Reuniones para discutir el diseño y las actividades necesarias para construir el sistema de detección

A partir de la información documentada, se construyó una matriz de trazabilidad, misma que lista los requerimientos y describe los puntos más relevantes de estos. En total, se encontraron 13 requerimientos.

Definición del alcance

Puntualmente, la definición del alcance es una descripción más precisa de lo que inicialmente se colocó en el project charter, pues describe detalladamente del proyecto y del producto. De esta forma, se delimita el proyecto, nuevamente, considerando los requisitos que fueron recopilados previamente. Por tanto, el alcance que se definió para el proyecto fue el siguiente:

El presente proyecto deberá gestionar el traslado, montaje e implementación de un detector de radiación Cherenkov en la reserva 'El Quetzal', ubicado en las faldas del volcán

Atilán. Generalmente, los sistemas de detección que se utilizan en el programa LAGO usan el agua como medio dieléctrico para la captura de datos. El sistema deberá ser capaz de contener 600 L de agua, misma que debe cumplir con ciertas características químicas relacionadas con su turbidez, conductividad y nivel de pH. Además, las paredes internas del tanque deberán estar recubiertas para asegurar que no entre luz del exterior. Dentro del sistema, será necesario colocar un tubo fotomultiplicador (PMT), mismo que permite la lectura de muones. Para su funcionalidad remota y autónoma, el detector implementará una Nexys2, una Raspberry pi y un enlace punto a punto por medio de dos Radio AirGrid. Por lo mismo, uno de los radios se colocará en UVG Campus Sur; por medio del enlace punto a punto, los datos llegarán al Campus Sur, para luego ser enviados a través de un punto de red al Campus Central. Es importante mencionar que todo el sistema en el volcán se alimenta energéticamente con paneles solares, baterías recargables y una red de distribución de potencia. Dentro del marco de implementación, se deberán de realizar pruebas de funcionamiento de cada uno de los módulos del sistema de forma individual e integral. No se debe olvidar que se espera la continuidad en el proyecto, y es fundamental documentar la gestión del proyecto, así como las características más importantes del tanque y cómo ejecutar un proyecto similar en otros países.

El cumplimiento del alcance será progresivo, y se desarrollará a través de cinco entregables. El primer entregable, la dirección de proyectos busca gestionar y generar toda la documentación del desarrollo del proyecto, con el propósito de facilitar la continuidad de LAGO en Guatemala y a nivel internacional. Por su parte, el diseño del sistema contempla la creación de prototipos, pruebas y análisis de funcionamiento de cada uno de los módulos del sistema de detección de radiación. En cuanto los entregables de montaje y traslado del sistema contienen actividades complementarias a la ejecución del proyecto. Dentro de estas, se espera recaudar fondos, obtener los permisos necesarios para trabajar, comprar el equipo y materiales, trasladarlos a la reserva y ubicar las partes del detector en la reserva 'El Quetzal'. Por último, la implementación del sistema es el entregable que garantiza y respalda el detector listo para su calibración.

Estructura de desglose de trabajo (EDT)

Luego de la definición del alcance y del acta constitutiva, el EDT fue uno de los registros más importantes del proyecto, pues proveyó una visión estructurada de lo que se trabajó y entregó. La estructura de desglose de trabajo subdivide los entregables del proyecto en paquetes de trabajo (agrupaciones de actividades o tareas), organizando el alcance del proyecto. En otras palabras, el EDT es una descomposición jerárquica del trabajo a realizar para cumplir con los objetivos y, evidentemente, crear los entregables definidos (PMI, 2013). Adicionalmente, se incluyó una descripción general, de las actividades a realizadas dentro de cada paquete de trabajo (diccionario del EDT).

Validación del alcance

La validación del alcance implica la aceptación formal de los entregables por parte de los interesados del proyecto, según se hayan completado. Este proceso está relacionado con el control de la calidad [125].

Control del alcance

La utilidad de este proceso radica en que permite monitorear el estado del alcance del proyecto y del resultado. Luego de la culminación de cada entregable, se recibió retroalimentación de Luis Mijangos y Zaidy Urrutia para formalizar la entrega y aceptación de cada uno. Fue importante realizar este procedimiento de la mano de la matriz de trazabilidad y de la línea base del alcance. Este procedimiento estuvo implícito en la aceptación formal de todo el megaproyecto, durante la gestión del cierre.

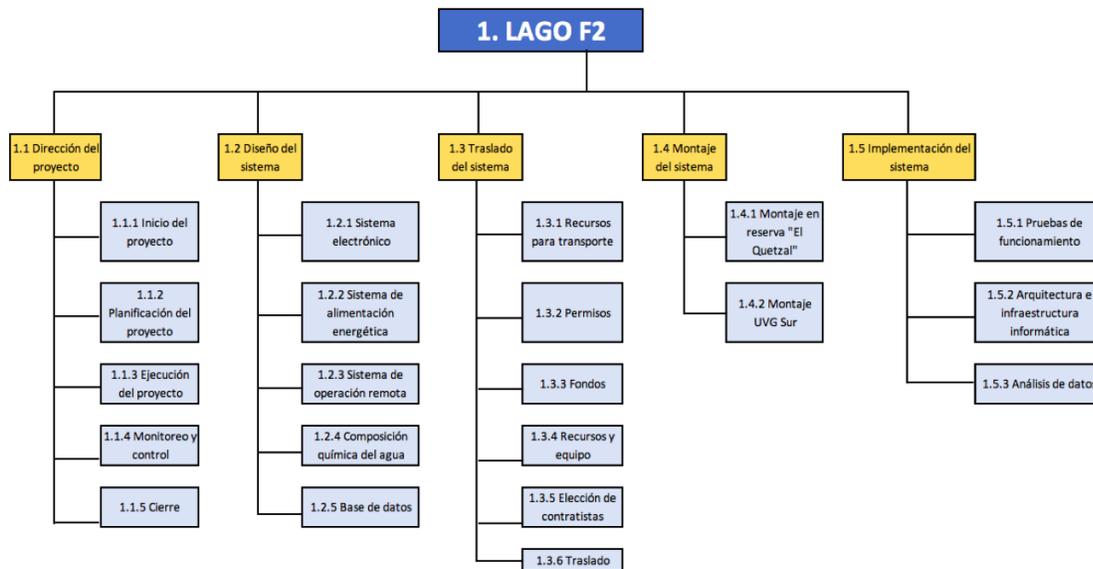


Figura 205: Estructura de desglose de trabajo del proyecto.

22.4.3. Gestión del tiempo del proyecto

La gestión del tiempo contempla la realización de las actividades, tareas y procesos dentro de los plazos de tiempo establecidos para las fases y el proyecto. El tiempo, siendo una de las variables de mayor revelación dentro de la gestión de proyectos, tiene relación directa con el presupuesto, costo y nivel de satisfacción de los interesados. La documentación de esta área de conocimiento varía según la complejidad del proyecto. No obstante, el PMI describe las siguientes actividades como parte del área del tiempo [125]:

- Planificación de la gestión del cronograma
- Definición de actividades
- Secuenciación de actividades
- Estimación de recursos de actividades
- Estimación de duración de las actividades
- Desarrollo del cronograma

- Control del cronograma

Plan de manejo del cronograma

El plan de gestión del cronograma es parte del plan de dirección del proyecto, y se centró en establecer la documentación necesaria para planificar, desarrollar, gestionar, ejecutar y controlar el cronograma del proyecto, es decir, el tiempo de gestión del proyecto.

Definición de actividades

Dentro de este proceso se buscó definir cada una de las actividades de los paquetes de trabajo para crear y desarrollar los entregables. Por ello, se utilizó el EDT, el alcance y el juicio técnico de los miembros del proyecto. El propósito fue obtener la lista de actividades a realizarse y los encargados de su gestión. Dentro del proyecto, se realizaron más de 90 actividades.

Secuenciación de actividades

Dentro de la secuenciación de la actividades se desarrolló un diagrama de red. Para ello, se consideró la lista de actividades definidas, el plan de dirección del proyecto y el juicio técnico de los miembros del equipo.

Estimación de recursos

Con base en la documentación de LAGO, lista de actividades, el criterio de los miembros del equipo y el trabajo que se desarrollaron según su módulo de megaproyecto, se establecieron los materiales, equipo y recurso humano necesario para completar cada actividad. El fin de este proceso fue listar los requerimientos en recursos por actividad.

Estimación de plazos

Para la estimación de la duración de actividades se realizaron reuniones para discutir y argumentar los tiempos de ejecución. Teniendo en cuenta la noción de la ruta crítica del proyecto, y la fecha de presentación de megaproyecto, se distribuyó el trabajo de manera que existiera una colaboración activa de todos los miembros del grupo. Adicionalmente, se utilizó como referencia el calendario de actividades del pasado trabajo de graduación de los miembros de LAGO UVG, y sus recomendaciones y consejos para el cálculo del tiempo utilizando la estimación por tres valores: optimista, esperado y pesimista (PERT). El tiempo que se estimó para la realización del proyecto fue de 280 días.

Cronograma

Con base en la secuenciación de actividades, la estimación de duración de estas y el EDT, se construyó el cronograma de actividades. Bajo las facilidades dadas por MS Project 2016, se pudo generar un archivo que resume toda la información desarrollada en la gestión del tiempo. De esta forma se obtuvo un diagrama de hitos, un esquema de Gantt y el diagrama de red.

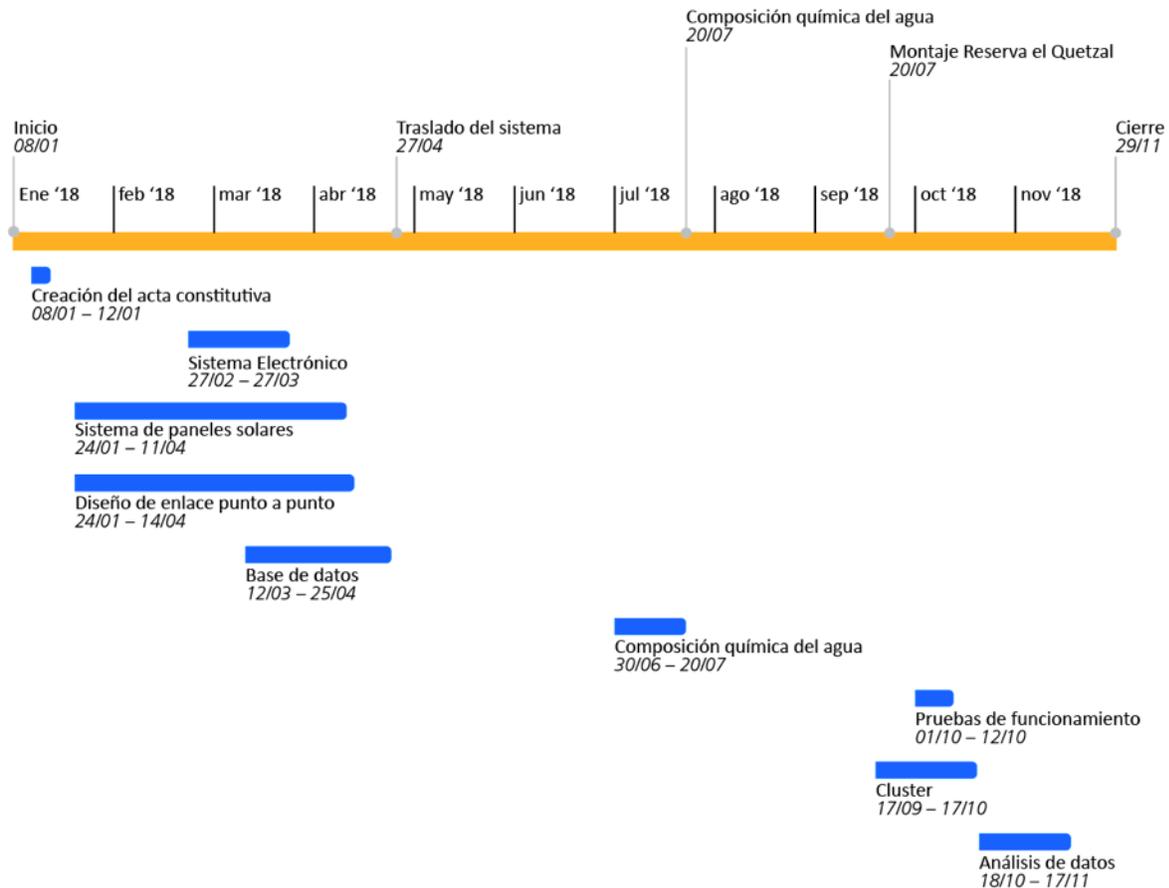


Figura 206: Diagrama de hitos del proyecto.

Control del cronograma

Dentro del control del cronograma se espera llevar un seguimiento apropiado del tiempo y su implementación durante la gestión y ejecución del proyecto. Además, indica los avances en cuanto a la realización de las actividades, y estudia los factores que tiene una incidencia directa en los adelantos y retrasos. Para poder llevar un verdadero control, es necesario poder medir el desempeño del proyecto. Por tal razón, se utilizó el índice de rendimiento del tiempo, para controlar el cronograma de LAGO. Al cerrar el proyecto, se obtuvo un índice de 1.00.

- Valor Planeado (PV): costo presupuestado del trabajo programado que se completara

en una actividad a un determinado punto en el tiempo.

- Valor Ganado (EV): costo del trabajo realizado de las actividades del cronograma durante un periodo dado.
- Variación del Cronograma: $SV = EV - PV$
- Porcentaje de Variación del Cronograma: $SV = SV/PV$
- Índice de Desempeño del Cronograma: $SPI = EV/PV$, donde, si $SPI=1$ el proyecto está en tiempo; si $SPI > 1$ está adelantado; si $SPI < 1$ está atrasado.

22.4.4. Gestión de los costos del proyecto

Dentro del área de conocimiento de los costos se busca planificar, estimar, presupuestar, financiar, obtener financiamiento, gestionar y controlar los costos para completar el proyecto dentro del presupuesto aprobado. En otras palabras, la gestión de los costos se ocupa principalmente del costo de los recursos necesarios para completar las actividades, y mide el efecto de las decisiones tomadas dentro proyecto sobre los costos y de los cambios solicitados. Es importante recordar que este tema es de gran interés para los interesados, por lo que es imperativo considerar los requisitos recopilados al momento de trabajar esta área de conocimiento. El PMI describe las siguientes actividades como parte de la gestión de los costos [125]:

- Planificación de la gestión de los costos
- Estimación de costos
- Determinación del presupuesto
- Control de los costos

Plan de gestión de costos

En el plan de gestión de los costos se incluyeron las políticas, procedimientos y documentación necesaria para ejecutar el gasto y llevar un control de los costos. Con estos registros se facilitó la dirección sobre la gestión de los fondos del proyecto [125].

Estimación de costos

Para estimar los costos del proyecto se utilizó como respaldo la documentación brindada por el antiguo equipo de LAGO. Además, se realizaron diferentes cotizaciones en línea para la adquisición de componentes electrónicos y otros equipos. Para la elección de contratistas se evaluaron diferentes opciones versus nuestra capacidad de pago. Todos los costos fueron cubiertos por medio de las ganancias de las ventas de comida en la UVG, quinielas deportivas y donaciones monetarias para el proyecto.

Presupuesto

Teóricamente, la suma total de todos los costos de un proyecto es igual al presupuesto [125]. Para el proyecto de LAGO, se encontró que el presupuesto total del proyecto ascendió a Q 29,783.56. A partir de este resultado, y con base en un análisis de costos del producto, se creó una reserva de contingencia no mayor al 8 por ciento (Q2,400.00) del presupuesto total (asumiendo que el proyecto no debería de tener que cubrir cambios mayores a los materiales indirectos del detector).

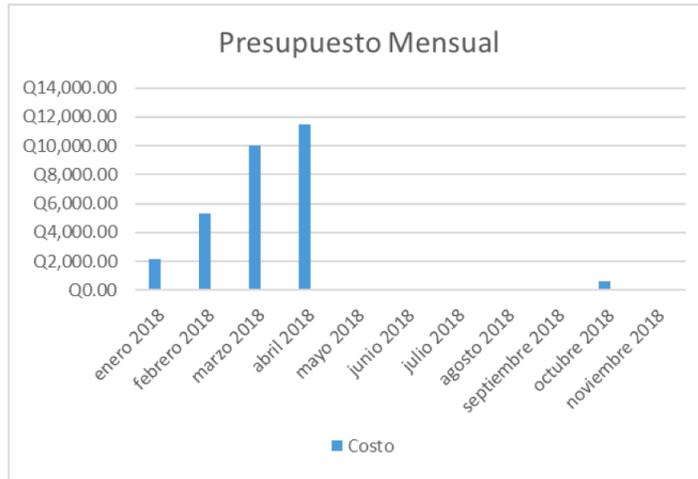


Figura 207: Proyección mensual del presupuesto.

Control de costos

Dentro del control de los costos se llevó un seguimiento apropiado de la utilidad del presupuesto y la ejecución del gasto durante la gestión del proyecto. Para poder llevar un verdadero control, fue necesario medir el desempeño del proyecto. Al cierre del proyecto, se obtuvo un índice de rendimiento de los costos de 1.41.

- Valor Planeado (PV): presupuesto autorizado que se ha asignado al trabajo programado.
- Valor Ganado (EV): medida del trabajo realizado en términos de presupuesto autorizado para dicho trabajo.
- Costo Actual (AC): costo incurrido por el trabajo llevado a cabo en una actividad durante un período de tiempo específico.
- Variación del Costo: $(CV)=(EV-AC)$, donde, si $CV<0$ el proyecto está gastando por arriba del presupuesto; $CV>0$ está gastando por debajo del presupuesto.

22.4.5. Gestión de la calidad del proyecto

Dentro del área de conocimiento de la calidad se busca la calidad tanto de la gestión del proyecto como la de sus entregables. Es por ello que en este proceso se incluyen todas las actividades y procedimientos que establecen las políticas de calidad, los objetivos y las responsabilidades de calidad, y lograr que el proyecto satisfaga las necesidades que dieron paso a su origen. La gestión de la calidad también se trabaja para asegurar que se alcancen y se validen todos los requisitos establecidos para del proyecto, incluidos los del resultado final. El PMI describe las siguientes actividades como parte de la gestión de la calidad [125]:

- Planificar la gestión de la calidad

- Realizar el aseguramiento de calidad

- Control de calidad

Plan de gestión de la calidad

Como se ha visto en otras áreas, el este plan tiene como fin identificar los requisitos y/o estándares de calidad para el proyecto y sus entregables. Por ello, se definió el tipo de documentación que respaldó el cumplimiento de estos. Cabe mencionar que, a pesar de que la sustitución de la Nexys 2 por la Red Pitaya no se operó dentro del proyecto, se utilizaron los principios teóricos de esta área de conocimiento para velar por la calidad de este procedimiento. Por tanto, dentro de esta sección, se describió la gestión de la calidad para el detector de la reserva 'El Quetzal' y el de la Universidad del Valle de Guatemala.

Aseguramiento de la calidad

El aseguramiento de la calidad es el proceso de auditoría interna utilizado para validar con el cumplimiento de los requisitos de calidad y los resultados obtenidos a partir de las medidas de control de calidad. Este proceso ayudó a minimizar la probabilidad de rechazo del resultado final por parte de los interesados, y mitiga los riesgos operativos del proyecto. El PMI sugiere diversas herramientas para el aseguramiento de la calidad; para el detector de la reserva 'El Quetzal' se implementó un diagrama de flujo y cuadros de control. Por otro lado, para el detector de la universidad, adicionalmente, se utilizó un diagrama de Ishikawa.

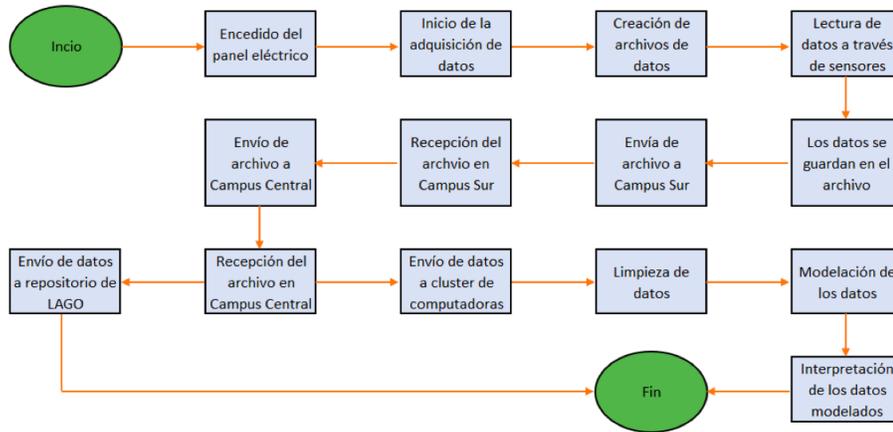


Figura 208: Diagrama de flujo de funcionamiento del detector de la reserva 'El Quetzal'.

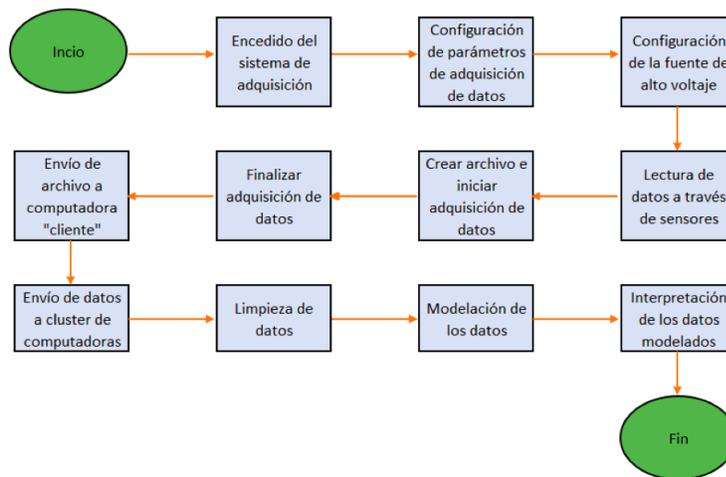


Figura 209: Diagrama de flujo de funcionamiento del detector en la universidad.

Cuadro de Control: LAGO F2 - Reg #			
Módulo:	Encargado:		
Área:			
Diseño del módulo			
<i>Para que su módulo cubra las necesidades del sistema de radiación, necesita de ciertos materiales. Dentro de la etapa de diseño, ¿usted utilizó las siguientes recursos?</i>			
Recurso	Sí	No	Comentarios
Funcionamiento del módulo			
<i>Antes, durante y después de la instalación, su módulo debe validarse a través de diferentes métricas. Dentro del funcionamiento, ¿su sistema cumple con los siguientes requisitos de rendimiento y/o desempeño?</i>			
Métrica de validación de funcionamiento	Sí	No	Comentarios

Figura 210: Plantilla de hojas de control.

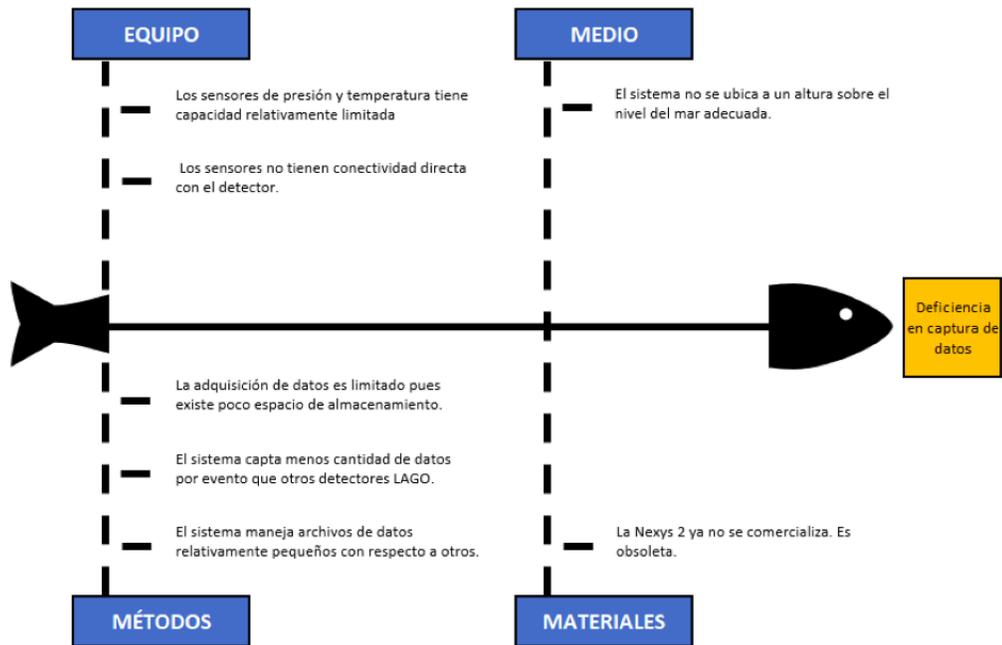


Figura 211: Diagrama de Ishikawa del detector de la universidad.

Control de la calidad

Con base en el plan de gestión de la calidad, el control de la calidad se utilizó para monitorear y registrar los resultados de la ejecución de las actividades de calidad, buscar puntos de mejora y evaluar rendimiento. Se implementó un cuadro de control y verificación.

22.4.6. Gestión de los recursos humanos del proyecto

Dentro de la gestión de los recursos humanos se prevén, e incluyen, todas las actividades correspondientes a la organización y gestión del equipo del proyecto, que lo conducen al logro de los objetivos y el alcance. Para esta área, es importante considerar nuevamente el listado de interesados, pues para esa tarea se describieron los miembros del proyecto y sus roles. Es importante mencionar que esta área de conocimiento también se refiere al manejo de los recursos humanos que se irán adhirieron en tareas puntuales del proyecto o para la realización de ciertas actividades. El PMI describe los siguientes procesos como parte de la gestión del recurso humano [125]:

- Planificación de la gestión de recursos humanos
- Adquisición del equipo del proyecto
- Desarrollo del equipo del proyecto

Plan de gestión del recurso humano

Esta actividad complementa el plan de dirección del proyecto. Dentro de este plan se buscó identificar y documentar el papel de cada integrante del equipo de trabajo. Además, se definieron las responsabilidades y el perfil de cada miembro del proyecto. Fue necesario desarrollar las relaciones de comunicación y la gestión del personal dentro de este plan [125].

Adquisición del equipo

Con base en el plan de gestión del recurso humano, el proceso de confirmar la disponibilidad de los recursos se llevó a cabo en la adquisición del equipo. También se integró el equipo necesario para completar con las actividades del proyecto. En otras palabras, se buscó la capacidad y/o experiencia requeridas por las tareas.

Figura 212: Técnicos externos al equipo ejecutor de LAGO.

Desarrollo del equipo

Dentro de la metodología de trabajo, se promovió la colaboración activa de cada uno de los miembros en los diferentes módulos que dieron vida al megaproyecto. La intención fue que todos los participantes tuvieran un conocimiento integral del desarrollo del megaproyecto y supieran su rol dentro de la construcción del detector de radiación Cherenkov. Además, fue importante que todos los módulos se integraran de la forma correcta para dar lugar al alcance del proyecto.

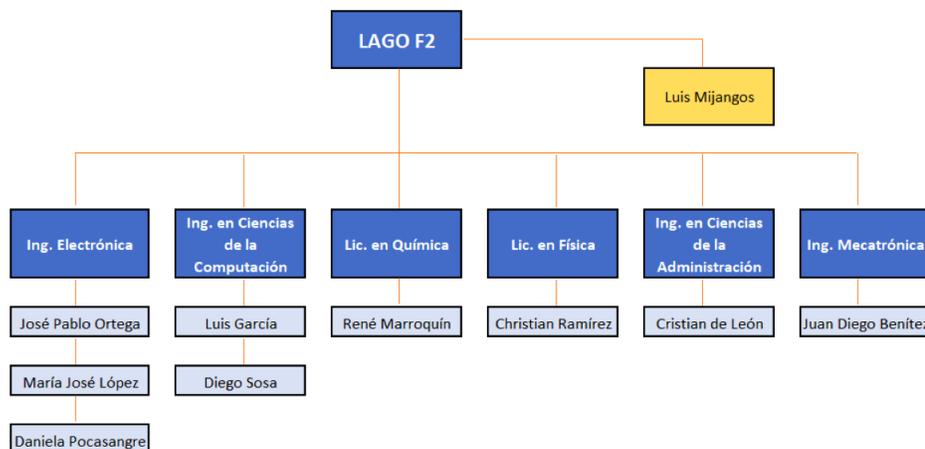


Figura 213: Organigrama de los ejecutores del proyecto.

22.4.7. Gestión de las comunicaciones del proyecto

Para la gestión de las comunicaciones se espera planificar, gestionar, crear y monitorear los canales de intercambio y flujo de información entre los miembros del equipo, los interesa-

dos, los patrocinadores y el administrador del proyecto. Una comunicación eficaz facilita la ejecución del proyecto y promueve la correcta sincronización para la gestión del cronograma [125]. El PMI describe los siguientes procesos como parte de la gestión de la comunicación [125]:

- Planificación de la gestión de comunicaciones
- Gestionar las comunicaciones
- Controlar las comunicaciones

Planificación de la gestión de la comunicación

La planificación de esta área de conocimiento construyó un enfoque y guía de ejecución adecuados para la gestión de la comunicación del proyecto, con base en las necesidades y requisitos de información por parte de los interesados del proyecto [125]. Planificar las comunicaciones del proyecto fue importante para lograr el éxito final del mismo.

Gestión de la comunicación

Para facilitar la comunicación entre los miembros del grupo, se propuso realizar una reunión semanal para todo el año 2018. La intención de estas era coordinar esfuerzos y velar por la correcta integración de los distintos módulos del megaproyecto. Adicionalmente, se utilizaron para completar con la documentación del trabajo realizado durante todo el ciclo de vida del proyecto. Por su parte, Luis Mijangos tuvo comunicación directa con la directora del Departamento de Física y el decano de la Facultad de Ciencias y Humanidades. Además, incluido Luis, algunos miembros del equipo contaron con canales de comunicación activos para informar y recibir retroalimentación de la red de colaboradores de LAGO. Al final de todo el proceso, fue importante recordar que la integración trasciende a un marco internacional. Como herramienta de apoyo, se contó con una página en redes sociales (Facebook) para mantener informados a quienes se interesaron por el trabajo a realizado, documentando así públicamente los avances.

Control de la comunicación

Durante la ejecución y gestión del proyecto se hizo importante monitorear y controlar la comunicación [125]. El propósito fue garantizar el cumplimiento de las necesidades de información de los interesados del proyecto; los canales y flujos de información siempre permanecieron activos.

22.4.8. Gestión de los riesgos del proyecto

Según el PMI, los riesgos son eventos inciertos que, si ocurren, tienen un efecto positivo o negativo en uno o más objetivos del proyecto. Por ello, en la gestión de los riesgos del

proyecto se desarrollaron todos los procesos necesarios para aumentar la probabilidad de ocurrencia de los eventos positivos y su impacto, y disminuir la probabilidad e impacto de eventos negativos, dentro del proyecto.

Dentro de la gestión y ejecución del proyecto, los riesgos pueden ser mitigados, transferidos, evitados o aceptados. En primera instancia, todos los riesgos negativos deben evitar. No obstante, cuando no se pueden obviar, se habla de mitigar el riesgo, y consiste en que los miembros del equipo realicen diversas acciones que minimicen el efecto e impacto de este. Por otro lado, el riesgo puede ser transferido al contratar seguros o lograr que su efecto se propague fuera del proyecto. Por último, si el riesgo no se puede evitar, mitigar o transferir, este deberá ser aceptado. Es en este punto donde cobra sentido la reserva establecida en la gestión del costo.

El PMI describe los siguientes procesos como parte de la gestión de la comunicación:

- Planificar la gestión de los riesgos
- Identificación de riesgos
- Análisis cualitativo de riesgos
- Planificar respuesta a riesgos
- Control de riesgos

Plan de gestión de riesgos

Para este proceso se definió cómo ejecutar las actividades de gestión de riesgos del proyecto. Fue de gran utilidad pues se visibilizaron los riesgos y el tipo de impacto que tendrían sobre el proyecto. Este documento provee información sobre la clasificación de riesgos, su definición, responsables, seguimiento, entre otros. Con respecto al tipo de riesgo, estos pueden ser técnicos, externos y organizacionales.

Identificación de riesgos

Con base en una matriz de probabilidad de los riesgos, se realizó una actualización al registro de riesgos, y se procedió a clasificar estos en orden de prioridad y urgencia. De esta forma se obtuvo una mejor noción de la manera en que se manejó el riesgo. Además, se estudió el riesgo total del proyecto previo al plan de respuesta.

Análisis cualitativo de riesgos

El objetivo de este proceso es priorizar riesgos para análisis o acción posterior, evaluando y combinando la probabilidad de ocurrencia e impacto de los mismos. Con ello, se pudo generar una categorización de los riesgos según los efectos que llegarían a tener en la realización del proyecto. La realización del análisis cualitativo es un medio rápido y económico

de establecer prioridades, y sienta las bases para establecer las respuestas hacia los riesgos y para realizar su análisis cuantitativo. Este estudio es totalmente subjetivo [125].

Planificar respuesta a riesgos

A partir de los procedimientos anteriores, se evaluaron los planes de mitigación, adaptación, transferencia y evasión para cada uno de los riesgos identificados. Con ayuda del equipo de LAGO, se evaluó el juicio de expertos y registros históricos sobre la ejecución de LAGO en otros países como referencia. Adicionalmente, fue necesario coordinar, con los miembros del megaproyecto, las acciones a realizar para estar todos al tanto de las formas de proceder.

Control de riesgos

Este proceso es complemento de la planificación de las respuestas, pues se espera que en el control de riesgos todas las acciones planificadas para atenderlos sean implementadas, se dé seguimiento de las respuestas y riesgos, se controle el impacto de estos y se evalúe la efectividad del proceso de gestión de riesgos a lo largo del ciclo de vida del proyecto. El proceso de controlar los riesgos también conlleva la ejecución de planes de contingencia o de reserva, la implementación de acciones correctivas y la modificación del plan para la dirección del proyecto, si fuera necesario [125].

22.4.9. Gestión de las adquisiciones del proyecto

Como su nombre lo sugiere, dentro de este proceso se gestionan y realizan las compras o adquisición de productos, servicios o materiales necesarios para la realización de las actividades, y cumplimiento de los entregables. El PMI describe los siguientes procesos como parte de la gestión de las adquisiciones [125]:

- Planificación de la gestión de adquisiciones
- Efectuar adquisiciones

Plan de gestión de las adquisiciones

Para gestionar las adquisiciones del megaproyecto se creó un procedimiento/política entre los miembros del equipo y los interesados inmediatos del proyecto. Todas las adquisiciones fueron evaluadas en mesas de diálogo para consensuar las compras y, por ende, los flujos de efectivo. La idea era apegarse a la planificación de los costos y del tiempo para ejecutar las adquisiciones. La finalidad de los diálogos dio paso a la elección de proveedores. Además, se estableció que era necesario definir las fechas de adquisición para acoplar la gestión de la compra con la ejecución de las tareas.

Realizar las adquisiciones

La realización de las adquisiciones implica la ejecución de la planificación descrita anteriormente. El objetivo principal es abastecer al equipo del proyecto de aquellos insumos o servicios que son necesarios para realización de las actividades del proyecto. Es preciso documentar toda compra o contratación que se haga con el fin de complementar la gestión de los costos [125].

22.4.10. Gestión de los interesados en el proyecto

La gestión de los interesados desarrolla todas las actividades necesarias para identificar a las personas, grupos u organizaciones que pueden afectar o ser afectados por el proyecto. Con esto, el administrador del proyecto y el equipo de trabajo pueden tener una idea más clara de las expectativas de los interesados y su impacto en el proyecto. Esta área de conocimiento se complementa con la gestión de las comunicaciones, puesto que se espera que la información fluya debidamente hacia y entre los interesados. Todo este proceso es clave, porque la satisfacción de los interesados es, implícitamente, el objetivo clave del proyecto [125]. Dentro de esta área de conocimiento, se trabajó el siguiente proceso:

- Identificación de los interesados

Identificar los interesados

Como su nombre lo indica, en este proceso se delimitó, definió e identificó a las personas, grupos u organizaciones que podrían afectar o ser afectados por el proyecto. Se buscó documentar el rol de cada interesado y la necesidad proveerle información fuera de su interés [125]. Para complementar el proceso, se puede realizar una matriz de interesados que refleja el 'peso' en el proyecto (el 'peso' es una medición subjetiva que resulta del interés y del poder del interesado con respecto al proyecto).

Entidad de cooperación	LAGO
Patrocinador	Zaida Urrutia, Departamento de Física, UVG
Gestor del proyecto	Cristian de León
Miembros del equipo de Megaproyecto Lago	<ul style="list-style-type: none">- Christian Ramírez, Licenciatura en Física- René Marroquín, Licenciatura en Química- María José López, Ingeniería Electrónica- José Pablo Ortega, Ingeniería Electrónica- Daniela Pocasangre, Ingeniería Electrónica- Juan Diego Benítez, Ingeniería Mecatrónica- Luis García, Ingeniería en Ciencias de la Computación- Diego Sosa, Ingeniería en Ciencias de la Computación- Luis Mijangos, Asesor del megaproyecto, Depto. Física
Proveedores	<ul style="list-style-type: none">- ICTP- Herreros- Hamamatsu- Green Energy
Beneficiarios	<ul style="list-style-type: none">- Comunidad UVG, Comunidad LAGO Guatemala
Otros	<ul style="list-style-type: none">- Gabriela Alfaro, Departamento de Biología, UVG- José Monzón, Departamento de Biología, UVG

Figura 214: Resumen de los interesados del proyecto.

23.1. Módulo de calibración, análisis e interpretación de datos

- Las filtraciones de luz fueron observadas y tapadas con capas de sticker de fibra de carbono y nylon dejando al detector de radiación Chérenkov libre de filtraciones de luz sin afectar su temperatura. Con el tiempo los materiales cobertores se dañarán y cada vez que se cambien se deben realizar nuevamente las pruebas de luz. Estas pruebas fueron de gran ya que se encontró una disminución del ruido, lo cual se comprobó comparando las mediciones antes y después de dichas pruebas.
- Se calibró el detector con el método del VEM filtrado via software con histogramas de cargas, se reporta el valor de $VEM = 4.7 * 10^2 \pm 0.2 * 10^2$ ADCq, este cálculo fue realizado con 312 h de recolección de datos. Este valor del VEM se usó para aproximar la energía dejada por un muon que entra verticalmente al tanque (i.e) $E_{VEM} = 228.0 \pm 0.5$ MeV. Con esto en trabajos futuros se podrían hacer histogramas de energía y gráficos de flujo de energía. El detector usa como sensor un tubo fotomultiplicador photonis.
- El diseño experimental para la caracterización del tubo fotomultiplicador hecho con la ayuda del módulo de control central se dejó propuesto con un generador de pulsos basado en una FPGA Genesys y con los valores ajustados para un PMT marca Hamamatsu R5912-20.

23.2. Módulo de fabricación de planchas centelleadoras de PVT

- Los centelleadores orgánicos como detectores de radiación cósmica presentan numerosas ventajas ante los detectores Chérenkov de agua, como la flexibilidad en el diseño y su tamaño relativamente compacto, además de la posibilidad de detectar la dirección de la cual proviene la partícula de excitación.

- A pesar de que aún no se tienen resultados concretos, esta investigación abre la posibilidad a que otras personas e instituciones en Guatemala puedan crear sus propios detectores de radiación cósmica, a un precio accesible, gracias al método de fabricación utilizado.

23.3. Módulo de potencia

- El sistema solar fotovoltaico instalado en la Reserva de la Universidad del Valle de Guatemala en las faldas del volcán Atitlán fue aislado debido a la falta de acceso a la red eléctrica. Este fue dimensionado rigurosamente y satisface las necesidades de consumo de la electrónica del detector de radiación cósmica.
- El sistema de alimentación cumple el consumo de potencia de cada una de las cargas permitiendo así el buen funcionamiento de las mismas y a su vez presenta una alta eficiencia debido a los convertidores DC/DC LM2596 utilizados para regular el voltaje individual de cada carga.
- El sistema de protección contra rayos implementado en la reserva "Refugio del Quetzal" diseñado bajo los requerimientos de la norma NFPA 780 cumple la funcionalidad de brindar protección al detector de radiación Cherenkov.
- El servidor FTP montado en la computadora Raspberry Pi captura los archivos enviados constantemente por la cámara y su implementación es adecuada debido a la fiabilidad de la conexión entre la cámara IP y la Raspberry Pi.

23.4. Módulo de transmisión de datos

- Los resultados muestran que sí fue posible diseñar e implementar un enlace de comunicación "punto a punto" entre la reserva biológica "Refugio Del Quetzal" y la Universidad del Valle de Guatemala (Campus Sur) utilizando equipos de red de bajo costo.
- La capacidad del enlace es suficiente para garantizar que no haya pérdida de datos en la transmisión del detector a la computadora en el campus sur de la Universidad del Valle de Guatemala.
- El desempeño de los equipos inalámbricos es adecuado para el requerimiento del proyecto.
- La configuración de los equipos resultó ser bastante sencilla con la interfaz gráfica incluida en los equipos de red de Ubiquiti Networks.

23.5. Módulo de control central

- El resultado principal de este módulo es el detector de radiación Cherenkov completamente funcional que permite variar los parámetros de detección a través de la implementación del paquete de adquisición de datos del Proyecto LAGO en la microcomputadora Raspberry Pi junto a la tarjeta de desarrollo Nexys 2.

- El control a distancia permite acceder de forma remota desde una computadora en el Campus Central a la Raspberry Pi ubicada en el volcán Atitlán a través del protocolo de comunicación SSH, con lo que se pueden variar los parámetros de detección e iniciar y detener la adquisición.
- La Raspberry Pi está configurada para iniciar la adquisición de datos y el envío de estos de forma automática al iniciar el sistema operativo, con el fin de garantizar un sistema de adquisición autónomo.
- Se implementó toda la instrumentación electrónica referente a la lectura de datos del detector (presión absoluta, temperatura y geolocalización) para satisfacer el estándar de los archivos de datos que solicita el Proyecto LAGO.
- Se implementó la instrumentación electrónica para el monitoreo del tanque a distancia, que incluye un sensor de humedad y temperatura, además de los sensores de corriente de todas las cargas alimentadas por la red de distribución eléctrica.
- El método experimental diseñado para la caracterización del PMT presenta las diferentes etapas de la topología a utilizar, además de diferentes implementaciones del generador de pulsos, junto con sus ventajas y desventajas.

23.6. Módulo de actualización de tecnología

- Se logró mejorar la resolución de los datos medidos con la nueva plataforma, incrementando de 8 muestras por pulso a 32 muestras, representando 3 veces más muestras que en la plataforma anterior.
- Se integró el sensor de presión y temperatura BMP180 directamente en la placa Red Pitaya sin necesidad de un dispositivo externo, lo que disminuyó la cantidad de dispositivos necesarios para la obtención de resultados del detector.
- Se logró generar el voltaje de alimentación del PMT, manejar el valor del trigger y la obtención de datos del sensor de temperatura BMP180 mediante la implementación de rutinas brindadas en la versión de lanzamiento de la comunidad LAGO para Red Pitaya® para el manejo del PMT.
- Se logró presentar los datos en el formato adecuado según la comunidad LAGO.
- En base al consumo energético del sistema anterior y del sistema implementado con Red Pitaya®, es posible implementar la nueva tecnología en el detector trasladado hacia las faldas del volcán Atitlán.

23.7. Módulo de análisis en *Big Data*

- Se analizaron los datos obtenidos con el detector de radiación Cherenkov utilizando algoritmos tradicionales y algoritmos funcionalmente distribuidos desarrollados en Spark, y se obtuvo un $VEM525 + -25$ ADCq con el método de Media Móvil Simple y $VEM475 + -25$ con el método de Savitzky-Golay. Media Móvil Simple obtiene un menor porcentaje de error.

- Al comparar el rendimiento de algoritmos tradicionales y distribuidos para el análisis de los datos se obtuvo que Spark es 7.5 veces más rápido que la implementación tradicional, aún utilizando Numpy.
- Se implementó un tablero analítico de acceso web con cada uno de los indicadores requeridos, cumpliendo los requisitos funcionales.

23.8. Módulo de infraestructura de datos

- La implementación de una arquitectura tipo cluster beneficio en los siguientes temas:
 - Un análisis de datos más rápido.
 - Un espacio de almacenamiento de 208 días de archivos crudos.
 - Económicamente, ya que todo el software es libre de distribución. Esto significa que el proyecto no tendrá que pagar por licenciamiento.
 - Una interfaz de gestión fácil de usar.
- Los servicios instalados en el cluster del megaproyecto LAGO se toman como una instalación básica y cubre por el momento las necesidades para el análisis de datos actual.
- El modelo de datos beneficio al megaproyecto LAGO en tener sus datos de una forma ordenada y estructurada.
- Por medio de la integración de datos se pudo obtener un histórico de resultados.
- En caso de cambio en el análisis de datos para datos no estructurados, el software provee servicios para poder interpretar estos sin necesidad de procesos de transformación en el origen.

23.9. Módulo de gestión de proyecto

- La implementación de las buenas prácticas para la gestión de proyectos propuestas por el PMI, en el PMBOK, contribuyó a la correcta ejecución de todas las fases del Megaproyecto. Por tanto, se logró trasladar e implementar un sistema de detección de radiación cósmica Cherenkov en la reserva “El Quetzal”, Suchitepéquez.
- La documentación y las metodologías desarrolladas dentro del proyecto permitieron la correcta administración del tiempo y de los costos. El índice promedio de rendimiento del tiempo y de los costos fue 1.00 y 1.41, respectivamente. Estos valores confirman que ambas áreas de conocimiento fueron gestionadas apropiadamente a lo largo del ciclo de vida del proyecto.
- Las herramientas utilizadas para el control de calidad del sistema de detección de radiación Cherenkov, con una Red Pitaya, contribuyeron al diseño del nuevo sistema y a la sustitución de la Nexys 2 y la Raspberry Pi. El funcionamiento esperado del nuevo diseño fue similar a su funcionamiento real. De esta forma, se entregó un sistema capaz

de suplir las necesidades de LAGO y del Departamento de Física de la Universidad del Valle de Guatemala.

- Toda la documentación realizada dentro de este módulo de trabajo fue entregada al Departamento de Física de la Universidad del Valle de Guatemala, y está a disposición de la comunidad LAGO. Por tanto, existen registros y archivos que pueden facilitar la continuidad del proyecto, e incluso la replicación del mismo a nivel nacional o internacional.

24.1. Módulo de calibración, análisis e interpretación de datos

- Se recomienda para estudios futuros hacer de nuevo la calibración del WCD cuando se disponga de plásticos centelleadores. Esto dará una mejor estimación del VEM. Además se puede trabajar ya las aplicaciones del decrecimiento Forbush y el monitoreo sísmico, descritos en el capítulo 11.
- Cuando se disponga de los plásticos centelleadores también se pueden utilizar para estudios de tomografías de muones o bien muongrafías. Estas pueden ser usadas para estudiar estructuras arqueológicas, además de estructuras arquitectónicas modernas e interior de los volcanes.
- Otros posibles aportes significativos al proyecto pueden ser las simulaciones de chubascos atmosféricos con CORSIKA, en ambos sitios Universidad del Valle de Guatemala en la ciudad de Guatemala y en el volcán Atitlan en el departamento del Suchitepequez. Además de las simulaciones en GEANT4 de las placas centelleadoras.

24.2. Módulo de fabricación de planchas centelleadoras de PVT

- Se recomienda comprar los reactivos a utilizarse en el centelleador (polivinil-tolueno, POPOP y p-terfenil, u otras composiciones posibles para centelleadores orgánicos) en lugar de sintetizarlos. Esto puede disminuir la cantidad de impurezas presentes en el centelleador, además de ahorrar tiempo y recursos monetarios en su fabricación.
- A fin de aumentar las aplicaciones posibles para el centelleador fabricado, se recomienda investigar más sobre fibras centelleadoras (scintillating fiber, SCIFI) o fibras de cambio de longitud de onda (wavelength shifter fiber, WLS fiber). Esta tecnología facilita el uso de centelleadores para muongrafía y pueden fabricarse por el método de extrusión.

- Además del método de extrusión, es recomendable buscar métodos alternativos para la producción del centelleador debido a la necesidad del equipo industrial para la extrusión de plásticos y la cantidad del material que se desea producir. El método de extrusión solo produce el material en cantidades industriales.

24.3. Módulo de potencia

- El buen funcionamiento del sistema solar fotovoltaico aislado depende directamente de qué tanta radiación solar se capte, por ello, se recomienda una supervisión periódica del panel solar en términos de limpieza para evitar que este reduzca su capacidad de absorción de rayos solares debido a la presencia de suciedad en la superficie del mismo.
- La SD utilizada tiene una capacidad de almacenamiento limitada, por ello, se recomienda eliminar los archivos almacenado en la carpeta destinada a las imágenes con el fin de evitar problemas de saturación de memoria en la Raspberry Pi.
- Si se cuenta con el presupuesto necesario, adquirir sensores con una mejor resolución de datos y con una mayor precisión para tener un mejor control del funcionamiento de la electrónica de forma remota.

24.4. Módulo de transmisión de datos

- Los mapas de elevación solamente muestran el relieve terrestre pero no elementos que pueden obstruir la línea de vista como árboles o edificios. En la práctica hubo dificultad con esto por lo que se recomienda realizar un estudio de las condiciones y ubicaciones de donde se planifica colocar los radios para determinar si se cuenta con línea de vista y no se tiene una obstrucción que afecte el enlace de comunicación punto a punto.
- Como todo sistema que se implementa, es importante tomar en cuenta que además de la instalación y configuración, es necesario prever que se requiere mantenimiento para garantizar una operación sin interrupciones. Se sugiere mantener una comunicación activa entre los miembros de la Universidad del Valle de Guatemala (Campus central) con los encargados de la red en la Universidad del Valle de Guatemala (Campus sur) para darle un mantenimiento periódicamente a la red utilizada para el envío de los datos ya que las condiciones climáticas del Campus Sur son diferentes al Campus Central.
- Las condiciones climáticas de la Universidad del Valle de Guatemala (Campus sur) afectaron la estructura a la que estaba sujeta el radio, deteriorando los sujetadores y provocando la caída del dispositivo. Se sugiere utilizar materiales que no se dañen ni cambien sus propiedades mecánicas y se puedan emplear en espacios exteriores.

24.5. Módulo de control central

- El sensor implementado para medir la humedad tiene una vida útil limitada, por lo que se recomienda revisarlo continuamente o cambiarlo por otro más robusto.

- Para llevar a cabo la caracterización, se recomienda investigar más alternativas para generar los pulsos, pues es la parte más crítica de todo el diseño experimental.
- Es de suma importancia garantizar la integridad del PMT al momento de realizar la caracterización, puesto que son instrumentos altamente sensibles que se pueden dañar al recibir fuentes de luz muy saturadas.
- Se recomienda evaluar alternativas al uso de la Raspberry Pi como micromcomputadora central en la adquisición de datos, ya que tienden a ser inestables y puede ocasionar problemas futuro atentando contra la autonomía del sistema completo.

24.6. Módulo de actualización de tecnología

- Previo a empezar a utilizar la placa para aplicaciones como las empleadas para este megaproyecto se recomienda seguir los ejemplos que brinda Red Pitaya®. De esta manera se podrá aprender sobre las ventajas y limitaciones que esta plataforma de desarrollo brinda. Asimismo, también es de utilidad para aprender a acerca de los distintos protocolos que maneja.
- También es recomendable leer en los foros de Red Pitaya® cuando se encuentra con alguna dificultad o algún error durante la compilación de proyectos, ya que al ser una plataforma comercial es conveniente para el distribuidor ofrecer una solución a los problemas que surgen.
- Mantener una buena relación y comunicación con la comunidad LAGO, en especial con Horacio Arnaldi, también fue vital para el desarrollo de la implementación de la nueva tecnología. Por eso se recomienda estar disponible para las reuniones que se planifican en el grupo de electrónica de LAGO.
- Para la construcción del nuevo detector se recomienda considerar construir una placa base como la que se utiliza con el detector actual para alimentar el PMT. Actualmente se cuenta con una base proveída por Hamamatsu. Sin embargo, luego de más de 6 pruebas alimentando el PMT con dicha base no se pudo observar alguna detección de alguna partícula cósmica tanto en aire como en agua. Esto se pudo deber a que la base no esté brindando los voltajes necesarios en sus divisores de voltaje.

24.7. Módulo de análisis en *Big Data*

- Utilizar programación funcional solamente, esto facilita escribir código en base al API de Spark. Ayuda a distribuir la carga de procesamiento en cada uno de los nodos ya que solamente se utilizan estructuras inmutables y no existen variables globales que afecten a las funciones.
- Filtrar la información de forma dinámica por medio del filtro Savitzky-Golay, esto para aproximar aún más la información. El filtro se aplica sobre un subconjunto de datos, sobre el cual se calculan los coeficientes según la posición en que se encuentre el valor resultante en este subconjunto de datos, pero en este caso el filtro se aplicó

estáticamente sobre todos los datos, esto dado a que no nos interesaban los extremos; sin embargo, puede brindar mejores resultados.

- Mejorar la región de muones verticales, esto se realiza con mayor cantidad de información. Además, se puede calcular el comportamiento del VEM conforme el tiempo, lo cual brinda interesantes indicadores para un análisis posterior.

24.8. Módulo de infraestructura de datos

- Descargar los repositorios para la instalación de Hadoop y Ambari, esto hace que la instalación sea más rápida.
- Guiarse por la guía de instalación oficial de Hortonworks y no por otras guías.
- Actualizar la versión de HDP a la más reciente, HDP 3.0
- Crear grupos de configuración para que los nodos esclavos tengan un mismo tamaño de pila y los nodos maestros tengan un tamaño de pila mayor.
- Actualizar el equipo físico ya que cuenta con muchos años de uso.
- Cambiar la base de datos por Hbase, esto cambiará la forma de visualizar los datos. Dentro de la limpieza de datos ya no sería necesario crear csvs si no que se podrían crear JSONS los cuales son mucho más fáciles de analizar.
- Hacer un servicio que elimine el histórico de archivos.
- Agregar más espacio al disco duro.
- Hacer pública la interfaz de Ambari para que pueda ser accedida hasta fuera de la Universidad del Valle de Guatemala.

24.9. Módulo de gestión de proyecto

- Si el Departamento de Física de la Universidad del Valle de Guatemala busca darle continuidad al proyecto LAGO, es necesario que considere nuevamente la implementación de las buenas prácticas para la gestión de proyectos propuestas por el PMI. Históricamente hablando, es la segunda ocasión que estas metodologías benefician el desarrollo de los proyectos de LAGO.
- Con este nuevo diario de lecciones aprendidas y toda la documentación hecha, es importante que el Departamento de Física haga un consolidado que integre la información de todos los proyectos realizados hasta el momento. Esto con la finalidad de favorecer la continuidad del proyecto a lo largo del tiempo.
- Para un mejor gestión de las adquisiciones y manejo de recursos, se recomienda buscar un patrocinador que esté dispuesto a colaborar económicamente con el proyecto de LAGO en Guatemala.

- Dentro de la gestión de proyectos, es importante mantener activas la líneas de comunicación entre los ejecutores del megaproyecto y los demás interesados. Se recomienda fortalecer este tipo de relaciones para un mejor manejo de los interesados del proyecto.
- Dentro de la gestión de proyectos, es importante mantener activas la líneas de comunicación entre los ejecutores del megaproyecto y los demás interesados. Se recomienda fortalecer este tipo de relaciones para un mejor manejo de los interesados del proyecto.
- Para la gestión de la calidad, se recomienda crear un historial de los registros de los cuadros de control para estudiar el progreso del funcionamiento de cada uno de los sistemas que integran el detector de radiación cósmica Cherenkov.
- Es importante gestionar, nuevamente, la calidad para la implementación de una Red Pitaya en el sistema de detección de radiación cósmica Cherenkov, ubicado en la reserva “El Quetzal”. Teóricamente, y como lo señala el diagrama de Ishikawa, parte del problema de la deficiencia en la adquisición de datos es la altura sobre el nivel del mar a la que se encuentra el detector de la Universidad del Valle de Guatemala.

-
- [1] Proyecto_LAGO, *Latin American Giant Observatory (LAGO)*, ene. de 2016. dirección: [http://wiki.lagoproject.org/index.php?title=Latin_American_Giant_Observatory_\(LAGO\)](http://wiki.lagoproject.org/index.php?title=Latin_American_Giant_Observatory_(LAGO)).
- [2] H. Asorey, A. Balaguera-Rojas, L. Núñez, J. Sanabria-Gómez, C. Sarmiento-Cano, M. Suárez-Durán, M. Valencia-Otero y A. Vesga-Ramírez, «Astroparticle techniques: Colombia active volcano candidates for muon telescope observation sites», *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, n.º 49, págs. 54-54, 2017. dirección: http://www.astroscu.unam.mx/rmaa/RMxAC..49/PDF/RMxAC..49_oral4.pdf.
- [3] D. Conde, P. Duque, K. Guarcax, M. Novella, L. Pinillos y G. Solomon, «Diseño, Construcción y Caracterización del Detector de Radiación Vavilov-Cherenkov de Agua», *Universidad del Valle de Guatemala. Facultad de Ciencias y Humanidades.*, dic. de 2016.
- [4] J. Alfaro, *Los efectos gravitatorios cuánticos en los rayos cósmicos de energías ultra-altas*. dirección: www.fis.puc.cl/~jalfaro/fiz1111/charla/rcae3.pdf.
- [5] N. Nijenhuis, «Characterization of the ANTARES Photomultiplier R 7081-20», *Universiteit van Amsterdam. Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica*, ago. de 2002.
- [6] U. j. Wiese, «The Standard Model of Particle Physics», Tesis doct., 2018.
- [7] E. G. Broock, *Los Neutrinos Solares*, 2016.
- [8] R. A. Serway, *Modern physics*. Thomson Brooks/Cole, 2005.
- [9] S. T. Thornton y A. F. Rex, *Modern physics for scientists and engineers*. Cengage Learning, 2013.
- [10] M. A. Baños, *Interacción de la radiación con la materia*.
- [11] S. S. M. Wong, *Introductory nuclear physics*. Wiley-VCH, 2004.
- [12] H. Asorey, «Los Detectores Chérenkov del Observatorio Pierre Auger y su Aplicación al Estudio de Fondos de Radiación», Tesis doct., 2012.

- [13] Y. E. Pérez, «Caracterización de Detectores Chérenkov en el Proyecto LAGO (Large Aperture GRB Observatory)», Tesis doct., 2009.
- [14] D. E. Conde, P. R. Duque, K. R. Guarca, M. N. Linares, L. J. Pinillos y G. A. Salomon, *Diseño, Construcción y Caracterización de Detector de Radiación Vavilov-Cherenkov de Agua*, 2016.
- [15] S. C. M. Karen, «Composition studies of ultra high energy cosmic rays using data of the Pierre Auger Observatory», Tesis doct.
- [16] X. Wang, «An Introduction to Cosmic Rays Composition and Ultra-High Energy Cosmic Rays Detections», Tesis doct., 2011.
- [17] B. R. Martin, *Nuclear and particle physics an introduction*. John Wiley y Sons, 2009.
- [18] R. Z. Funchal, B. S. Schmauch y G. Giesen, *The Physics of Neutrinos*.
- [19] G. N. Afanasiev, *Vavilov-Cherenkov and Synchrotron Radiation Foundations and Applications*. Kluwer Academic Publishers, 2005.
- [20] J. D. Fuentes, *Física Nuclear y de partículas*, 2012.
- [21] N. Nijenhuis, «Characterization of the ANTARES Photomultiplier R 7081-20 N.», Tesis doct., 2002.
- [22] DatasheetCatalog, *Datasheet catalog for integrated circuits, diodes, triacs, and other semiconductors*, view. dirección: <http://www.datasheetcatalog.com/>.
- [23] W. R. Leo, *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach*. Springer-Verlag, 1992.
- [24] S. Tokar, I. Sykora, M. Pikna e I. Z. Chirikov, «Single Photoelectron Spectra Analysis for the Metal Dynode Photomultiplier», *CERN*, feb. de 1999.
- [25] Q. He, «Fitting Single Photo-electron peak», *Princeton University*, ago. de 2010.
- [26] W. Navidi, *Estadística para ingenieros*. McGraw-Hill, 2006.
- [27] S. Brandt y G. Cowan, *Data analysis: statistical and computational methods for scientists and engineers*. Springer, 2014.
- [28] H. Asorey, «Los detectores Cherenkov del Observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación», *Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina*, 2012.
- [29] L. A. Núñez, H. M. Quitián y J. D. Sanabria-Gómez, *Implementación de un protocolo de bajo costo para la purificación del agua de los detectores Cherenkov en altura del proyecto L.A.G.O.* Ago. de 2013.
- [30] A. Ganformina, *Aplicaciones de la Radiación Cherenkov*, 2017. dirección: <https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/63591/TFG%20Aplicaciones%20de%20la%20radiaci%C3%B3n%20cherenkov.pdf?sequence=1>.
- [31] Hamamatsu_Photonics, *Photomultiplier Tubes. Basics and Applications*. 2007. dirección: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf.
- [32] Digilent, *Nexys 2 Reference Manual*. dirección: <https://reference.digilentinc.com/reference/programmable-logic/nexys-2/reference-manual>.
- [33] M. Sofo y L. Arnaldi, «The data acquisition system of the Latin American Giant Observatory (LAGO)», *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 820, págs. 34-39,

- [34] STEMLab, *Red Pitaya Documentation*, 2017. dirección: <https://redpitaya.readthedocs.io/en/latest/>.
- [35] V. A. Tzorín, *Introducción a la Aplicación de las Variaciones en la Intensidad del Flujo de Muones como Precursor de Actividad Sísmica*, 2017.
- [36] P. J. Bernal, *Kit de Iniciación a la Fotografía Digital*, 1.^a ed. ACUARIUM, 2005, vol. 1.
- [37] Google, *Canon Camera Connect Aplicaciones en Google Play*. dirección: <https://play.google.com/store/apps/details?id=jp.co.canon.ic.cameraconnect&hl=es>.
- [38] J. Pomares, *Manual de Arduino*.
- [39] M. M. Jimmy, «Solar activity studies through the modulation of galactic cosmic rays», Tesis doct., 2011.
- [40] O. G. Morales, «Modulación de la Radiación Cósmica en el Máximo de la Actividad Solar», Tesis doct., 2007.
- [41] T. Kuwabara, J. W. Bieber, J. Clem, P. Evenson, R. Pyle, K. Munakata, S. Yasue, C. Kato, S. Akahane, M. Koyama y et al., «Real-time cosmic ray monitoring system for space weather», *Space Weather*, vol. 4, n.º 8, 2006.
- [42] K. Eftaxias, «Are There Pre-Seismic Electromagnetic Precursors? A Multidisciplinary Approach», *INTECH*, 2012.
- [43] M. Rosales, L. Jaime, M. Rengifo, C. Guada, L. Nunez, A. Melfo, J. Villegas y A. Espinoza, «Radiación Cósmica y Precursores Sísmicos», *Revista Investigacion*, vol. 27, 2014.
- [44] J. Alonso, *Manual de cálculo de sistemas fotovoltaicos aislados*, <https://www.sfe-solar.com/baterias-solares/manual-calculo/>, [Online; accessed 24-febrero-2018], 2014.
- [45] J. Cavasassi, *¿Que es una batería de ciclo profundo?*, <http://www.cavadevices.com/archivos/FOLLETOS/BATERIAS%20CICLO%20PROFUNDO.pdf>, [Online; accessed 11-septiembre-2018], 2015.
- [46] J. Peña, *Conexión Raspberry Pi - LAGO*. dirección: <http://wiki.lagoproject.org/images/4/42/Raspberry-LAGO.pdf>.
- [47] Proyecto_LAGO, *AcquaDatos*, ene. de 2016. dirección: <http://wiki.lagoproject.org/index.php?title=ACQUA>.
- [48] STMicroelectronics, *LPS331AP: MEMS pressure sensor: 260-1260 mbar absolute digital output barometer*, 2012. dirección: <http://files.amperka.ru/datasheets/LPS331AP-barometer.pdf>.
- [49] Itead_Studio, *Raspbrry PI GPS Add-on*, dic. de 2013. dirección: ftp://imall.iteadstudio.com/Modules/IM131227001/DS_IM131227001.pdf.
- [50] —, *RPI GPS ADD-ON V2.0*, jun. de 2016. dirección: https://www.itead.cc/wiki/RPI_GPS_ADD-ON_V2.0.
- [51] M. Causer, *Raspberry Pi Itead Studio GPS*, jun. de 2014. dirección: <https://github.com/mcauser/Raspberry-Pi-ITead-Studio-GPS-NEO-6M>.

- [52] Aosong_Electronics, *Temperature and humidity module. DHT11 Product Manual*. dirección: <https://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/DHT11.pdf>.
- [53] M. Hawkins, *DHT11 Temperature and Humidity Sensor and the Raspberry Pi*, sep. de 2017. dirección: <https://www.raspberrypi-spy.co.uk/2017/09/dht11-temperature-and-humidity-sensor-raspberry-pi/>.
- [54] MicroSystems, *ACS712*, 2007. dirección: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>.
- [55] E. Martínez, *Modelo de un sistema de comunicaciones*. 2007. dirección: <http://www.eveliux.com/mx/Modelo-de-un-sistema-decomunicaciones.html>.
- [56] A. Fernández, F. Lecumberry, P. Canela, G. Capdhourat, M. Delbracio y J. Pechiar, *Sistemas de comunicación. Clase 1: Introducción*, 2006.
- [57] L. Frenzel, *Principles of Electronic Communication Systems*, 4.^a ed. Mc-Graw Hill, 2016.
- [58] C. Fernández, *Una mirada al Efecto Cherenkov*, 2016. dirección: www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/extras/hojitas_conocimiento/2016/fernandez_c-efecto_cherencov16_137-138.pdf.
- [59] B. Carlson, *Communication systems: an introduction to signals and noise in electrical communication*, 4.^a ed. Mc-Graw Hill, 2002.
- [60] J. Kurose y K. Ross, *Computer networking: a top-down approach*, 7.^a ed. Pearson, 2017.
- [61] R. Hat, *Capítulo 20. Protocolo SSH*, 2005. dirección: <https://web.mit.edu/rhel-doc/4/RH-DOCS/rhel-rg-es-4/ch-ssh.html>.
- [62] Ubiquiti_Networks, *Products*, 2018. dirección: <https://www.ubnt.com/products/>.
- [63] S. Buettrich, *Cálculo de radioenlace*, 2007. dirección: <https://www.analfatecnicos.net/archivos/24.CalculoDeRadioenlace.pdf>.
- [64] RedCLARA, *Guatemala - RAGIE*. dirección: www.redclara.net/index.php/es/somos/miembros/guatemala-ragie.
- [65] J. Besada y M. Sierra, *Radiación y Propagación*, 2010.
- [66] W. Tomasi, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson Educación, 2003.
- [67] U. P. de Valencia, *Diagramas de radiación*. dirección: http://www.upv.es/antenas/Tema_1/diagramas_de_radiacion.htm.
- [68] E. Chang, *Zonas de Fresnel: ¿Por qué son importantes?*, 2016. dirección: <https://eachang.wordpress.com/2016/08/24/zonas-de-fresnel-importancia/>.
- [69] Ubiquiti_Networks, *AirGrid M*, 2018. dirección: <https://www.ubnt.com/airmax/airgridm/>.
- [70] ———, *airMax TDMA System*, 2014. dirección: https://dl.ubnt.com/datasheets/airmax/UBNT_DS_airMAX_TDMA.pdf.
- [71] M. Calvo y R. M. Rodríguez-Osorio, *Codificación del canal*, 2009.
- [72] Ubiquiti_Networks, *airOS 6*, 2017. dirección: https://dl.ubnt.com/guides/airOS/airOS%5C_6%5C_UG.pdf.

- [73] S. de Telecomunicaciones, *TABLA NACIONAL DE ATRIBUCION DE FRECUENCIAS RADIOELÉCTRICAS (Pies de Página)*, 2016. dirección: <https://sit.gov.gt/download/tabla-nacional-de-atribucion-de-frecuenciasradioelectricas-pies-de-pagina/?wpdmdl=4299>.
- [74] A. Navarro, *Crea tu propio sistema de grabación de seguridad con Raspberry Pi y Foscam*, <https://comohacer.eu/sistema-grabacion-seguridad-raspberry-pi-foscam/>, [Online; accessed 23-abril-2018], 2015.
- [75] A. G. Tellez, «Pruebas al PMT R5912 Hamamatsu», en *Pruebas al PMT R5912 Hamamatsu*, ép. INAOE. 2011.
- [76] M. R. Bonilla, E. Carrasco, I. Torres, E. Moreno y A. Carraminana, «Caracterización de PMTs pruebas de respuesta a un fotoelectrón», en *Caracterización de PMTs pruebas de respuesta a un fotoelectrón*, ép. LAGO. 2014.
- [77] STEMlab, *Red Pitaya User Manual*, feb. de 2014.
- [78] A. Galindo, «Pruebas al PMT R5912 Hamamatsu», *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica*, jun. de 2011.
- [79] M. Bonilla, E. Carrasco, I. Torres, E. Moreno y A. Carramiñana, «Caracterización de PMTs: pruebas de respuesta a un fotoelectrón», *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica*, dic. de 2014.
- [80] O. Veledar, P. Byrne, S. Danaher, J. Allen, L. Thompson y J. McMillan, «Simple techniques for generating nanosecond blue light pulses from light emitting diodes», *Measurement Science and Technology*, vol. 18, págs. 131-137, 2007. DOI: 10.1088/0957-0233/18/1/016.
- [81] Digilent, *Genesys FPGA Board Reference Manual*, abr. de 2016. dirección: https://reference.digilentinc.com/_media/genesys:genesys_rm.pdf.
- [82] T. Stanev, *High energy cosmic rays*. Springer-Praxis, 2010.
- [83] S. Gill, *Experimentos de Física de bajo costo, usando TIC's*, 1.ª ed., vol. 1.
- [84] C. E. de Metrología, *Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos Fundamentales y Generales, y Términos Asociados*, 3.ª ed. CEM, 2012, vol. 1.
- [85] Hortonworks, *Reputation Leaderboard*, 2018. dirección: <https://community.hortonworks.com/leaderboard/index.html?page=1627%7B%5C%7DpageSize=15%7B%5C%7Dsort=karma%7B%5C%7Dall=1> (visitado).
- [86] N. Instruments, *¿Qué es Adquisición de Datos?* Dirección: <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>.
- [87] Nutaq, *The Advantages of Using FPGAs in High Speed, High Density Data Acquisition Systems*. dirección: <https://www.nutaq.com/blog/advantages-using-fpgas-high-speed-high-density-data-acquisition-systems>.
- [88] Xilinx, *Field Programmable Gate Array (FPGA)*. dirección: <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/what-is-an-fpga.html>.
- [89] A. Bucknall, *Hardware Description Languages; What are they and why should I care?*, 2016. dirección: <https://stories.mlh.io/hardware-description-languages-what-are-they-and-why-should-i-care-307dd0b2ba9b>.

- [90] M. A. R. Cisneros, *Diseño de un nuevo sistema de adquisición basado en Red Pitaya para los detectores de partículas usados en la colaboración LAGO*, 2016. dirección: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/5154/1/124613.pdf>.
- [91] Verilog, *Verilog Resources*, 2012. dirección: <http://www.verilog.com/>.
- [92] R. Pitaya, *About us*. dirección: <https://www.redpitaya.com/129/about-us>.
- [93] Xilinx, *Vivado Design Suite User Guide: Programming and Debugging*, 2012. dirección: https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx2012_2/ug908-vivado-%20programming-debugging.pdf.
- [94] —, *Vivado Design Suite User Guide: Synthesis*, 2013. dirección: https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx2013_2/ug901-vivado-%20synthesis.pdf.
- [95] EcuRed, *Microprocesador*, 2014. dirección: <https://www.ecured.cu/Microprocesador>.
- [96] R. Pitaya, *Fast analog IO*, 2017. dirección: <https://redpitaya.readthedocs.io/en/latest/developerGuide/125-14/fastIO.html>.
- [97] Xilinx, *Zynq-7000 SoC Data Sheet: Overview*, 2018. dirección: https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds190-Zynq-7000-%20overview.pdf.
- [98] D. bibinitperiod Reuse, *The ARM Cortex-A9 Processors*. dirección: <https://www.design-reuse.com/articles/16875/the-arm-cortex-a9-processors.html>.
- [99] M. Rouse, *Ubuntu*, 2018. dirección: <https://searchdatacenter.techtarget.com/definition/Ubuntu>.
- [100] T. L. Foundation, *What is Linux?*, 2016. dirección: <https://www.linux.com/what-is-linux>.
- [101] Tuelectronica, *Señales analógicas y digitales*, 2008. dirección: <https://tuelectronica.es/senales-%20analogicas-y-digitales/>.
- [102] D. Higuera, *El Generador de Funciones*. dirección: <http://webdiee.cem.itesm.mx/web/servicios/archivo/tutoriales/generador/>.
- [103] B. Precision, *Instruction Manual Model 4011A*, 2014. dirección: https://bkpmedia.s3.amazonaws.com/downloads/manuals/en-us/4011A_manual.pdf.
- [104] E. Smith, *Understanding Analog-to-Digital Converters: Deciphering Resolution and Sampling Rate*, 2015. dirección: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-analog-to-digital-%20converters-deciphering-resolution-and-sampl/>.
- [105] T. Kuphaldt, *Introduction to Digital-Analog Conversion*. dirección: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/digital/chpt-13/digital-analog-%20conversion/>.
- [106] H. Arnaldi, *Documentación del nuevo software de LAGO*, 2018.
- [107] Amazon, *Diymore USB Charger Doctor Current Voltage Charging Detector Battery Voltmeter Ammeter Multimeter USB Tester Mobile Power Panel Monitor Gauge DC LED Display*. dirección: https://www.amazon.com/dp/B01L6Y3IMK/ref=psdc_14244471_t3_B015F83X0U.
- [108] M. Hord, *I2C*, 2013. dirección: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c>.

- [109] K. Navarra, *¿Cómo funciona el protocolo SPI?*, 2014. dirección: <http://panamahitek.com/como-funciona-el-protocolo-spi/>.
- [110] K. D. Rakes, «Evaluating The Response Of Polyvinyl Toluene Scintillators Used In Portal Detectors», Tesis doct., Air University, Ohio, Estados Unidos, mar. de 2008.
- [111] Eljen Technologies, *General Purpose Plastic Scintillator EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212*, ene. de 2016.
- [112] R.-Y. Zhu y C. Woody, «35.4. Inorganic scintillators», en *The Review of Particle Physics (2017)*, nov. de 2017, págs. 12-17.
- [113] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*. John Wiley y Sons, Inc., 2012.
- [114] K. Johnson, «35.3. Organic scintillators», en *The Review of Particle Physics (2017)*, ago. de 2017, págs. 9-12.
- [115] T. Förster, «Zwischenmolekulare Energiewanderung und Fluoreszenz», *Annalen der Physik*, vol. 437, n.º 1-2, págs. 55-75, 1948, ISSN: 00033804, 15213889. DOI: 10.1002/andp.19484370105. dirección: <http://doi.wiley.com/10.1002/andp.19484370105> (visitado 27-03-2018).
- [116] A. R. Clapp, I. L. Medintz y H. Mattoussi, «Förster Resonance Energy Transfer Investigations Using Quantum-Dot Fluorophores», *ChemPhysChem*, vol. 7, n.º 1, págs. 47-57, ene. de 2006, ISSN: 1439-4235, 1439-7641. DOI: 10.1002/cphc.200500217. dirección: <http://doi.wiley.com/10.1002/cphc.200500217> (visitado 27-03-2018).
- [117] D. A. Skoog, F. J. Holler y S. R. Crouch, *Principios de análisis instrumental*, Sexta edición. México: Cengage Learning, 2008.
- [118] J. B. Birks, «Scintillations from Organic Crystals: Specific Fluorescence and Relative Response to Different Radiations», *Proceedings of the Physical Society. Section A*, vol. 64, n.º 10, págs. 874-877, oct. de 1951, ISSN: 0370-1298. DOI: 10.1088/0370-1298/64/10/303. dirección: <http://stacks.iop.org/0370-1298/64/i=10/a=303?key=crossref.f6127795b0efda6211aab9d5c1b9ae31> (visitado 27-03-2018).
- [119] A. D. Bross, K. L. Mellott y A. Pla-Dalmau, «Extruded plastic scintillator including inorganic powders», US 7,067,079 B2, jul. de 2006. dirección: <https://patents.google.com/patent/US7067079>.
- [120] A. Pla-Dalmau, A. D. Bross y K. L. Mellott, «Low-cost extruded plastic scintillator», *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 466, n.º 3, págs. 482-491, jul. de 2001, ISSN: 01689002. DOI: 10.1016/S0168-9002(01)00177-2. dirección: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900201001772> (visitado 06-03-2018).
- [121] M. Heidari, A. Sedrpoushan y F. Mohammazadeh, «Selective Oxidation of Benzylic C-H Using Nanoscale Graphene Oxide as Highly Efficient Carbocatalyst: Direct Synthesis of Terephthalic Acid», *Organic Process Research & Development*, vol. 21, n.º 4, págs. 641-647, abr. de 2017, ISSN: 1083-6160, 1520-586X. DOI: 10.1021/acs.oprd.7b00056. dirección: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.oprd.7b00056> (visitado 10-05-2018).

- [122] W. S. Hummers y R. E. Offeman, «Preparation of Graphitic Oxide», *Journal of the American Chemical Society*, vol. 80, n.º 6, págs. 1339-1339, mar. de 1958, ISSN: 0002-7863, 1520-5126. DOI: 10.1021/ja01539a017. dirección: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja01539a017> (visitado 10-05-2018).
- [123] N. C. Rose, «Preparation of terephthaloyl chloride: Prelude to ersatz Nylon», *Journal of Chemical Education*, vol. 44, n.º 5, pág. 283, mayo de 1967, ISSN: 0021-9584, 1938-1328. DOI: 10.1021/ed044p283. dirección: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ed044p283> (visitado 10-05-2018).
- [124] M. Moosavi, Y. Moosavi y A. Gholami, «Synthesis of POPOP, a Scintillator Used In The Nuclear Radiation Detectors», *ADST-Journal*, vol. 3, n.º 1, págs. 5-11, ago. de 2012. dirección: <http://adst.ir/article-1-214-en.html>.
- [125] P. M. Institute, *PMBOK Guide. A Guide to the project management body of knowledge*, 5.ª ed. 2017.

26.1. Diagrama de conectividad del proyecto

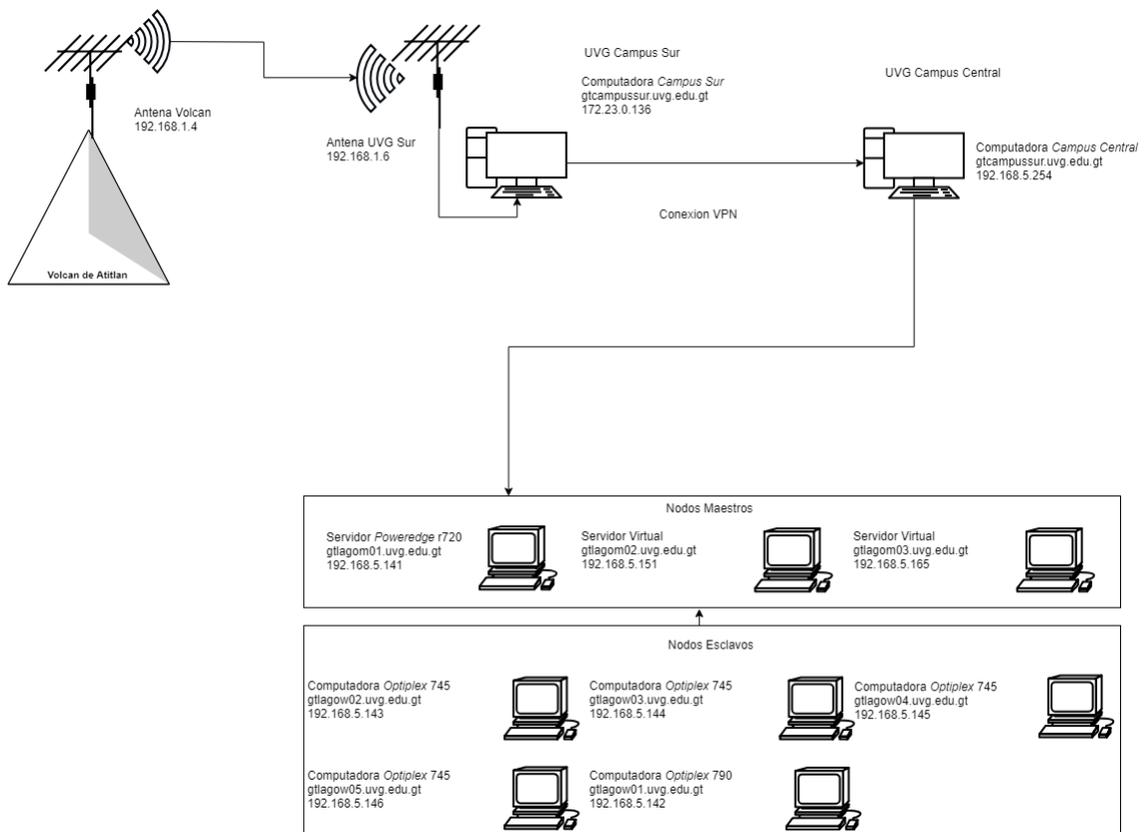


Figura 215: Diagrama de red del proyecto LAGO Universidad del Valle de Guatemala

26.2. Ejemplo de archivo de datos obtenido con el detector

```
1 # v 4
2 ##
3 ## This is a LAGO raw data file, version 4
4 ## It contains the following data:
5 ## <N1> <N2> <N3> : line with values of the 3 ADC for a triggered pulse
6 ## # t <C> <V> : end of a trigger
7 ## : gives the channel trigger (<C>: 3 bit mask) and 40MHz clock count (<V>) of the trigger tim
8 ## # c <C> : internal trigger counter
9 ## # x f <V> : 40 MHz frequency
10 ## # x r C1-DD <V> : raw temperature and pressure sensor value
11 ## # x r D1 <V> : raw temperature/pressure value
12 ## # x r D2 <V> : raw temperature/pressure value
13 ## # x h <HH:MM:SS> <DD/MM/YYYY> <S> : GPS time (every new second, last number is seconds since EPOCH)
14 ## # x s 32.5 C 805 hPa 1582 m : temperature <T>, pressure <P> and altitude (from pressure) <A>
15 ## # x g 14.548006 -91.193671 1582 : GPS data - latitude, longitude, altitude
16 ## # x b <B1> <B2> <B3> : baselines (NOT IMPLEMENTED IN LAGO)
17 ## In case of error, an unfinished line will be finished by # E @@@
18 ## Followed by a line with # E <N> and the error message in human readable format, where <N> is the error code:
19 ## # E 1 : read timeout of 2 seconds
20 ## # E 2 : too many buffer reading tries
21 ## # E 3 : unknown word from FPGA
22 ##
23 ## Current registers setting
24 ##
25 # x c T1 1000
26 # x c T2 1000
27 # x c T3 100
28 # x c ST1 1000
29 # x c ST2 1000
30 # x c ST3 1000
31 # x c HV1 0
32 # x c HV2 0
33 # x c HV3 1600
34 # x c GPSTM UTC
35 ##
36 ## This file was started on raspberrypiLAGO
37 ## Machine local time was Fri Apr 27 23:21:59 2018
38 ## WARNING, there is no GPS, using PC time
39 ##
```

Figura 216: Encabezado de un archivo del detector en el volcán Atitlán.

En la Figura 216 se muestra el encabezado de uno de los archivos de datos obtenidos con el detector. Las líneas 13 y 14 muestran los datos de los sensores de presión y temperatura que se corrigieron antes del envío del archivo, además de la información de geolocalización que se añadió directamente en el archivo.

```
40 # x f 39999999
41 # x r D2 0
42 # x r D1 0
43 # x h 05:22:00 28/04/2018 1524892920
44 50 50 51
45 50 50 50
46 50 51 134
47 50 50 71
48 50 51 54
49 50 50 51
50 50 50 52
51 51 50 51
52 50 50 51
53 50 50 50
54 50 50 51
55 50 50 51
56 # t 4 121207
57 # c 14733
58 49 50 50
59 50 50 51
60 50 50 281
61 50 50 96
62 50 50 69
63 50 50 53
64 50 50 52
65 50 50 50
66 49 50 50
67 50 50 51
68 50 50 50
69 50 50 50
70 # t 4 226528
71 # c 14734
```

Figura 217: Dos pulsos obtenidos por el sistema de adquisición de datos.

La Figura 217 muestra dos pulsos consecutivos obtenidos en el tercer canal de adquisición

de la Nexys 2. Por esta razón, los valores se encuentran en la tercera columna, mientras que en la primera y la segunda se obtienen lecturas de ruido eléctrico. Al final de cada pulso, se presenta el tiempo en el que fue adquirido cada pulso, y el conteo de estos desde que se inició la adquisición de datos.



Figura 218: Ejemplo de la lectura del estado actual del detector.

En la Figura 218 se muestra un ejemplo de la lectura del estado actual del detector. Este se escribe en un documento de texto que es enviado a través del enlace, junto con el archivo de datos generado en esa hora. La humedad está dada por un valor porcentual, la temperatura está en grados Celsius y las cinco corrientes medidas están en mA.

26.3. Información sobre sistema operativo Raspbian Jessie

El sistema operativo Raspbian Jessie utilizado en la Raspberry Pi se obtuvo en el siguiente enlace:

<http://downloads.raspberrypi.org/raspbian/images/raspbian-2017-07-05/>.

26.4. Repositorio del megaproyecto

En el siguiente enlace se encuentra el repositorio del Megaproyecto LAGO UVG Fase 2, con los códigos y algoritmos diseñados para la instrumentación electrónica, el análisis y la transmisión de datos.

Enlace: <https://github.com/jportegag11/Megaproyecto>.

26.5. Repositorio del dashboard

En el siguiente enlace se encuentra el repositorio de los códigos y algoritmos diseñados para el dashboard de visualización de datos.

Enlace: <https://github.com/dasosjt/lago-dashboard.git>.

26.6. Radio situado en UVG Campus Sur



Figura 219: Radio en UVG Campus Sur

26.7. Radio situado en reserva biológica “El Quetzal”



Figura 220: Radio en reserva biológica