



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: “CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO
EN LA ETAPA DE TRANSMISIÓN DEL SISTEMA DE
SUPERVISIÓN Y ALERTA TEMPRANA FRENTE A UNA
EVENTUAL ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI”**

AUTOR: MARTÍNEZ POZO JOSÉ ANDRÉS

**DIRECTOR: ING. ALVAREZ VEINTIMILLA JORGE DAMIAN
MSC.**

**SANGOLQUÍ
2017**

CERTIFICACIÓN



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN LA ETAPA DE TRANSMISIÓN DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y ALERTA TEMPRANA FRENTE A UNA EVENTUAL ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI" realizada por el señor **JOSÉ ANDRÉS MARTÍNEZ POZO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software antiplagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **JOSÉ ANDRÉS MARTÍNEZ POZO** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 31 de Julio del 2017

ING. Jorge Álvarez, MSc.

DIRECTOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **JOSÉ ANDRÉS MARTÍNEZ POZO**, con cédula de identidad N° 0401315270 declaro que este trabajo de titulación "**CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN LA ETAPA DE TRANSMISIÓN DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y ALERTA TEMPRANA FRENTE A UNA EVENTUAL ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI**" ha sido desarrollada considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que es trabajo de mi autoria, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 31 de julio del 2017

JOSÉ ANDRÉS MARTÍNEZ POZO

C.C.: 0401315270

AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

Yo, **JOSÉ ANDRÉS MARTÍNEZ POZO**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN LA ETAPA DE TRANSMISIÓN DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y ALERTA TEMPRANA FRENTE A UNA EVENTUAL ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 31 de julio del 2017

JOSÉ ANDRÉS MARTÍNEZ POZO

C.C.: 0401315270

DEDICATORIA

A Dios por su amor y oportunidades, a mis padres que siempre me brindaron su apoyo y ejemplo para alcanzar todos mis objetivos, a mis abuelos, tíos y hermanos que siempre estuvieron cuando los necesite, a mi hija Sofy que con su inocencia me enseñó que solo hay una vida para ser feliz.

José Andrés Martínez Pozo

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a mis padres José y Virginia a mis abuelos Miguel y Aida que siempre me apoyaron incondicionalmente y supieron sacar adelante nuestro hogar, a mis hermanos con quienes compartí todo desde que éramos pequeños, a mi tío Miguel quién me demostró que a pesar de cualquier circunstancia es posible seguir adelante en la vida y a toda mi familia que de una u otra manera me brindaron todo su apoyo cuando lo necesité.

Agradezco a todos mis profesores por compartir sus conocimientos y habilidades profesionales dentro y fuera del aula de clases en pos de un mejor futuro para nuestra sociedad.

Agradezco a mi tutor Jorge Álvarez por sus consejos y tutorías en la realización de este proyecto, no hubiera podido alcanzar todos los objetivos sin su esfuerzo.

Agradezco a todos y cada uno de mis compañeros de clase con quienes compartimos anécdotas, anhelos, sueños, triunfos en la Universidad.

Le agradezco a Dios por su amor y oportunidades que, sin duda, ha estado en todos los momentos de mi vida.

José Andrés Martínez Pozo

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPITULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación e Importancia	2
1.3 Alcance del Proyecto.....	3
1.4 Objetivos	3
1.4.1 General	3
1.4.2 Específicos	3
CAPITULO 2.....	4
MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Sistemas de Monitorización	4
2.1.1 Sistemas de Alerta Temprana.....	4
2.2 Redes Inalámbricas	5
2.2.1 Modos de Funcionamiento.....	6
2.2.3 Redes de Sensores Inalámbricos	8
2.3 Sistemas Fotovoltaicos autónomos	11

2.3.1 Elementos de un Sistema fotovoltaico autónomo	12
2.3.2 Fuentes de Energía Renovables	17
2.4 Dimensionado de un Sistema Fotovoltáico.....	22
2.4.1 Estimación del Consumo Energético	23
2.4.2 Cálculo del ángulo óptimo de inclinación de los paneles	25
2.4.3 Dimensionamiento del sistema de acumulación (Baterías)	26
2.4.4 Dimensionamiento del generador fotovoltaico	28
2.4.5 Dimensionamiento del Regulador.....	29
CAPÍTULO 3	31
IMPLEMENTACIÓN Y MEDICIÓN DEL CONSUMO DE POTENCIA EN LA ETAPA DE TRANSMISIÓN	31
3.1 Descripción del sistema de supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi.....	31
3.1.1 Etapa de Transmisión.....	32
3.1.2 Etapa de Monitorización	32
3.1.3 Descripción de la Etapa de Transmisión.....	32
3.1.4 Descripción de la etapa de Monitorización.....	39
3.2 Implementación del enlace Cotopaxi - ESPE	41
3.3 Mediciones del Consumo de Potencia de la Etapa de Transmisión del Sistema de Supervisión y Alerta Temprana	47
3.3.1 Configuración de los componentes para la adquisición de datos.....	47
3.3.2 Adquisición de Datos en DC.....	54
3.3.3 Adquisición de Datos en AC.....	61
CAPÍTULO 4	63
DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO	63
4.1 Consideraciones Generales	63
4.2 Escenarios de Prueba.....	66
4.2.1 Primer Escenario de Diseño	67
4.2.2 Segundo Escenario de Diseño.....	69
4.2.3 Tercer Escenario de Diseño	70
4.3 Análisis de resultados.....	72

CAPÍTULO 5	74
CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	74
5.1 Conclusiones	74
5.2 Recomendaciones.....	75
5.3 Trabajos Futuros	76
BIBLIOGRAFÍA	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ventajas y Desventajas de las Redes Inalámbricas	5
Tabla 2: Modificaciones del estándar 802.11.....	6
Tabla 3: Protocolos de Enrutamiento	8
Tabla 4: Topologías para las de redes IEEE 802.15.4	10
Tabla 5: Coordenadas de los Enlaces.....	32
Tabla 6: Características de los equipos de Transmisión	33
Tabla 7: Características de los equipos de Recepción	34
Tabla 8: Coordenadas de los nodos	40
Tabla 9: Tipos de paneles fotovoltaicos.....	12
Tabla 10: Tipos de acumulador	13
Tabla 11: Características de los Reguladores.....	14
Tabla 12: Tipos de Radiación	19
Tabla 13: Tipos de Radiación	20
Tabla 14: Software para obtener datos solares	21
Tabla 15: Cálculo de Hora Solar Pico en el Cotopaxi.....	22
Tabla 16: Factores para cálculo Rendimiento Global	25
Tabla 17: Parámetros para dimensionamiento de Baterías	26
Tabla 18: Datos de Corriente Obtenidos	62
Tabla 19: Datos Primer Escenario.....	68
Tabla 20: Resultados Primer Escenario.....	68
Tabla 21: Datos Segundo Escenario	69
Tabla 22: Resultados Segundo Escenario	70
Tabla 23: Datos Tercer Escenario	71
Tabla 24: Resultados Tercer Escenario	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Dispositivos configurados en modo Ad-Hoc	6
Figura 2: Dispositivos configurados en modo Infraestructura	7
Figura 3: Conjunto de Servicios Extendidos	7
Figura 4: Sistema WSN	9
Figura 5: Refugio José Rivas Parque Nacional Cotopaxi	31
Figura 6: Esquema de la Etapa de Transmisión	33
Figura 7: Netbook HP utilizada en el Sistema de Transmisión	34
Figura 8: Gateway Crossbow	35
Figura 9: Tarjeta Alix 2D2	35
Figura 10: Ubicación de los equipos (Enlace 1).....	36
Figura 11: Características de los equipos Cotopaxi - ESPE	36
Figura 12: Despeje de la Zona de Fresnel del enlace Cotopaxi – ESPE.....	37
Figura 13: Nivel de la señal del enlace Cotopaxi – ESPE.....	37
Figura 14: Ubicación de los equipos (Enlace 2).....	38
Figura 15: Características de los equipos Cotopaxi - IASA.....	38
Figura 16: Características de los equipos IASA - ESPE	39
Figura 17: Esquema del Sistema de Monitorización	39
Figura 18: Despliegue de la red de Sensores Inalámbricos	40
Figura 19: SFA en corriente directa y alterna.....	11
Figura 20: Curva I-V panel fotovoltaico con diferentes radiaciones	12
Figura 21: Sistema Fotovoltaico corriente AC	15
Figura 22: Sistema Fotovoltaico corriente DC	16
Figura 23: Radiación Visible por el Ojo Humano	18
Figura 24: Radiación Solar	19
Figura 25: Tipos de Radiación	20
Figura 26: Cálculo de Hora Solar Pico a través del Software de la Nasa	22
Figura 27: Ascenso de los equipos al refugio José Rivas	41
Figura 28: Coordenadas para la instalación.....	42
Figura 29: Ubicación de los equipos en el lugar correspondiente	42
Figura 30: Instalación del mástil y la antena.....	43
Figura 31: Provisión de energía a los equipos	43
Figura 32: Instalación de los equipos	44
Figura 33: Dirección de la antena de Transmisión	44
Figura 34: Dirección de la antena de Recepción	45
Figura 35: Confirmación del enlace	45
Figura 36: Toma de valores de corriente en DC	46
Figura 37: Toma de valores en corriente AC	46
Figura 38: Software Utilizado	47
Figura 39: Descarga NI Visa	48
Figura 40: Descarga estándar NI Visa	48
Figura 41: Ejecución del Instalador	49
Figura 42: Proceso de Instalación.....	49
Figura 43: Instalación del complemento Package Manager	50

Figura 44: Instalación de LabVIEW Interface for Arduino.....	50
Figura 45: Carga del Programa en Arduino	51
Figura 46: Configuraciones Finales en Arduino	51
Figura 47: Programa en LabVIEW para adquisición de datos.....	52
Figura 48: Diagrama de VI bloque.....	52
Figura 49: Configuración Write To Measurement en 1 minuto.....	53
Figura 50 Diagrama de conexión Arduino Uno – Alix 2D2	54
Figura 51: Escenario 1 sin comunicación en el enlace	55
Figura 52: Potencia 21 dbm sin enlace.....	55
Figura 53: Corriente 26 dbm sin enlace.....	56
Figura 54: Escenario 2 con comunicación en el enlace (sin tráfico)	56
Figura 55: Potencia 21 dbm con comunicación en el enlace (sin tráfico)	57
Figura 56: Corriente 26 dbm con comunicación en el enlace (sin tráfico)	57
Figura 57: Escenario 3 con comunicación en el enlace (con tráfico).....	58
Figura 58: Potencia 21 dbm con comunicación en el enlace (con tráfico)	58
Figura 59: Corriente 26 dbm con comunicación en el enlace (con tráfico)	59
Figura 60: Toma de valores en corriente AC	61
Figura 61: Promedio de potencia de la tarjeta Alix durante el envío de datos ..	64

RESUMEN

Frente a los riesgos existentes por la reactivación y una eventual erupción del Volcán Cotopaxi, el presente trabajo es un aporte para el desarrollo del proyecto “Optimización energética del sistema de supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi usando energía fotovoltaica” que junto con trabajos vulcanológicos relacionados con una Red de Sensores Inalámbricos (WSN) realizados anteriormente, son el motivo para realizar un estudio y caracterización del consumo energético en la etapa de transmisión del sistema de supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del volcán. Debido al difícil acceso por la geografía del lugar el sistema de transmisión no cuenta con suministro de energía pública por lo que se utilizan fuentes renovables como la energía solar; los sistemas de alimentación fotovoltaica pueden implementarse para sistemas de corriente alterna o corriente continua. En el presente trabajo se implementa el enlace punto a punto (Cotopaxi-ESPE) con el fin de realizar mediciones de consumo de potencia de los equipos de la etapa de transmisión en condiciones reales, con diferentes potencias de transmisión para determinar las gráficas que muestran el comportamiento de la etapa. Con los datos obtenidos se implementa un sistema de generación eléctrica basado en energía solar fotovoltaica cuya eficiencia permita menores pérdidas debido a la transferencia de energía y garantice que la etapa de transmisión del sistema de supervisión y alerta temprana en el Volcán Cotopaxi funcione de forma permanente.

PALABRAS CLAVE:

- **RENOVABLES**
- **EFICIENCIA**
- **TRANSMISIÓN**
- **AUTONOMÍA**
- **ALERTA**

ABSTRACT

As a result of the risks by reactivation and eventual eruption of Cotopaxi Volcano, this work is a contribution for development of "Energetic optimization of the supervising and early warning system against a possible eruption of the Cotopaxi Volcano using photovoltaic energy" project. Together with some related volcanological works using Wireless Sensor Network (WSN) developed before, they are the reason to make a study characterization of energy consumption in transmission stage of supervising and early warning system against a possible eruption of Cotopaxi Volcano. Because of the difficult access to the geography of the site, the transmission system doesn't count with a public energy supply so renewable sources are used like solar energy; the photovoltaic power systems can be implemented for AC or DC systems. In the present work a point to point link is used (Cotopaxi-ESPE) in order to measure the power consumption of the devices of the transmission stage in real conditions, with different transmission powers to determine the graphics that shows the behavior of the stage. With the data obtained a power generation system based on photovoltaic solar energy is implemented whose efficiency allows lower losses due to the transfer of energy and ensure that the transmission stage of the supervising and early warning system in the Cotopaxi Volcano works permanently.

KEY WORDS

- **RENEWABLE**
- **EFFICIENCY**
- **TRANSMISSION**
- **AUTONOMY**
- **ALERT**

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En el Ecuador están varios de los volcanes más activos del mundo, entre ellos el volcán Cotopaxi que es un coloso que tiene como característica especial el poseer un glaciar estimado en unos 500 millones de metros cúbicos de hielo, lo cual, de presentarse una erupción volcánica importante, generaría lahares que afectarían a poblaciones de las provincias de Cotopaxi y Pichincha (Alvarez Veintimilla, 2016).

El Sistema de Monitoreo de la Escuela Politécnica Nacional es la primera estación sísmica que contribuye a través del conocimiento de las amenazas sísmicas y volcánicas a la reducción de impactos negativos causados por fenómenos naturales en el Ecuador. En 1976 se inicia a vigilar permanentemente el volcán Cotopaxi, con un sistema de monitoreo que está formado por una red de monitorización que mide variables como emisiones de gases, actividad sísmica-acústica, deformaciones, etc; el volcán Cotopaxi es uno de los volcanes más vigilados en el país (Instituto_Geofísico, 2017).

En el año 2011 se diseña y simula una Red de Telecomunicaciones para el sistema de supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi utilizando redes de sensores inalámbricos, se define las características topográficas del

terreno para establecer la red de sensores y la red de transporte, además de un enlace que permita establecer una monitorización del volcán Cotopaxi desde un punto de vigilancia en la ESPE (Apolo Cárdenas, 2011).

En el mismo año se implementa un sistema de monitorización de señales sísmicas del volcán Cotopaxi para analizar su comportamiento empleando un Kit de sensores Crossbow IRIS y MICAz para la red, enfocándose primordialmente en el despliegue de los nodos sensores en las inmediaciones del volcán (Londoño Mancheno, 2011).

A lo largo del 2015 y 2016 se realiza el estudio de optimización energética del sistema de supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi usando energía fotovoltaica. Se concluye que, en los sistemas autónomos fotovoltaicos, el consumo de energía se reduce considerablemente cuando toda la implementación se la hace en corriente continua, por lo que se recomienda la implementación de convertidores DC-DC (Alvarez Veintimilla, 2016).

1.2 Justificación e Importancia

El 13 de noviembre de 1985 el volcán Nevado del Ruiz ubicado en Colombia erupcionó sepultando a la ciudad de Armero y dejando más de 20000 personas fallecidas por causa de los lahares y por no contar con un sistema de alerta para la población civil (Yepes, 2015). En el Ecuador el volcán Cotopaxi es uno de los más peligrosos del mundo, frente a los riesgos existentes por la reactivación y una eventual erupción es de gran importancia monitorear el volcán permanentemente, para lo cual en el presente trabajo se realizará la toma de medidas de consumo en la etapa de transmisión que pertenece al sistema de supervisión y alerta temprana. El aporte de la presente investigación es caracterizar el consumo energético y el diseño de un sistema de generación eléctrica basado en energía solar fotovoltaica que permita un ahorro en el consumo de energía y cree como resultado un mayor tiempo de autonomía, además la comunicación en el enlace (Cotopaxi-ESPE) funcione de forma permanente.

1.3 Alcance del Proyecto

Determinación de las características de consumo de los elementos que forman parte de la etapa de transmisión a diferentes potencias de transmisión en el enlace, a través de gráficas que describen las estadísticas de consumo energético e identificar en qué condiciones se produce menos consumo de corriente comparando los sistemas en AC y en DC.

Diseñar un sistema de generación eléctrica basado en energía solar fotovoltaica cuya eficiencia permita menores pérdidas debido a la transferencia de energía y que garantice que la etapa de transmisión funcione de forma permanente.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Caracterizar el consumo energético para la alimentación de la etapa de transmisión del sistema de supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi.

1.4.2 Específicos

- Investigar el contexto teórico-práctico de sistemas de generación eléctrica basados en energía solar fotovoltaica.
- Implementar el enlace punto a punto Cotopaxi-ESPE.
- Caracterizar el consumo energético de la etapa de transmisión mediante gráficas.
- Diseñar un sistema de generación eléctrica basado en energía solar fotovoltaica para la alimentación de la etapa de transmisión.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Sistemas de Monitorización

Actualmente en la era de la información y comunicación se busca mitigar los riesgos producidos por distintos fenómenos naturales (Erupciones, Terremotos, Deslizamientos, Huracanes, Inundaciones, Maremotos, etc.) mediante estudios coordinados y planificados. Es por este motivo que se están haciendo uso de herramientas tecnológicas que permiten obtener, enviar, analizar y representar los datos para manejar los riesgos, detectar amenazas, evaluar vulnerabilidades, obtener respuestas tempranas y reconstruir los sitios afectados después de las catástrofes (OEA, 1991).

2.1.1 Sistemas de Alerta Temprana

El principal objetivo de un sistema de alerta temprana es disminuir el tiempo de respuesta de la población a cualquier catástrofe natural. El sistema de alerta temprana exige una rápida y alta fidelidad en la transmisión de datos, además de una adecuada capacitación de los habitantes ubicados en la zona de riesgos.

Con la evolución de las telecomunicaciones, es posible monitorear variables de forma inalámbrica en zonas de difícil acceso o donde la comunicación por cable es limitada, de esta manera se puede realizar un estudio y análisis de fenómenos naturales desde estaciones remotas.

2.2 Redes Inalámbricas

Se puede definir una red inalámbrica como la conexión de nodos a través de ondas electromagnéticas (infrarrojo y radio) sin requerir de una conexión física (Kioskea, 2014). Las ventajas y desventajas de las redes inalámbricas se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1
Ventajas y Desventajas de las Redes Inalámbricas

Ventajas	Desventajas
Ausencia de cables físicos	Menor Ancho de Banda
Economía	Inseguridad
Alcance a grandes distancias	Obstrucciones
Permite realizar conexiones múltiples	Interferencias
Facilidad de instalación	Peligro por radiaciones ionizantes

Fuente: (Juliá, s.f.)

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) creó un grupo de trabajo específico denominado 802.11 con la finalidad de que las redes pudieran existir sin problemas de compatibilidad definiendo el uso del nivel físico y de enlace de datos (subcapa MAC) especificando sus normas de funcionamiento.

A continuación, se crea la asociación *Wireless Ethernet Compatibility Alliance* (WECA) que posteriormente pasó a llamarse *Wireless Fidelity Alliance* cuya finalidad fue fomentar la tecnología inalámbrica asegurando la compatibilidad de los equipos. Seguidamente se certificó la norma 802.11b y hasta la actualidad han surgido nuevos estándares que presentan mejoras en cuanto a velocidad y cobertura como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2
Modificaciones del estándar 802.11

Nombre del Estándar	Velocidad Teórica	Velocidad Práctica	Frecuencia	Ancho de Banda	Año
802.11	2 Mbps	1 Mbps	2,4 GHz	22 MHz	1997
802.11a	54 Mbps	22 Mbps	5,4 GHz	20 MHz	1999
802.11b	11 Mbps	6 Mbps	2,4 GHz	22 MHz	1999
802.11g	54 Mbps	22 Mbps	2,4 GHz	20 MHz	2003
802.11n	600 Mbps	100 Mbps	2,4 GHz; 5,4 GHz	20/40 MHz	2009
802.11 ac	6.93 Gbps	100 Mbps	5,4 GHz	80 o hasta 160 MHz	2013
802.11 ad	7.13 Gbps	Hasta 6 Gbps	60 GHz	2 MHz	2012

Fuente: (Carrodeguas, 2016)

2.2.1 Modos de Funcionamiento

Independent Basic Service Set (IBSS)

En esta configuración, los nodos (estaciones) se comunican directamente entre sí, sin la necesidad de existir un nodo coordinador o punto de acceso. Cada nodo se debe encontrar dentro del rango de alcance de otro para que se pueda llevar a cabo la comunicación como se observa en la figura 1 (Flores Villafuerte & Narváez, 2011).

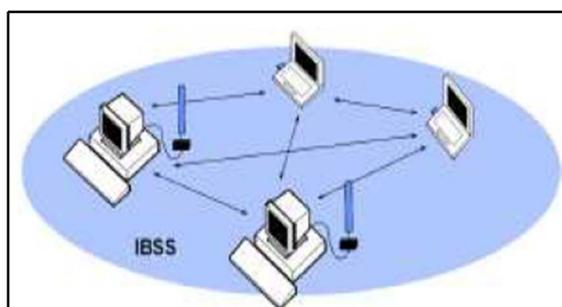


Figura 1: Dispositivos configurados en modo Ad-Hoc

Fuente: (Flores Villafuerte & Narváez, 2011)

Basic Service Set (BSS)

Todas las estaciones se comunican a través de un controlador centralizado conocido como Punto de Acceso (AP – Access Point) que es el encargado de realizar las tareas de administración de la red. Este modo de funcionamiento se ve en la figura 2.

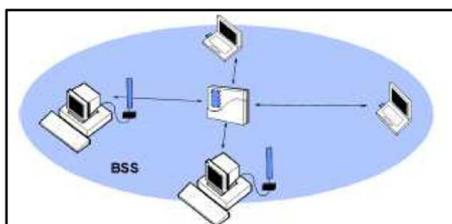


Figura 2: Dispositivos configurados en modo Infraestructura
Fuente: (Flores Villafuerte & Narváez, 2011)

Extended Service Set (ESS)

Esta configuración corresponde a varios BSSs (Basic Service Set) interconectados entre sí mediante un sistema de distribución (*Distribution System DS*) que permiten cubrir áreas mayores realizando la conexión por medios inalámbricos o cableados.

Todas las estaciones pueden comunicarse dentro de la red ESS y pueden acceder a Internet a través de un nodo *gateway* que trabaja en modo *bridge*.

En la Figura 3, se puede observar un Set de Servicios Extendidos.

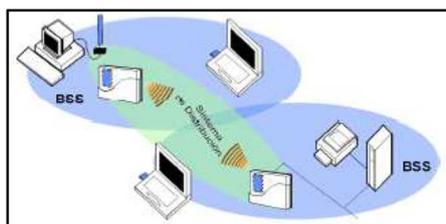


Figura 3: Conjunto de Servicios Extendidos
Fuente: (Flores Villafuerte & Narváez, 2011)

2.2.3 Redes de Sensores Inalámbricos

Una red de sensores inalámbricos (WSN) está compuesta por un conjunto de nodos sensores los cuales tienen autonomía y están distribuidos en amplios espacios que se comunican entre sí para realizar el monitoreo de condiciones físicas o ambientales. En las redes de sensores inalámbricos el rendimiento está muy relacionado con el protocolo de enrutamiento y pueden ser clasificados de acuerdo con la técnica de enrutamiento, el procedimiento de establecimiento de ruta, funcionamiento de protocolo, etc (Kumar, Gupta, Tiwari, & Tripathi, 2013). En la tabla 3 se muestra las características de los protocolos de enrutamiento.

Tabla 3
Protocolos de Enrutamiento

Clases de protocolos	Características
Protocolos de tipo proactivo	Establecen rutas antes de que exista una demanda real de tráfico. Adecuados para el tráfico en tiempo real. Baja latencia. No son energéticamente eficientes. Desperdician ancho de banda por las actualizaciones periódicas.
Protocolos reactivos	Configuran las rutas bajo demanda. Adecuados para redes de poco tráfico. Ahorran energía. No desperdician ancho de banda durante períodos de inactividad.
Protocolos híbridos	Combinan lo mejor de ambos protocolos.

Fuente: (Kumar, Gupta, Tiwari, & Tripathi, 2013)

2.2.3.1 Elementos de una red de sensores inalámbricos (WSN)

Gateway

Un sistema WSN incorpora un Gateway que provee conectividad inalámbrica de regreso a una red TCP/IP y sus nodos se encuentran distribuidos como se observa en la figura 4.

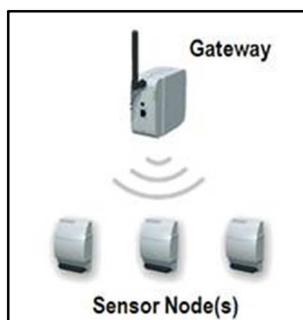


Figura 4: Sistema WSN

Fuente: (National_Instruments, ¿Qué es una Red de Sensores Inalámbricos?, 2009)

Motas

Las motas dotan de comunicación y procesamiento al nodo sensor, son resistentes a la intemperie y a terrenos inhóspitos. La información tomada a través del sensor es enviada de forma inalámbrica a la estación base (Archila & Santamaría, 2013).

Una mota tiene los siguientes componentes:

- . Baterías
- . CPU
- . Memoria Flash
- . Memoria para datos programas
- . Sensores de luz, humedad, presión, etc.
- . Radio para comunicar con otras motas.
- . Conversor analógico-digital.

Estación Base

Es un recaudador de datos basado en un ordenador común (Archila & Santamaría, 2013).

Arquitecturas

De acuerdo a las especificaciones IEEE 802.15.4, las redes WSN tienen un identificador de red, definido por un campo denominado PanID PAN identifier. Dentro de una misma Red de área personal (PAN) existen dos clases de dispositivos, *Full Function Device* (FFD) y *Reduced Function Device* (RFD).

Los FFD son dispositivos que realizan el enrutamiento y reenvío de paquetes de datos hacia otros nodos.

Los RFD no tienen la capacidad de comunicarse con otro dispositivo RFD, a menos que antes pase por un FFD que cumpla las funciones de router, además los RFD tienen muy baja capacidad de procesamiento y por lo general su alimentación es con baterías permitiendo transmitir información de una variable (por ejemplo, temperatura) de manera periódica (Ferrer Riera, 2010).

De esta manera hay dos topologías para las de redes IEEE 802.15.4, que se describen en la tabla 4.

Tabla 4
Topologías para las de redes IEEE 802.15.4

Topologías	Características
Estrella	En esta topología un dispositivo FFD realiza las funciones de coordinador de la red de área personal. Todos los datos entre nodos que pertenecen a la red de área personal pasan siempre primero por el coordinador.
Peer-to-Peer (P2P)	En esta topología al igual que la estrella tiene un nodo que realiza la función de coordinador, sin embargo, en la topología P2P los dispositivos FFD pueden comunicarse directamente.

Fuente: (Ferrer Riera, 2010)

2.3 Sistemas Fotovoltaicos autónomos

Existen dos tipos fundamentales de sistemas fotovoltaicos de acuerdo a su relación con la red eléctrica convencional, los sistemas fotovoltaicos conectados o enganchados los cuales necesitan de la conexión a la red eléctrica para realizar su función generadora de energía y los sistemas fotovoltaicos autónomos o aislados (SFA) que no requieren de conexión a la red eléctrica y pueden trabajar de forma independiente para proveer energía a los equipos, estos sistemas se adaptan bien en lugares remotos donde hay buen recurso solar y bajo consumo de energía eléctrica, por ejemplo son utilizados en los sistemas de alerta temprana como la solución más apropiada para alimentar dispositivos electrónicos (Style, 2012).

Los sistemas fotovoltaicos autónomos pueden ser diseñados en corriente directa (DC) o en corriente alterna (AC), los sistemas en DC son utilizados para trabajar con bajas tensiones (12V o 24V DC), pero en su mayoría los equipos consumen energía eléctrica alterna por lo que requieren de inversores para transformar la corriente continua en corriente alterna.

En la figura 5 se muestra un sistema fotovoltaico autónomo en su forma más básica.

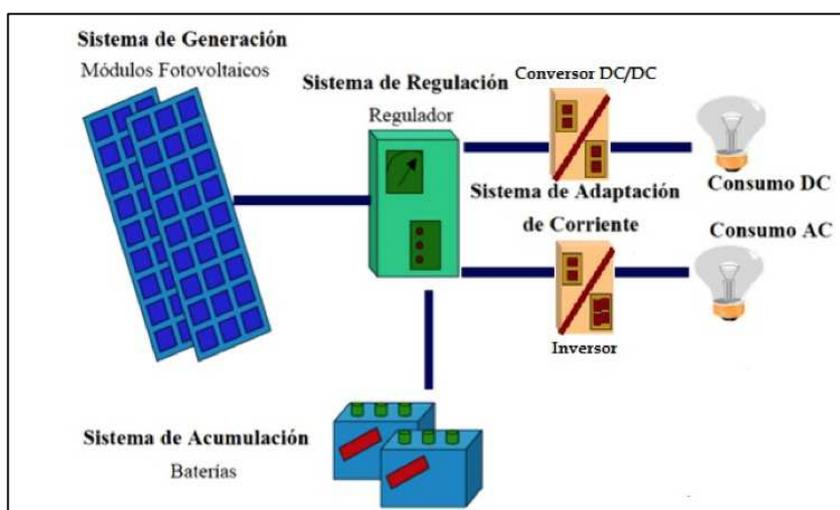


Figura 5: SFA en corriente directa y alterna
Fuente: (SunFields, 2015)

2.3.1 Elementos de un Sistema fotovoltaico autónomo

2.4.1.1 Generador

El modulo fotovoltaico se encarga de convertir la radiación solar en energía eléctrica, para definir su comportamiento se analiza su curva característica corriente versus voltaje como se muestra en la figura 6.

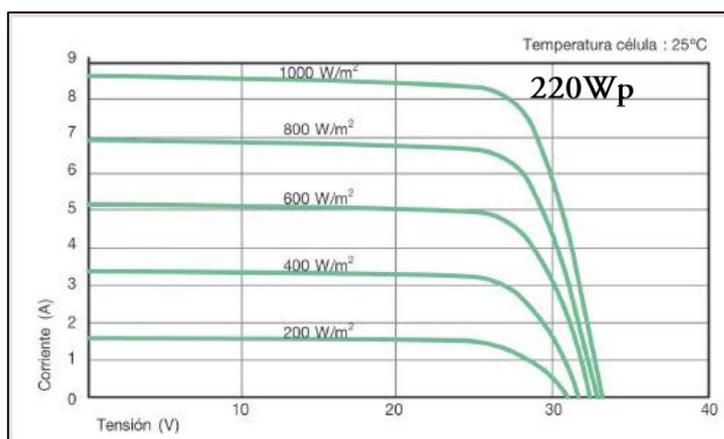


Figura 6: Curva I-V panel fotovoltaico con diferentes radiaciones

En la tabla 5, se describen los tipos de paneles fotovoltaicos

Tabla 5
Tipos de paneles fotovoltaicos

Monocristalinos	Policristalinos	Amorfos- <i>Thin Film</i>
Los paneles monocristalinos se fabrican a base de lingotes puros de silicio.	Los paneles policristalinos se fabrican a partir de la refundición de piezas de silicio monocristalino.	Las células de silicio amorfo, se obtienen a partir de la deposición de capas delgadas sobre vidrio.
Eficiencia 15-23%	Eficiencia 15-18%	Eficiencia 6-14%
25-35 años de vida útil	23-27 años de vida útil	10-17 años de vida útil
Costo de Watt Pico (Wp) un poco mayor que los paneles policristalinos.	Menor costo por Watt Pico (Wp) que un panel monocristalino.	Costo por Watt Pico (Wp) menor que un panel policristalino.

Continúa →



Fuente: (Puig & Jofra, 2007)

2.4.1.2 Acumulador

Es una batería o arreglo de baterías en serie y paralelo que almacenan la energía eléctrica proveniente del panel solar durante el día para usarse en los equipos durante la noche. Es la parte más sensible del SFA. Los tipos de acumuladores se muestran en la tabla 6.

Tabla 6:
Tipos de acumulador

Plomo Acido	Litio	Níquel Cadmio
Bajo costo	Alto costo	Costo intermedio
Mayor Peso	Menor peso	Efecto memoria
Muy contaminante	Debe ser cargado correctamente, tiene probabilidad de explotar.	Poco utilizado.



Fuente: (RITAR, 2016)

2.4.1.3 Regulador

Cumple con la función de controlar la energía producida por el panel solar, la carga de las baterías y el consumo de energía de los equipos. El regulador cumple con funciones adicionales como proteger la batería contra sobre-cargas, por ejemplo, cuando la batería está totalmente cargada y existe abundante luz solar, evita una sobrecarga reduciendo la corriente que llega a la batería.

También protege la batería en sobre-descarga, si la batería no logra responder a la exigencia del consumo eléctrico, el regulador desconecta la carga. Así mismo este elemento brinda información sobre el estado del sistema con luces o en una pantalla LCD, los datos que se muestran incluye el estado de carga de las baterías y monitorización del voltaje.

Tipos de Reguladores

Existen distintos tipos de reguladores que se muestran en la tabla 7.

Tabla 7
Características de los Reguladores

Tipo PWM	Tipo MPPT
Para pequeñas instalaciones.	Utilizados en instalaciones de mayor tamaño.
Menor costo.	Mayor costo
Menor eficiencia.	Eficiencia 30% superior a los reguladores con PWM.
Para baterías de plomo ácido	Para varios tipos de baterías.



Fuente: (RITAR, 2016)

2.4.1.4 Carga

Son los equipos que consumen la energía producida por el sistema, para describir la etapa de la carga vamos a dividir en dos tipos:

Carga AC

La mayoría de equipos consumen corriente alterna, para poder utilizar estos equipos en un SFA se necesita un convertidor DC-AC que convierta la corriente continua de las baterías en corriente alterna.

A continuación, en la figura 7 se muestra un esquema de un SFA en corriente alterna.

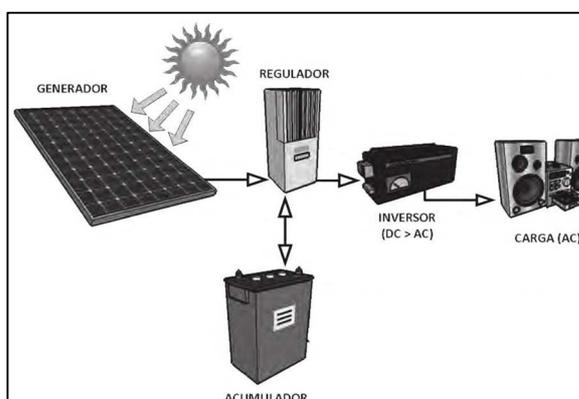


Figura 7: Sistema Fotovoltaico corriente AC

Fuente: (Style, 2012)

Carga DC

Debido a que las baterías proporcionan tensión en corriente continua de 12V o 24V, se puede realizar la alimentación directa en cargas que funcionan en DC, pero si la carga requiere un voltaje de alimentación diferente de 12V o 24V se implementan dispositivos llamados convertidores DC-DC, que son dispositivos que transforman una

tensión continua con características determinadas a partir de otro nivel de tensión continua. En la figura 8 se muestra un esquema de un SFA en corriente continua.

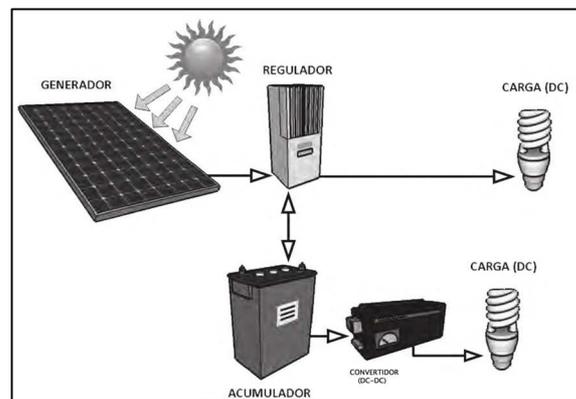


Figura 8: Sistema Fotovoltaico corriente DC

Fuente: (Style, 2012)

2.4.1.5 Convertidores DC - DC

Los convertidores DC- DC son circuitos de potencia que se utilizan para convertir una señal continua en otra señal continua correspondiente a un valor regulado. Estos elementos controlan la carga y descarga en los elementos pasivos que almacenan energía (bobinas, capacitores) logrando un cambio en el nivel de tensión continua cuyo flujo de energía es determinado por elementos conmutadores (Ortega, 2002).

Como en cualquier dispositivo electrónico existe un pequeño consumo de energía por parte de los elementos del convertidor es por este motivo que la potencia de salida es algo menor que la potencia de entrada.

Existen varios tipos de convertidores DC-DC, pero las tres formas de configuraciones básicas son: Convertidor Buck (reductor), Convertidor Boost (elevador), Convertidor Buck – Boost (elevador - reductor) que se basan en el principio de almacenamiento y transferencia de energía en ciclos de conmutación.

Convertidor Buck: Es conocido como convertidor conmutado reductor (Step - Down) cuya función es mantener el voltaje de salida inferior al voltaje de entrada frente a variaciones de la tensión de entrada.

Convertidor Boost: Es conocido como convertidor conmutado elevador (Step - Up) cuya función es mantener el voltaje de salida en un nivel superior respecto al voltaje de entrada.

Convertidor Buck - Boost: Es conocido como convertidor conmutado reductor – elevador que permite trabajar como reductor o elevador. Típicamente se encuentra en algunas fuentes conmutadas.

El rendimiento de los convertidores puede variar obteniendo un rendimiento del 95% en el modo boost y del 92% en el modo buck para aplicaciones fotovoltaicas (Roca, 2013).

2.3.2 Fuentes de Energía Renovables

Las Energías Renovables son una alternativa a los combustibles fósiles (carbón, gas natural, petróleo). Este tipo de energía son ideales para cuidar el medio ambiente y se encuentran en la naturaleza en cantidades ilimitadas las cuales se pueden regenerar de manera natural o artificial (Calvo, 2012). Entre los distintos tipos de Energías Renovables se pueden mencionar las siguientes:

- Energía Solar
- Energía Eólica
- Energía Geotérmica
- Energía Hidráulica
- Energía Hidroeléctrica
- Energía Mareomotriz
- Energía de Biomasa

Energía Solar

El sol es la fuente principal de energía y vida en nuestro planeta puesto que regula diversos ciclos (químicos, geofísicos, bioquímicos), además es el origen de diversas fuentes renovables (energía hidroeléctrica, mareomotriz, biomasa) ya que induce el movimiento del viento, agua y controla el crecimiento de las plantas permitiendo que realicen el proceso de fotosíntesis con lo cual mantiene la vida en la Tierra (Arenas & Zapata, 2011).

En la actualidad, se están desarrollando diversas aplicaciones que utilizan la energía solar como principal fuente de alimentación, también se han creado diversos dispositivos que permiten captar y utilizar adecuadamente este tipo de energía renovable.

Radiación Solar

El término radiación solar hace referencia al flujo de energía proveniente del sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (luz visible, luz infrarroja, luz ultravioleta). La radiación visible se muestra en la figura 9.

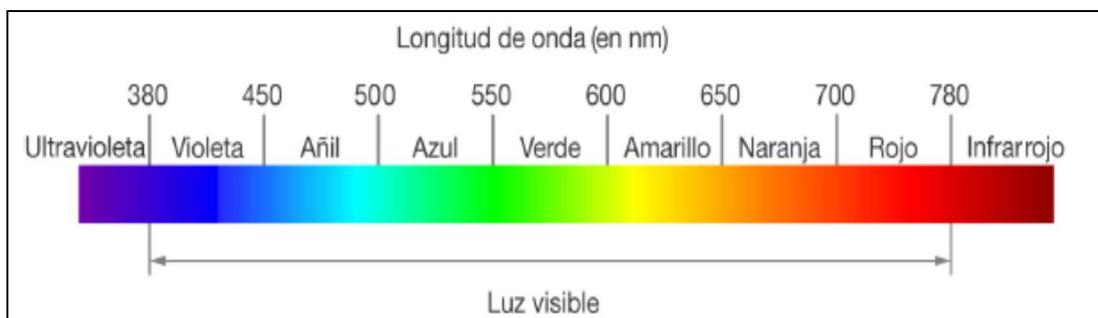


Figura 9: Radiación Visible por el Ojo Humano
Fuente: (Briseño, 2017)

A continuación, en la tabla 8, se detallan los distintos tipos de radiación.

Tabla 8
Tipos de Radiación

Tipos de Radiación	Longitud de Onda	Características
Radiación Ultravioleta	Longitud de onda menor a 360 nm.	Esta radiación es absorbida por la capa de ozono de la Tierra previniendo el cáncer de piel.
Luz Visible	Entre 360 nm y 760 nm.	La luz visible puede traspasar la capa de ozono pero es parte de ella es absorbida o reflejada por polvo o nubes.
Radiación Infrarroja	Longitud de onda mayor a 760 nm.	Esta radiación es absorbida con mucha intensidad por vapor de agua, CO ₂ , nubes.

Fuente: (Bejarano, 2011)

La radiación recibida en el planeta no tiene una magnitud uniforme en todos sus puntos debido a la posición relativa de la Tierra con respecto al Sol y al movimiento de traslación como se puede ver en la figura 10, de esta manera los lugares que se encuentran cercanos a la línea Ecuatorial reciben la mayor parte de la radiación solar emitida, por el contrario, los polos son los lugares que reciben la menor cantidad de radiación durante el año (Bejarano, 2011).

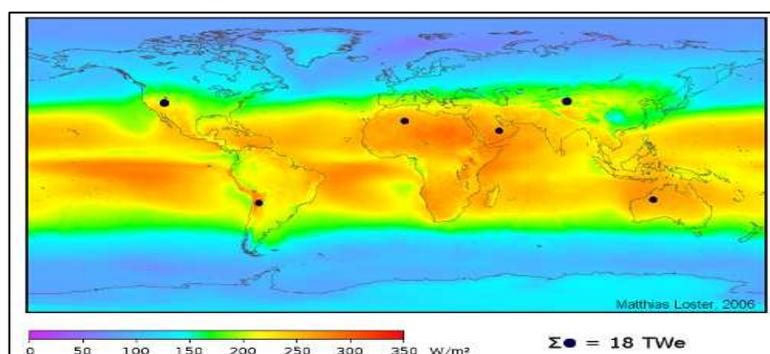


Figura 10: Radiación Solar
Fuente: (Loster, 2010)

La radiación solar que incide en una superficie del planeta, se puede manifestar de varias maneras como se muestra en la tabla 9 y en la figura 11.

Tabla 9
Tipos de Radiación

Tipo de Radiación	Características
Radiación Directa	Proviene directamente del Sol sin sufrir cambios en su trayectoria. Proyecta una sombra sobre los objetos opacos que la reciben.
Radiación Difusa	Radiación que proviene de la atmósfera por dispersión de parte de la radiación en esta. No proyecta sombra sobre los objetos.
Radiación Reflejada	Radiación reflejada por la superficie terrestre, la cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie llamado albedo.
Radiación Global	Suma de las tres radiaciones.

Fuente: (Arenas & Zapata, 2011)

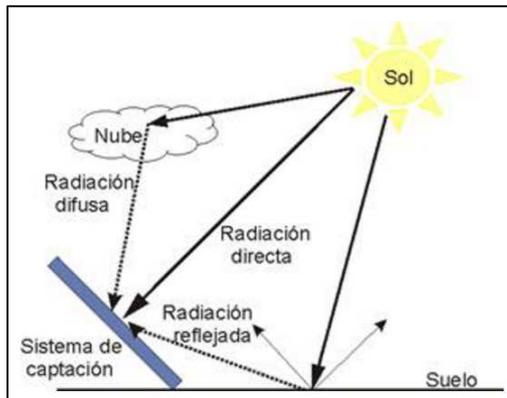


Figura 11: Tipos de Radiación

Fuente: (Pacco, 2010)

La magnitud que mide la radiación solar en un área de la superficie de la Tierra se conoce como **Irradiancia** y se mide en [W/m^2]. Otro factor importante a conocer es la **Insolación** que se define como la cantidad de energía solar que se recibe durante un intervalo de tiempo y se mide en unidades de [Wh/m^2] o [Kwh/m^2]. Para el diseño del Sistema Fotovoltaico es necesario conocer los datos de insolación de cada mes del año

que se expresa frecuentemente en *horas solares pico* es decir la energía que es recibida durante una hora a una Irradiancia promedio de 1Kwh/m^2 .

Existen diversas maneras para conocer la Hora Solar Pico, entre las más conocidas está el uso de un **Atlas Solar**, mediante *Software* o a través de **Datos del Servicio Meteorológico**, en la tabla 10 se mencionan distintos softwares para la obtención del recurso solar.

Tabla 10
Software para obtener datos solares

PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System	Meteonorm	Nasa – Surface meteorology and Solar Energy
Software ideal para estimar un sistema de producción de Energía Solar Fotovoltaica. Esta aplicación calcula el potencial de generación eléctrica E [kWh] de un sistema fotovoltaico con la inclinación y orientación de los módulos. Sólo disponible para países en Europa, África y Asia.	Es un software licenciado que suministra datos meteorológicos precisos para cualquier lugar de la Tierra como irradiación, temperatura, precipitación, viento, humedad entre otros parámetros. Hace uso de 5 satélites geoestacionarios.	A través de este Software, NASA promueve el uso de los datos solares y meteorológicos para el diseño de sistemas fotovoltaicos y energías renovables. Se basa en satélites y ha demostrado ser lo suficientemente preciso para proporcionar datos fiables sobre recursos solares y meteorológicos.
		

Para obtener los datos solares necesarios para el diseño, se ha decidido utilizar el software **Nasa – Surface meteorology and Solar Energy** disponible en el sitio web (Nasa, 2016). Haciendo uso de esta herramienta tecnológica, se procede a ingresar los datos de latitud y longitud del Refugio José Rivas (Cotopaxi), a continuación, se indica en la tabla 11 los datos de la hora solar pico.

Tabla 11
Cálculo de Hora Solar Pico en el Cotopaxi.

Mes de Año	Insolación Incidente promedio(kWh/m ² /día)
Enero	4,13
Febrero	4,34
Marzo	4,55
Abril	4,33
Mayo	4,12
Junio	4,01
Julio	4,26
Agosto	4,46
Septiembre	4,26
Octubre	4,24
Noviembre	4,30
Diciembre	3,98

Fuente: (Nasa, 2016)

El resultado de la hora solar pico se puede visualizar en la figura 12.

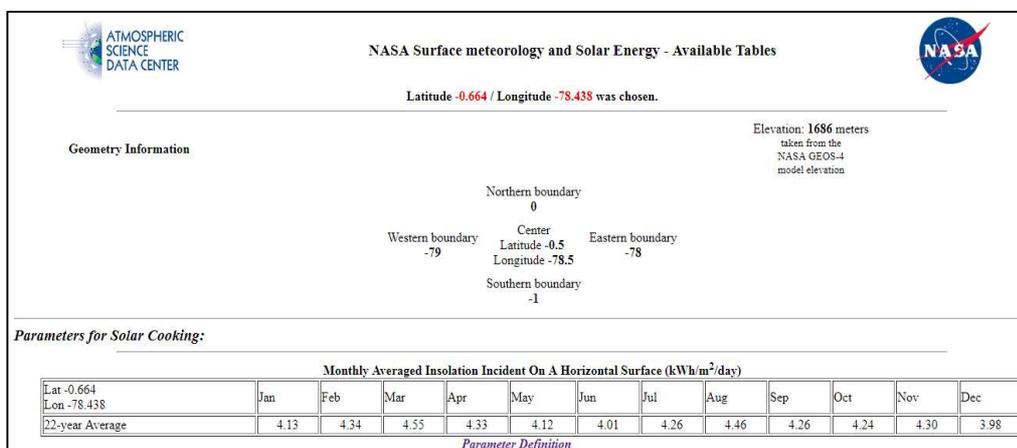


Figura 12: Cálculo de Hora Solar Pico a través del Software de la Nasa
Fuente: (Nasa, 2016)

2.4 Dimensionado de un Sistema Fotovoltaico

En la actualidad existe una gran variedad de métodos para dimensionar Sistemas Fotovoltaicos autónomos que van desde métodos muy complicados que requieren de

programas informáticos hasta otros que sólo requiere de cálculos matemáticos que lo puede realizar el diseñador.

Como lo mencionan (Aguilera & Leocadio, 2005), el método presentado a continuación es muy sencillo y proporciona buenos resultados para iniciar con la fase de diseño del Sistema Fotovoltaico.

1. Estimación del Consumo Energético
2. Cálculo del ángulo óptimo de inclinación de los paneles
3. Dimensionamiento del sistema de acumulación (Baterías)
4. Dimensionamiento del generador fotovoltaico
5. Dimensionamiento del Regulador
6. Dimensionamiento del Inversor

2.4.1 Estimación del Consumo Energético

La demanda de energía para el Sistema Solar Fotovoltaico es una característica fundamental por lo que en su planificación se deben tener en cuenta todos los elementos eléctricos y electrónicos utilizados en el sistema.

Cálculo del consumo teórico (sin pérdidas)

Es necesario realizar el cálculo de la energía diaria que requieren todos los elementos, para ello se debe determinar individualmente las potencias de todos los dispositivos del sistema junto con el tiempo medio de uso de cada uno de ellos, en caso de duda se debe asignar un margen superior de potencia (Aguilera & Leocadio, 2005).

La expresión para calcular la energía, se presenta a continuación:

$$EAC = \sum P(AC)i * tdi \quad (1)$$

$$EDC = \sum P(DC)i * tdi \quad (2)$$

Donde:

EAC: Energía consumida por los dispositivos en AC.

EDC: Energía consumida por los dispositivos en DC.

Pi: Potencia Nominal [W]

tdi: Tiempo diario de uso

Por lo tanto, el consumo diario total (teórico) es el resultado de la suma de la energía consumida por los dispositivos en corriente alterna y en corriente continua como se presenta a continuación:

$$ET = EAC + EDC \quad (3)$$

Cálculo del consumo real (con pérdidas)

Una vez que se obtiene el consumo teórico, se procede a calcular el consumo real que es superior puesto que se toma en cuenta pérdidas en cables, rendimiento en los equipos, etc (Cantos, 2016).

Así, el consumo real diario viene dado por la fórmula:

$$E = \frac{ET}{R} \quad (4)$$

Donde R corresponde al parámetro de rendimiento global en función de las pérdidas en los distintos equipos (batería, inversor, regulador) y viene dada por la fórmula 5.

$$R = (1 - Kb - Kc - Kv) * \left(1 - \frac{Ka * N}{Pd}\right) \quad (5)$$

En la tabla 12 se muestran los factores de pérdida necesarios para calcular el rendimiento.

Tabla 12:
Factores para cálculo Rendimiento Global

Factor	Descripción	Valores Predeterminados
Kb	Factor de pérdidas en batería y regulador	0,1
Kc	Factor de pérdidas en inversor	0,1
Kv	Factor de pérdidas diversas (caídas de tensión, efecto Joule, etc).	0,1
Ka	Coefficiente autodescarga diaria de las baterías.	0,005
N	Número de días de autonomía	3-10
Pd	Profundidad de descarga de las baterías	0,7

Fuente: (Cantos, 2016)

2.4.2 Cálculo del ángulo óptimo de inclinación de los paneles

Como regla general, la orientación de los paneles solares debe ser opuesta al hemisferio en el que se desea realizar la instalación; como el Ecuador se encuentra en el hemisferio sur, los paneles deben apuntar hacia el hemisferio norte cuyo ángulo de inclinación se calcula de acuerdo a la fórmula 6.

$$\text{Ángulo de Inclinación} = 15^\circ + \text{Latitud} \quad (6)$$

2.4.3 Dimensionamiento del sistema de acumulación (Baterías)

Para un correcto dimensionamiento del sistema de acumulación (Baterías), se debe tener en cuenta los parámetros que se muestran en la tabla 13.

Tabla 13
Parámetros para dimensionamiento de Baterías

Parámetros	Descripción
Máxima Profundidad de Descarga	Nivel máximo de descarga permitido al batería previo a la desconexión del regulador. Este valor varía dependiendo del tipo de baterías (0.7 para baterías de plomo ácido)
Días de Autonomía	Corresponde al número de días consecutivos que el sistema puede suministrar el consumo sin sobrepasar la profundidad de descarga en ausencia del Sol. Este parámetro se ve afectado por el tipo de instalación y las condiciones climáticas del lugar

Fuente: (Aguilera & Leocadio, 2005)

Las expresiones que se utilizan para dimensionar la capacidad de las baterías son:

$$Cu (Wh) = \frac{E*N}{R} \quad (7)$$

$$Cu(Ah) = \frac{E*N}{R*VDC} \quad (8)$$

Donde:

Cu: Capacidad útil del acumulador

E: Consumo real diario (Wh).

R: Rendimiento

N: Días de autonomía

VDC: Voltaje nominal de la batería.

$$C(Ah/día) = \frac{Cu}{Pd} \quad (9)$$

Donde:

C: Capacidad de la Batería a una temperatura de 25° C.

Pd: Profundidad de descarga

Es necesario mencionar que los períodos de autonomía cortos, dan mayor fiabilidad al sistema y alargan la vida de las baterías.

También es necesario conocer el número de baterías que se deben instalar en serie y en paralelo cuyo cálculo se explica en las fórmulas 10 y 11.

$$BP = \frac{C}{Cc} \quad (10)$$

$$BS = \frac{Vdc}{V} \quad (11)$$

Donde:

BP: Número de baterías en paralelo.

BS: Número de baterías en serie.

C: Capacidad Requerida.

Cc: Capacidad de la batería comercial.

Vdc: Tensión del sistema DC.

V: Voltaje de la batería.

2.4.4 Dimensionamiento del generador fotovoltaico

Para realizar el diseño del generador fotovoltaico, se utilizan las siguientes expresiones:

$$Ep (Wh/día) = \frac{E}{R*(1-Pr)} \quad (12)$$

Donde:

E: Consumo real diario (Wh).

R: Rendimiento

Pr: Pérdida del regulador.

$$Pp (Ep/HPS) \quad (13)$$

Donde:

Pp: Potencia pico de la instalación.

HSP: Hora solar pico.

Ep: Energía necesaria incluida pérdida de regulador.

$$Np = Pp/P(pmp) \quad (14)$$

Donde:

Np: Número de paneles.

Pp: Potencia pico del sistema.

$P(pmp)$: Potencia pico del panel solar.

Se debe tener en cuenta que el número de paneles debe ser un número par.

$$V_{oc} - 10^{\circ} = (1 + Coef.Temp.Voc. - 10^{\circ} - 25^{\circ}.Voc) \quad (15)$$

Donde:

$V_{oc}-10^{\circ}$: Voltaje máximo a -10° C circuito abierto.

Coef.Temp.Voc: Coeficiente de temperatura de voltaje en circuito abierto.

2.4.5 Dimensionamiento del Regulador

Para dimensionar el regulador (elemento que permite la carga de las baterías a través del panel fotovoltaico y provee la energía para los demás elementos) es necesario obtener la corriente y voltaje máximo que ocupa la instalación.

Primero es necesario calcular el número máximo de paneles en serie mediante la fórmula 16:

$$P_{ser} = V_{maxrc}/V_{oc} - 10 \quad (16)$$

Donde:

P_{ser} : Número máximo de paneles en serie.

V_{maxrc} : Voltaje salida máximo del regulador de carga.

Ahora se calcula el número de paneles en paralelo mediante la fórmula 17.

$$P_{par} = N_p/P_{ser} \quad (17)$$

Donde:

P_{par} : Número de paneles en paralelo.

N_p : Número de paneles.

Se calcula la corriente y el voltaje máximo generada por los paneles.

$$I_{max} = I_{cc} * P_{par} * 1.25 \quad (18)$$

$$V_{max} = (V_{oc} - 10) * P_{ser} \quad (19)$$

Donde:

I_{max} : Intensidad máxima generada de los paneles.

V_{max} : Voltaje máximo generada de los paneles.

I_{cc} : Corriente a corto circuito.

P_{par} : Número de paneles en paralelo.

P_{ser} : Número de paneles en serie.

Por lo que, para elegir el regulador de carga, se deben cumplir las dos condiciones siguientes:

$$I_{max} < I_{rc} \quad (20)$$

$$V_{max} = V_{maxrc} \quad (21)$$

Donde:

I_{rc} : Intensidad de salida máxima del regulador de carga.

V_{maxrc} : Voltaje de salida máximo del regulador de carga.

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN Y MEDICIÓN DEL CONSUMO DE POTENCIA EN LA ETAPA DE TRANSMISIÓN

3.1 Descripción del sistema de supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi

Para la prevención de desastres naturales en el volcán Cotopaxi, se diseñó un sistema con dos etapas (Transmisión y Monitorización) que ha sido instalado en el Refugio José Rivas que se muestra en la figura 13.



Figura 13: Refugio José Rivas Parque Nacional Cotopaxi
Fuente: (Padilla, 2013)

3.1.1 Etapa de Transmisión

Abarca todos los equipos necesarios para realizar un Radioenlace desde el Refugio José Rivas en el Volcán Cotopaxi hasta la Universidad de las Fuerzas Armadas Espe (Sangolquí).

3.1.2 Etapa de Monitorización

Comprende el conjunto de elementos para la recolección de datos mediante sensores que se enlazan entre ellos y también con un nodo Gateway.

3.1.3 Descripción de la Etapa de Transmisión

La Etapa de Transmisión busca establecer una comunicación Punto a Punto (P2P) mediante la tecnología Wi-Fi.

Con la finalidad de resolver posibles fallos, se han diseñado dos sistemas redundantes cuyo primer enlace es entre el Refugio José Rivas (Volcán Cotopaxi) y la ESPE mientras que el segundo enlace es entre el Refugio José Rivas, el IASA y la ESPE (Apolo Cárdenas, 2011).

Los parámetros topográficos de las estaciones de transmisión y recepción se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14
Coordenadas de los Enlaces

	Tipo de Estación	Nombre de la Estación	Latitud	Longitud
Enlace	TX	Refugio José Rivas	0° 39' 49" S	78° 26' 17" O
1	RX	Edificio Administrativo	0° 18' 53" S	78° 26' 38" O

Continúa →

	TX	Refugio José Rivas	0° 39' 49" S	78° 26' 17" O
Enlace	RX	IASA 1	0° 23' 35" S	78° 24' 52" O
	2	TX	IASA 1	0° 23' 35" S
	RX	Edificio Administrativo	0° 18' 53" S	78° 26' 38" O

Fuente: (Apolo Cárdenas, 2011)

Se puede observar el esquema de la etapa de transmisión en la figura 14.

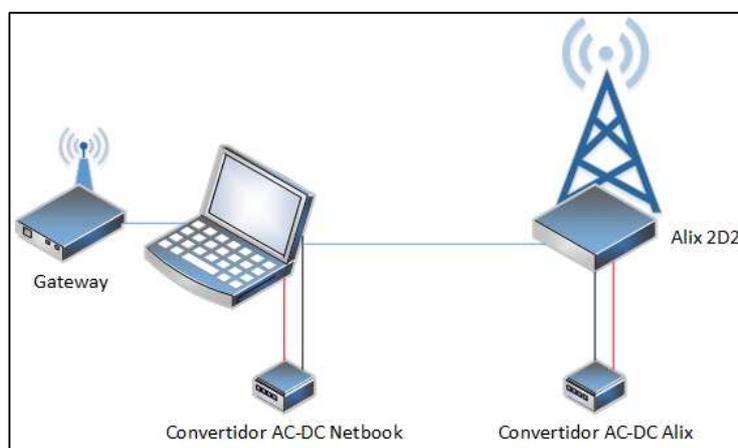


Figura 14: Esquema de la Etapa de Transmisión

A continuación, se muestran las características de los equipos de transmisión y recepción utilizados para el radioenlace en las tablas 15 y 16 respectivamente.

Tabla 15
Características de los equipos de Transmisión

Potencia de Transmisión	26 dBm
Tipo de antena	Parabólica
Ganancia de la antena de TX	24 dBi
Altura de la Antena	5 m

Fuente: (Apolo Cárdenas, 2011)

Tabla 16
Características de los equipos de Recepción

Sensibilidad del Receptor	-98 dBm
Tipo de antena	Parabólica
Ganancia de la antena de RX	24 dBi
Altura de la Antena	27 m

Fuente: (Apolo Cárdenas, 2011)

Netbook con Sistema Operativo Windows XP: Mediante este elemento se recoge la información adquirida por el Gateway y los sensores para ser transmitida hacia el receptor ubicado en la ESPE. Se procedió a usar una Netbook HP4410 que cuenta con una batería de 6 celdas (permite una duración de 11 horas) y un procesador Core 2 Duo 2.8 Ghz que se ve en la figura 15.



Figura 15: Netbook HP utilizada en el Sistema de Transmisión

Gateway con interface USB: El Gateway a utilizar es el MIB520 de la marca *Crossbow* el cual permite conectarse a través de USB con la familia de Motas IRIS y MICA. Las Motas IRIS/MICAz/MICA2 pueden enlazarse con el Gateway y funcionar como estación base. El Gateway MIB520 posee dos puertos separados uno dedicado a la comunicación de datos mediante USB y otro para programar las motas, este dispositivo no requiere de una fuente de alimentación externa puesto que ésta se realiza a través del puerto USB. El dispositivo físico se puede ver en la figura 16.



Figura 16: Gateway Crossbow

Tarjeta Alix: Es una tarjeta de transmisión para el Sistema Operativo Linux, posee dos slots miniPCI para radios WiFi así como puertos Ethernet y Serial. La tarjeta Alix junto con una Compact Flash con la Tarjeta WiFi Atheros AR5213 y con una antena transmitirá los datos recopilados por el computador en el refugio José Rivas (Volcán Cotopaxi) que serán enviados a la ESPE. La tarjeta Alix 2D2 tiene un rango de temperatura de funcionamiento entre 0 y 50°C; esta tarjeta se puede observar en la figura 17.

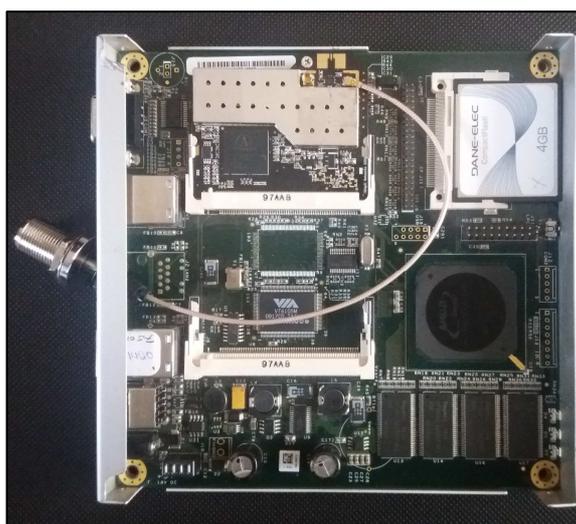


Figura 17: Tarjeta Alix 2D2

Con esta información se procede a simular los enlaces de radio utilizando el software Radiomobile previamente descargado del sitio web oficial (Coudé, 2016).

En la figura 18 se muestra el enlace directo entre el Cotopaxi y la ESPE donde se puede ver que existe línea de vista y el enlace es factible.

Enlace 1 (Cotopaxi - ESPE)

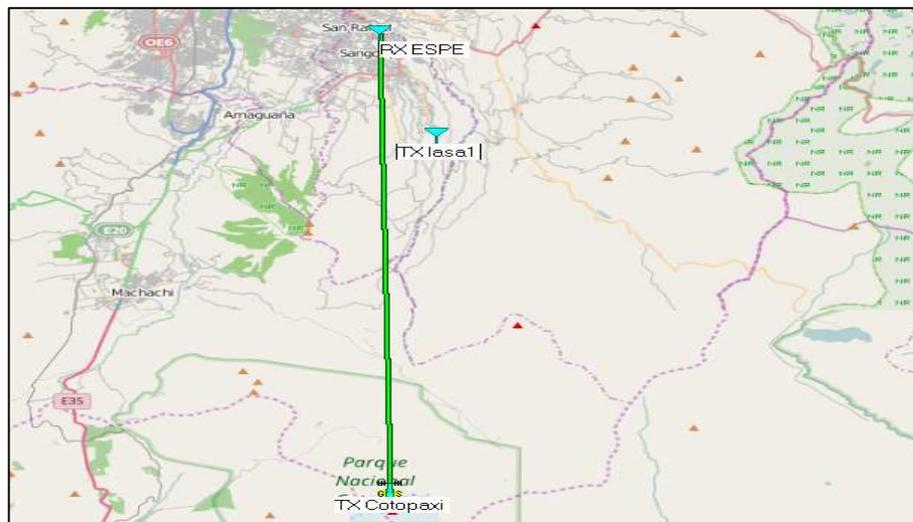


Figura 18: Ubicación de los equipos (Enlace 1)

La figura 19 muestra las características del enlace punto a punto, además presenta los parámetros como el azimut y el ángulo de elevación de las antenas.

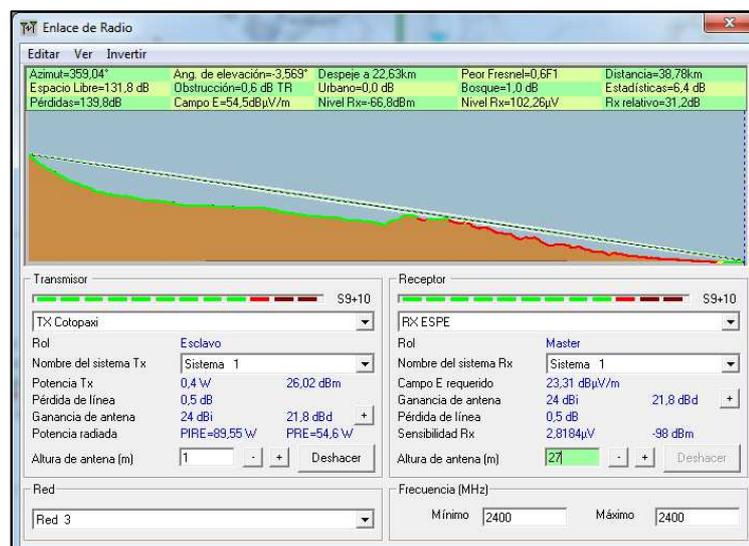


Figura 19: Características de los equipos Cotopaxi - ESPE

A continuación, en la figura 20 se muestra el obstáculo más importante en el enlace Cotopaxi – ESPE, el cual está ubicado a una distancia de 22,6 Km desde el transmisor en el Cotopaxi.

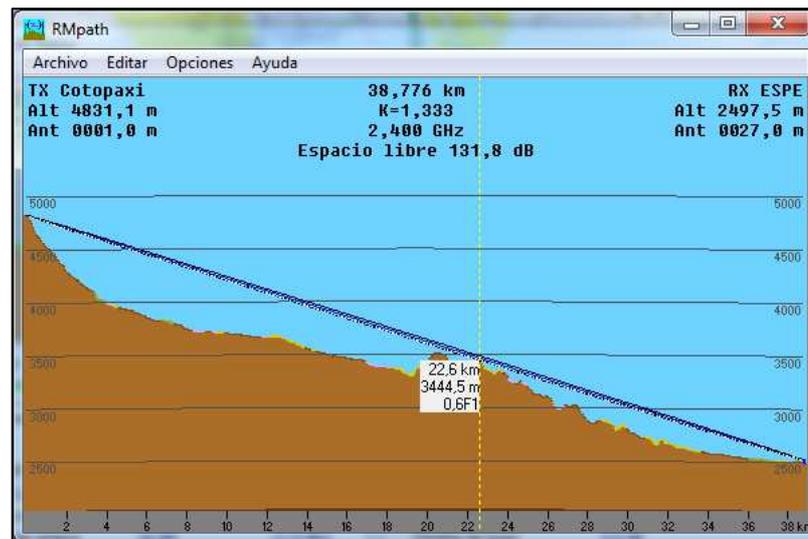


Figura 20: Despeje de la Zona de Fresnel del enlace Cotopaxi – ESPE

Los niveles de señal en relación con la distancia se muestran en la figura 21, se puede observar que se presentan zonas donde no es posible realizar el enlace, sin embargo, en el punto de interés ubicado en la ESPE posee un nivel de recepción de -66.8 dBm.

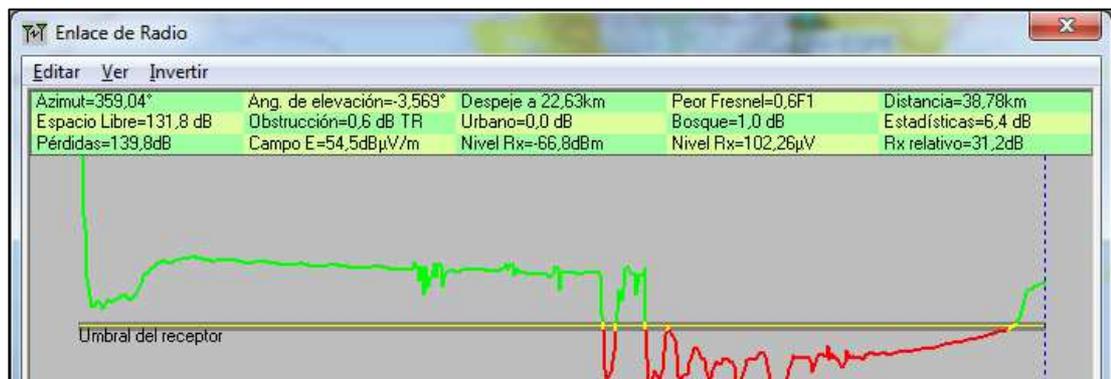


Figura 21: Nivel de la señal del enlace Cotopaxi – ESPE

En la figura 22 se muestra el enlace redundante entre el Cotopaxi, el IASA y la ESPE donde se puede ver que el enlace es factible en su totalidad.

Enlace 2 (Cotopaxi – IASA, IASA - ESPE)

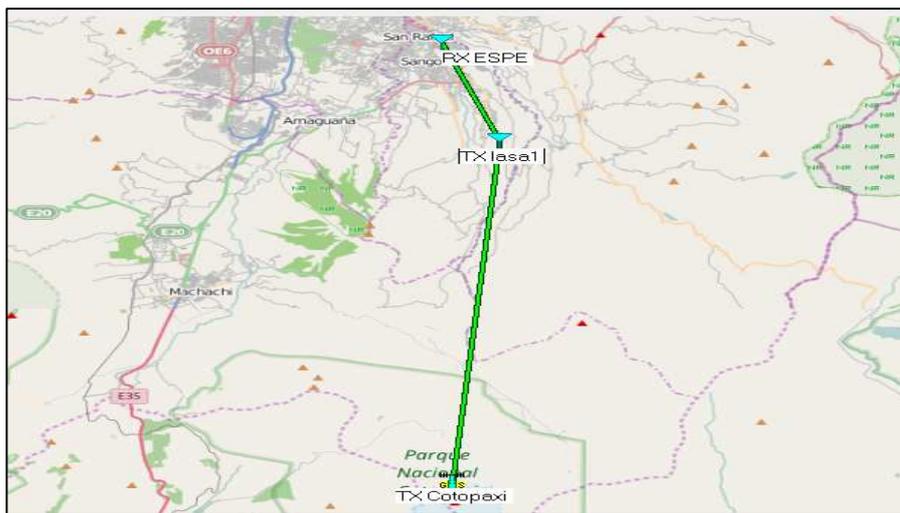


Figura 22: Ubicación de los equipos (Enlace 2)

La figura 23 muestra las características del enlace Cotopaxi - IASA, además presenta los parámetros como el azimut y el ángulo de elevación de las antenas.

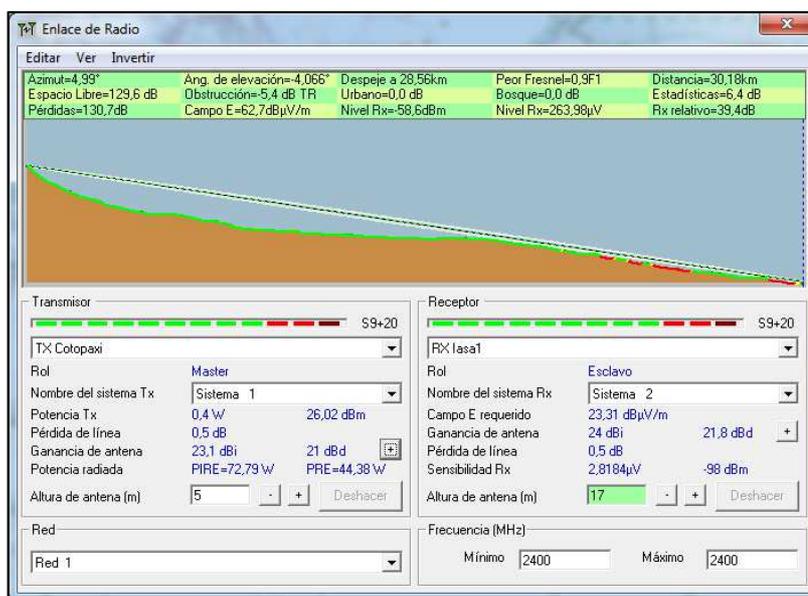


Figura 23: Características de los equipos Cotopaxi - IASA

También se muestra en la figura 24 las características de los equipos requeridos en el enlace IASA – ESPE.

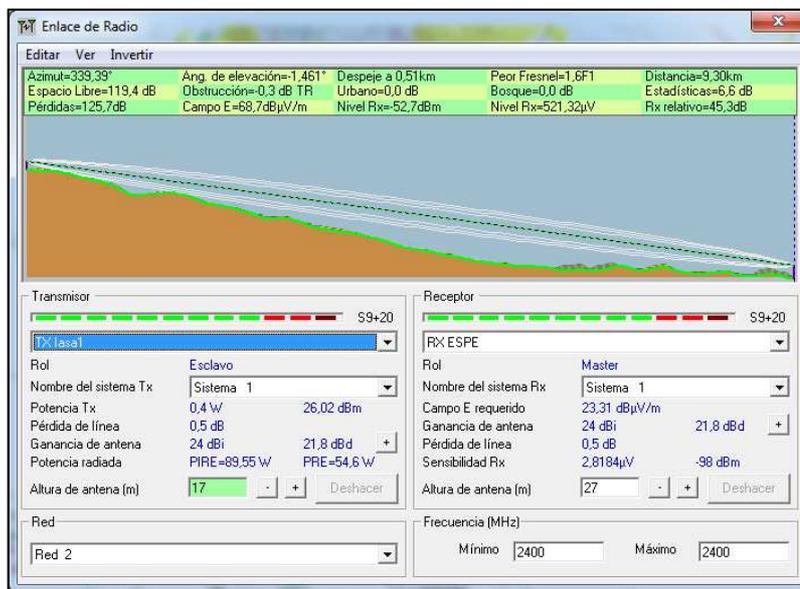


Figura 24: Características de los equipos IASA - ESPE

3.1.4 Descripción de la etapa de Monitorización.

Es el conjunto de sensores que se enlazan entre ellos y con un nodo Gateway para la adquisición de información, el esquema se puede observar en la figura 25.

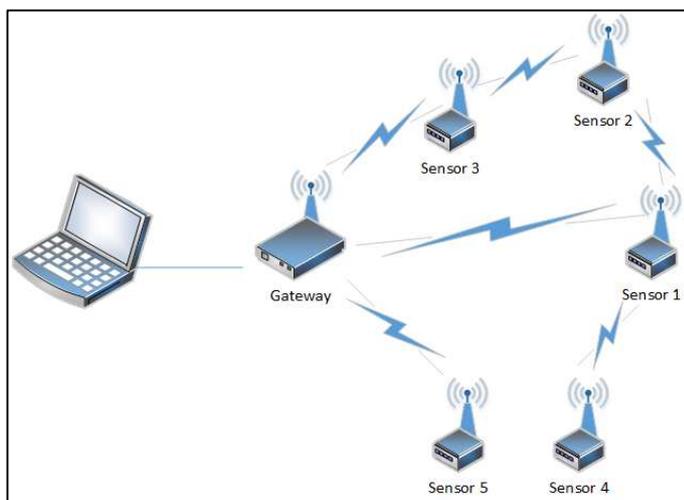


Figura 25: Esquema del Sistema de Monitorización

Para desplegar el sistema de monitorización, es necesario un kit de sensores inalámbricos Crossbow WSN MICAz MPR2400 que se distribuyen de forma aleatoria en el volcán Cotopaxi como se menciona en el trabajo “Implementación de un sistema de monitorización de señales sísmicas del volcán Cotopaxi empleando una red de sensores inalámbricos”, como se ve en la figura 26, el Gateway se ubicó en el lugar más idóneo para efectos de encaminamiento, energía y rendimiento (Londoño Mancheno, 2011).

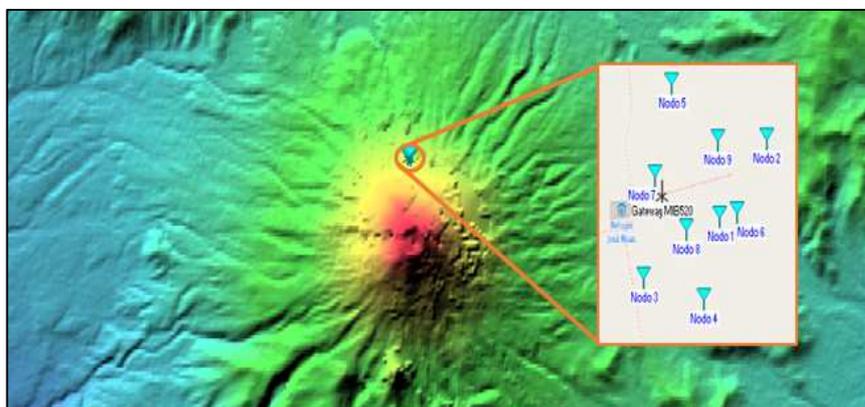


Figura 26: Despliegue de la red de Sensores Inalámbricos

En la tabla 17 se muestra la ubicación de todos los nodos utilizados en el sistema de monitorización.

Tabla 17:
Coordenadas de los nodos

Elemento	Latitud	Longitud
Gateway MIB520	0° 39' 49,31" S	78° 26' 17,1" O
Nodo 1	00 39' 49,8" S	780 26' 15,3" O
Nodo 2	00 39' 48,3" S	780 26' 13,8" O
Nodo 3	00 39' 51,0" S	780 26' 17,7" O
Nodo 4	00 39' 51,4" S	780 26' 15,8" O
Nodo 5	00 39' 47,2" S	780 26' 16,8" O
Nodo 6	00 39' 49,73" S	780 26' 14,73" O
Nodo 7	00 39' 49,0" S	780 26' 17,34" O
Nodo 8	00 39' 50,05" S	780 26' 16,35" O
Nodo 9	00 39' 48,32" S	780 26' 15,36" O

Fuente: (Londoño Mancheno, 2011)

3.2 Implementación del enlace Cotopaxi - ESPE

En este apartado se va a proceder a realizar una descripción detallada de las actividades llevadas a cabo para implementar la etapa de transmisión ubicada en el Refugio José Rivas (Volcán Cotopaxi).

- En primer lugar, es necesario contar con un permiso dirigido al Administrador del Parque Nacional Cotopaxi detallando en el mismo todos los aparatos y dispositivos a utilizar puesto que es un área protegida y de esta manera se pretende conservar la gran biodiversidad existente. El documento mencionado se encuentra en el anexo 1. Una vez dentro de estacionamiento del parque, se procede al ascenso al Volcán con todos los quipos de telecomunicaciones hasta alcanzar el Refugio José Rivas como se ve en la figura 27.



Figura 27: Ascenso de los equipos al refugio José Rivas

- Ahora se procede a buscar las coordenadas específicas para proceder a instalar la etapa de transmisión, las coordenadas se muestran en la figura 28.

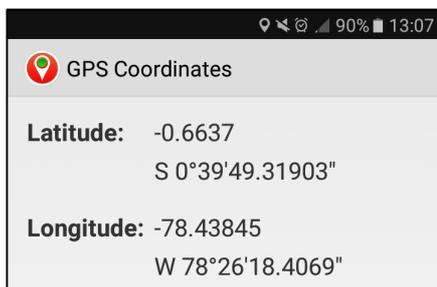


Figura 28: Coordenadas para la instalación

- Una vez determinadas las coordenadas, se procede a trasladar a este lugar todos los equipos que serán utilizados en el radioenlace como se muestra en la figura 29.



Figura 29: Ubicación de los equipos en el lugar correspondiente

- Ahora se procede a ubicar el mástil que servirá de soporte para la antena y se procede a instalarla como se ve en la figura 30.



Figura 30: Instalación del mástil y la antena

- El siguiente paso consiste en proveer de energía a los equipos, para esto se utilizó una batería de 12V junto con un inversor los cuales alimentarán a la Tarjeta Alix 2D2 y al computador (al cual está conectado el gateway). La instalación de los equipos se muestra en la figura 31.



Figura 31: Provisión de energía a los equipos

- Cabe mencionar que se utilizó otra computadora que para realizar las mediciones utilizando el software de Labview y el microcontrolador Arduino, la misma que contaba con suficiente carga durante el tiempo de pruebas. Las dos computadoras se indican en la figura 32.



Figura 32: Instalación de los equipos

- En las figuras 33 y 34 una vez que se han instalado todos los equipos necesarios para el radioenlace, se procede a utilizar la brújula para apuntar la antena hacia una dirección fija de $359, 13^\circ$ (ESPE), a su vez también se instalan los equipos de recepción cuya antena tiene un azimut de $178, 91^\circ$ (Cotopaxi).



Figura 33: Dirección de la antena de Transmisión



Figura 34: Dirección de la antena de Recepción

- Como se ve en la figura 35, mediante un transmisor de Radio Motorola se comunica con una persona que está en la entrada del parque, la cual a su vez se comunica vía celular con otra persona que se encuentre en la ESPE para realizar la prueba del enlace y la inyección de tráfico.



Figura 35: Confirmación del enlace

- Una vez realizado el enlace, en la figura 36 se realiza el procedimiento para la toma de medidas a diferentes potencias de transmisión para su posterior análisis.



Figura 36: Toma de valores de corriente en DC

- Se procedió a realizar la medida de las corrientes utilizando el equipo correspondiente (pinza amperimétrica) para obtener los datos necesarios de corriente en AC, la toma de corriente se observa en la figura 37.



Figura 37: Toma de valores en corriente AC

3.3 Mediciones del Consumo de Potencia de la Etapa de Transmisión del Sistema de Supervisión y Alerta Temprana

3.3.1 Configuración de los componentes para la adquisición de datos

Para la adquisición de datos de medidas de corriente se utilizaron las siguientes herramientas:

- Arduino UNO
- Arduino IDE
- Computador con LabVIEW 2016
- NI Visa
- VI Package Manager
- Microsoft Excel
- Cables, cinta aislante, cautín y estaño.

3.3.1.1 Configuración del software LabVIEW

Para la configuración del software LabVIEW 2016, se procede a la descarga del instalador desde la página web de la aplicación (National_Instruments, LabView, 2017).

Además, se descarga e instala el software de Arduino (IDE) desde su página oficial (Arduino, 2017). Los íconos de los programas utilizados se ven en la figura 38.

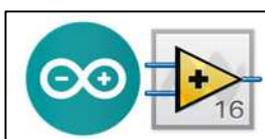


Figura 38: Software Utilizado

Para habilitar los puertos e interfaces de comunicación en el software LabVIEW se debe instalar el complemento de NI Visa que National Instruments lo entrega gratuitamente desde su página oficial como se ve en la figura 39 (National_Instruments, LabView, 2017).



Figura 39: Descarga NI Visa
Fuente: (National_Instruments, LabView, 2017)

Ahora se elige la opción de descarga estándar de la figura 40.

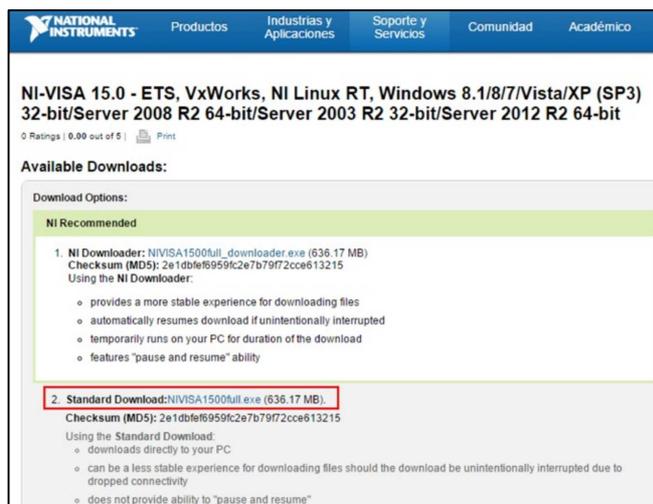


Figura 40: Descarga estándar NI Visa
Fuente: (National_Instruments, LabView, 2017)

Se procede a ejecutar el instalador como se muestra en la figura 41.

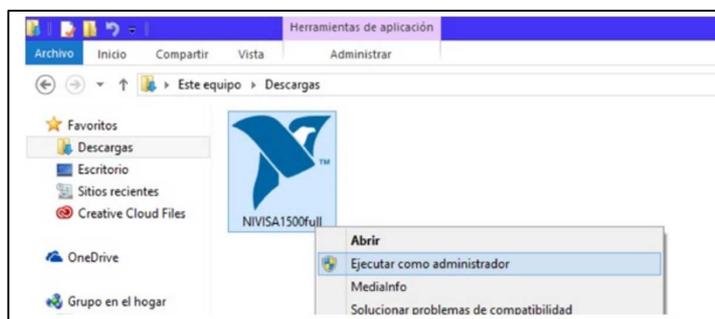


Figura 41: Ejecución del Instalador
Fuente: (National_Instruments, LabView, 2017)

A continuación, se escoge la opción Next en las ventanas que se requieran y se aceptan los términos correspondientes. En la figura 42 se muestra el proceso de instalación:

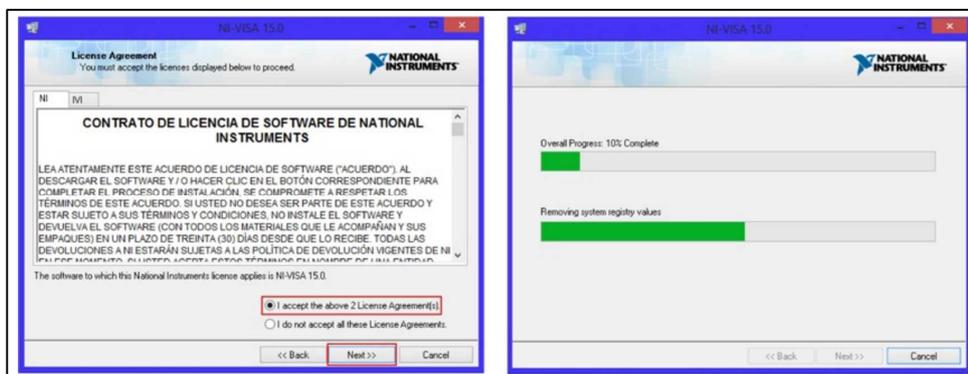


Figura 42: Proceso de Instalación
Fuente: (National_Instruments, LabView, 2017)

El siguiente paso es la descarga del complemento necesario el VI Package Manager el cual es un administrador de contenidos y descargas de librerías y diversos toolkits para LabVIEW, se puede descargar este complemento en la página web oficial (Package_Manager, 2017).

De la misma manera para la instalación procedemos a instalar dando click en “Next” y aceptando los términos y condiciones cuando corresponda. En la figura 43 se muestra las capturas del proceso.

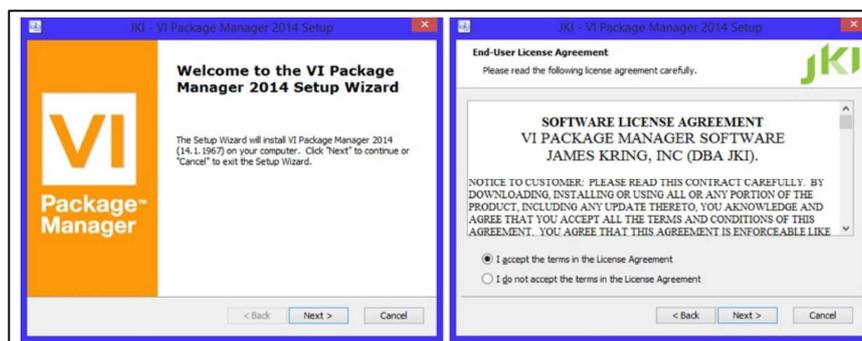


Figura 43: Instalación del complemento Package Manager
Fuente: (Package_Manager, 2017)

Al terminar, se ejecuta VI Package Manager para buscar LabVIEW Interface for Arduino y seleccionar la opción “Install Package” tal como se muestra en la figura 44. Esta herramienta nos permitirá operar la placa Arduino UNO desde LabView.

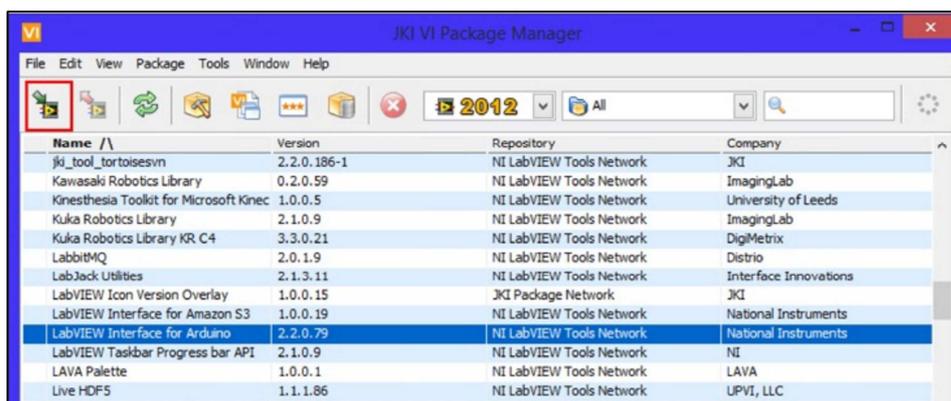


Figura 44: Instalación de LabVIEW Interface for Arduino
Fuente: (Package_Manager, 2017)

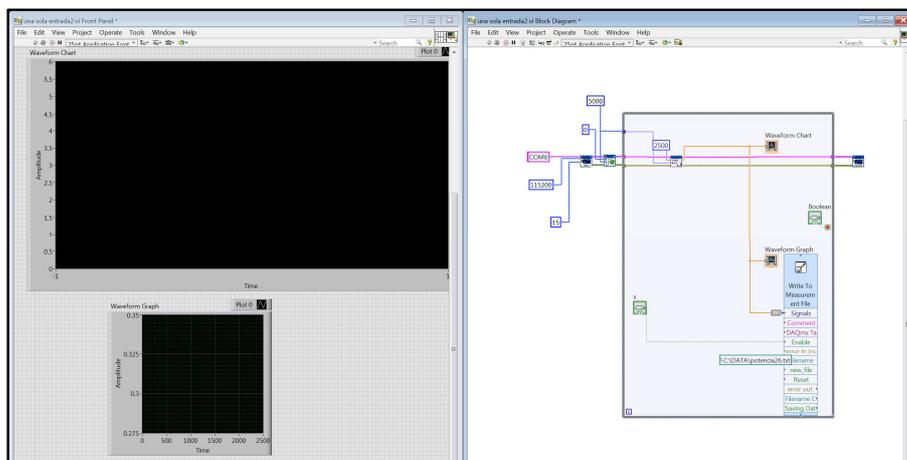


Figura 47: Programa en LabVIEW para adquisición de datos

En la figura 48 se muestran las 6 funciones necesarias para la implementación y configuración del programa.

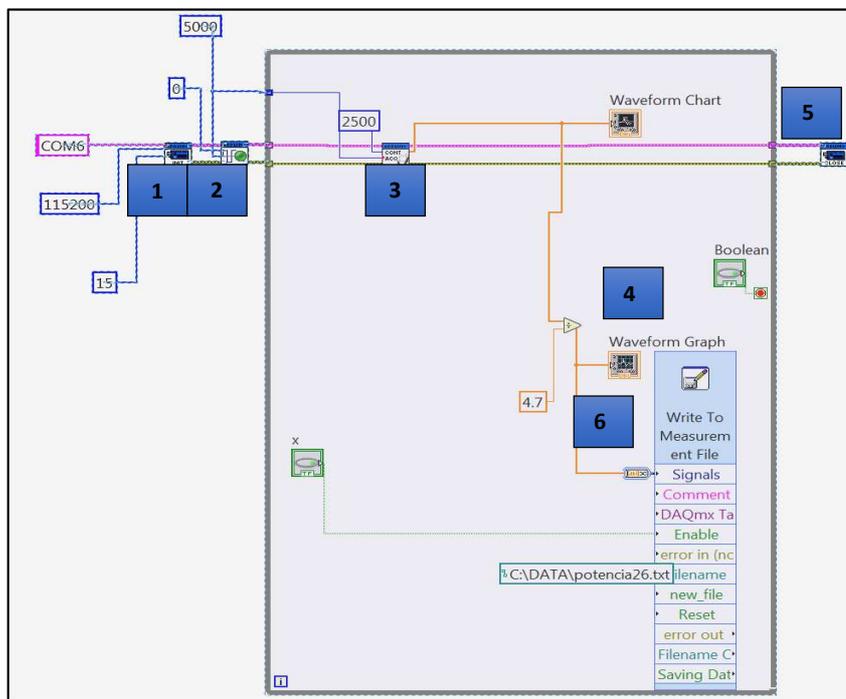


Figura 48: Diagrama de VI bloque

Éstas funciones se describen a continuación:

1. **INT:** Inicializa la comunicación.
2. **Continuous Aquisition On:** Este VI pone al Arduino Uno en modo de adquisición continua donde se irán escribiendo muestras analógicas al puerto serie a la velocidad especificada. La frecuencia máxima de muestreo es de 5Khz
3. **Continuous Aquisition Sample:** Devuelve el número de muestras a la velocidad especificada. Con frecuencias de muestreo altas, este VI debe ejecutarse con suficiente frecuencia para mantenerse al día con las muestras disponibles en el puerto serie.
4. **Waveform Graph:** Sirve para visualizar los datos leídos por el Arduino Uno.
5. **Close:** Cierre la conexión activa en el Arduino Uno.
6. **Write To Measurement File:** Escribe datos en archivos de medida basados en texto o en archivos Excel. Esta función permite configurar el número, cantidad y tiempo de datos a adquirir, en la figura 49 se muestra la configuración que se utiliza para capturar datos en un minuto de funcionamiento del equipo y su posterior almacenamiento en archivos de texto.

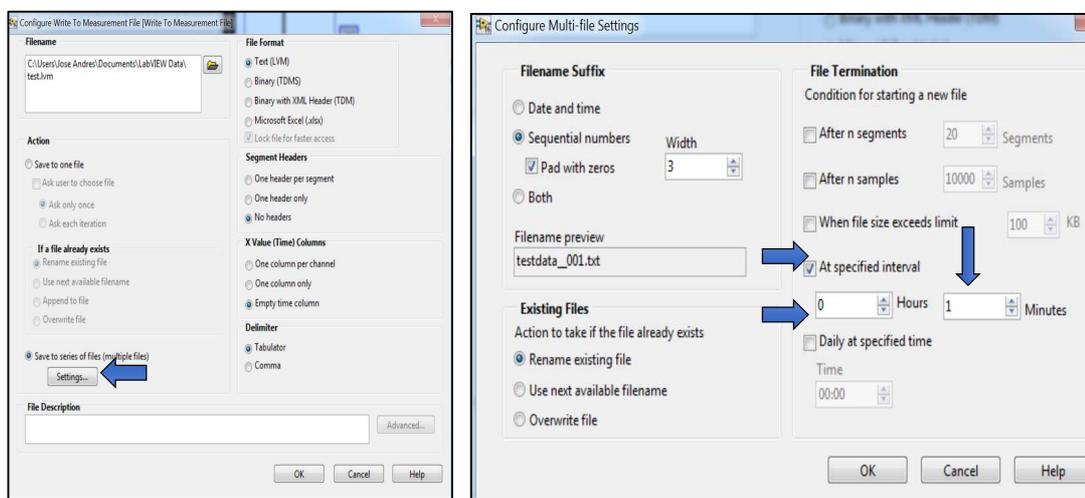


Figura 49: Configuración Write To Measurement en 1 minuto.

3.3.2 Adquisición de Datos en DC

3.3.2.1 Adquisición de Datos en DC Tarjeta Alix 2D2

La adquisición de datos de corriente continua, se la realiza poniendo una resistencia en el terminal positivo con el fin de transformar la corriente en voltaje a través de la ley de ohm $V=I \cdot R$. En la figura 50 se muestra la conexión física en la entrada de alimentación de la tarjeta Alix 2D2.

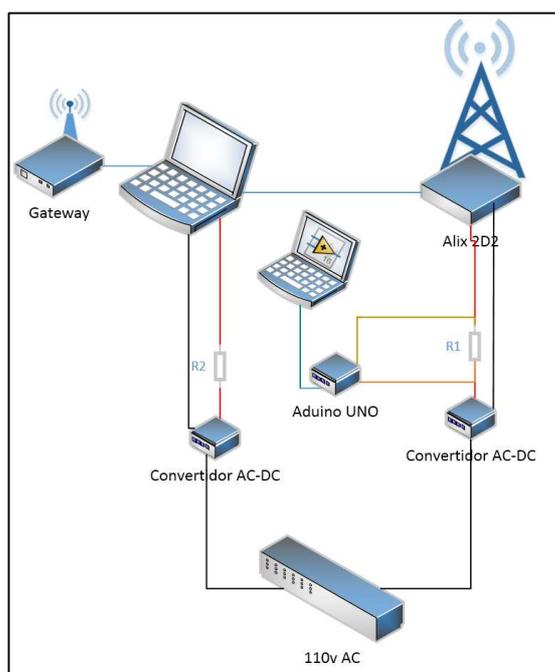


Figura 50 Diagrama de conexión Arduino Uno – Alix 2D2

Esta etapa se divide en tres escenarios para la adquisición de información

1. Toma de datos en mínima y máxima potencia sin establecer comunicación en el enlace.
2. Toma de datos en mínima y máxima potencia con enlace (sin tráfico).
3. Toma de datos en mínima y máxima potencia con enlace (con inyección de tráfico).

El voltaje de alimentación de la tarjeta Alix 2D2 permaneció constante con un valor de 14,72 V durante todas las mediciones.

Escenario 1

En la figura 51 se indica las condiciones en las que se realizó la captura de datos

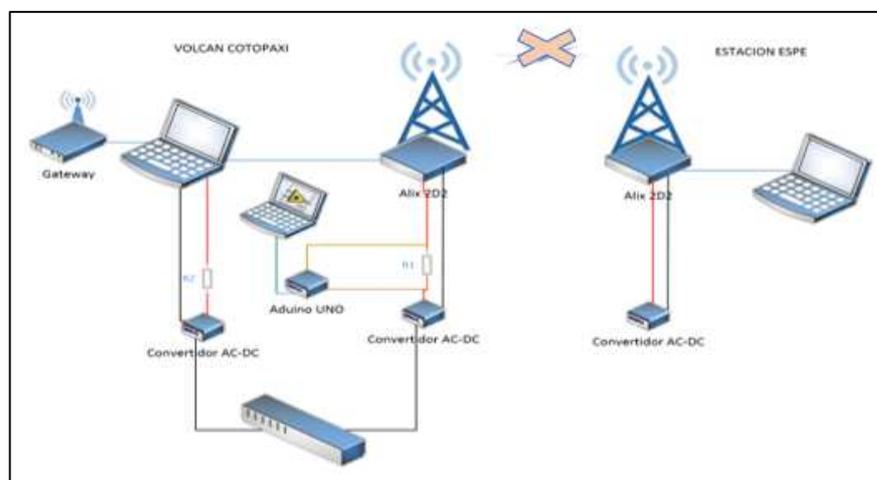


Figura 51: Escenario 1 sin comunicación en el enlace

Al trabajar con una potencia de 21dbm en la tarjeta Alix 2D2, se obtuvo los datos de la figura 52 donde el pico máximo de potencia es de 5,40193088W.

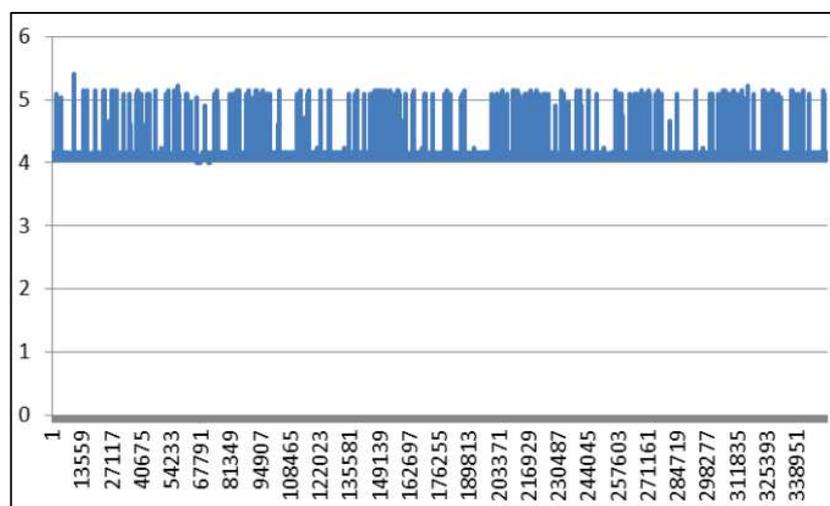


Figura 52: Potencia 21 dbm sin enlace

Al trabajar con una potencia de 26dbm en la tarjeta Alix 2D2, se obtuvo la figura 53, en la cual se observa un pico máximo de potencia de 5,6474752W.

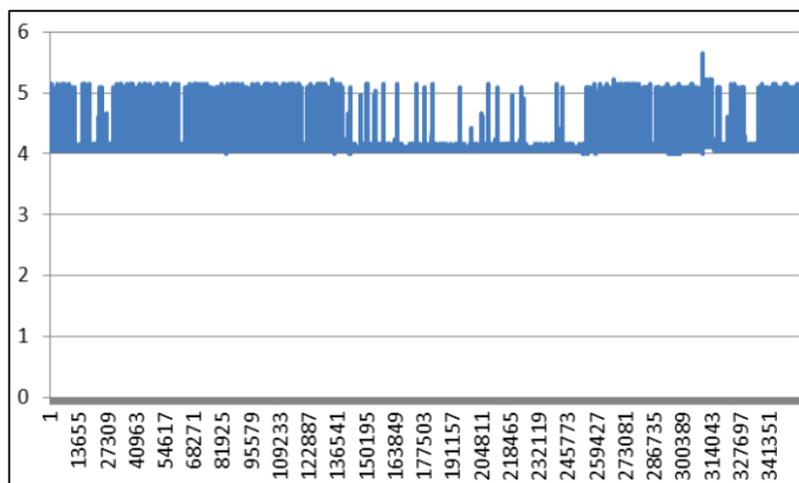


Figura 53: Potencia 26 dbm sin enlace

Escenario 2

En la figura 54 se indican las condiciones para realizar la captura de datos, las condiciones son comunicación en el enlace, pero sin inyección de tráfico.

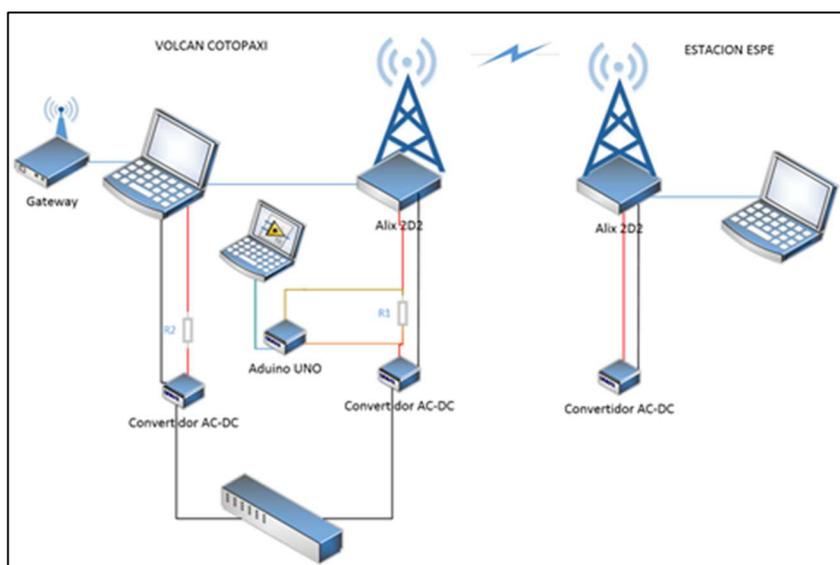


Figura 54: Escenario 2 con comunicación en el enlace (sin tráfico)

En el escenario 2, al trabajar con una potencia de 21dbm en la tarjeta Alix 2D2, se obtuvo la figura 55 donde se observa un pico máximo de potencia de 5,8316224W.

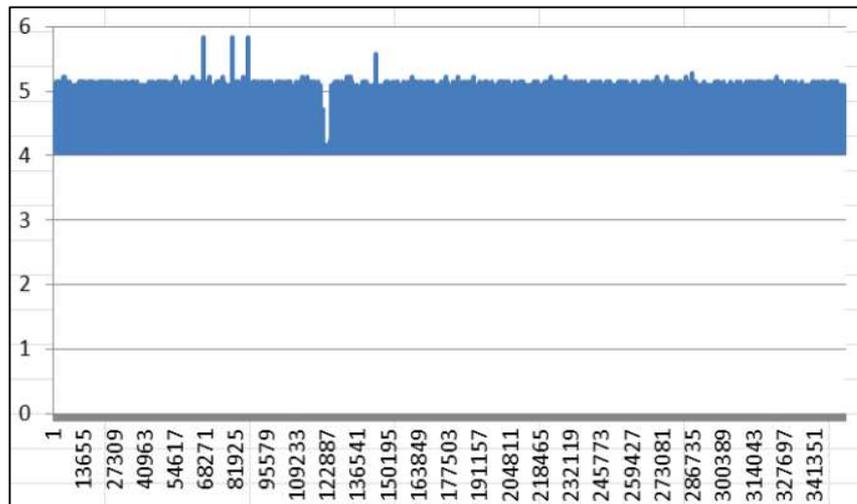


Figura 55: Potencia 21 dbm con comunicación en el enlace (sin tráfico)

De la misma manera, al trabajar con una potencia de 26dbm en la tarjeta Alix 2D2, se obtuvo la figura 56 con un valor máximo pico de potencia de 6,38409344W.

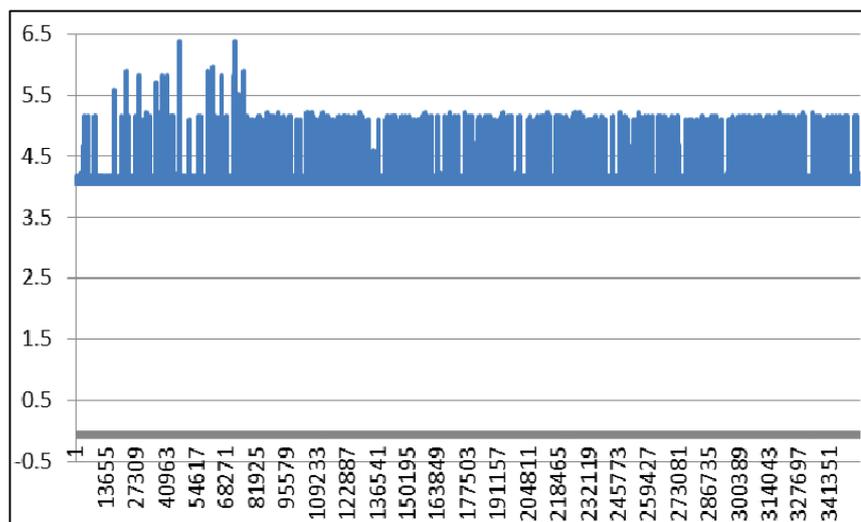


Figura 56: Potencia 26 dbm con comunicación en el enlace (sin tráfico)

Escenario 3

En la figura 57 se indican las condiciones en las que se realizó la captura de datos para el escenario 3.

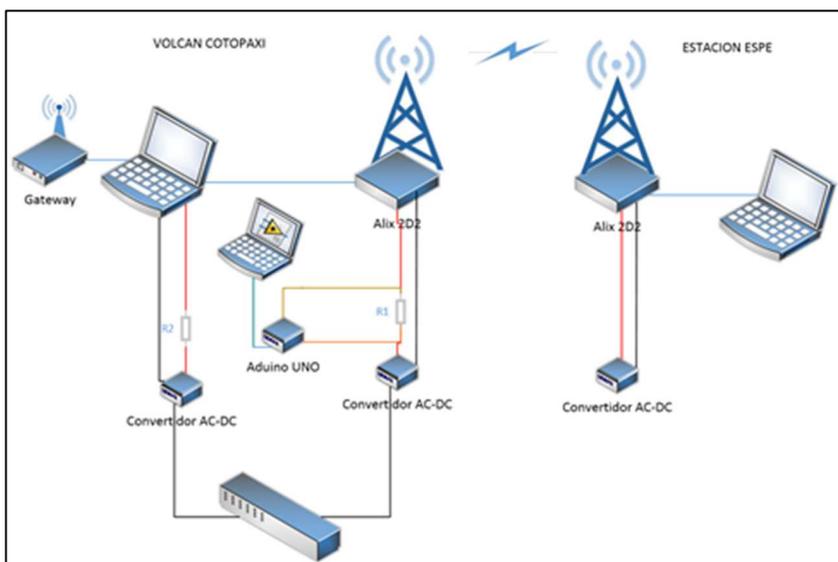


Figura 57: Escenario 3 con comunicación en el enlace (con tráfico)

Cuando se trabaja con una potencia de 21dbm en la tarjeta Alix 2D2, se obtuvo la figura 58 con un pico máximo de potencia de 5,95440192W.

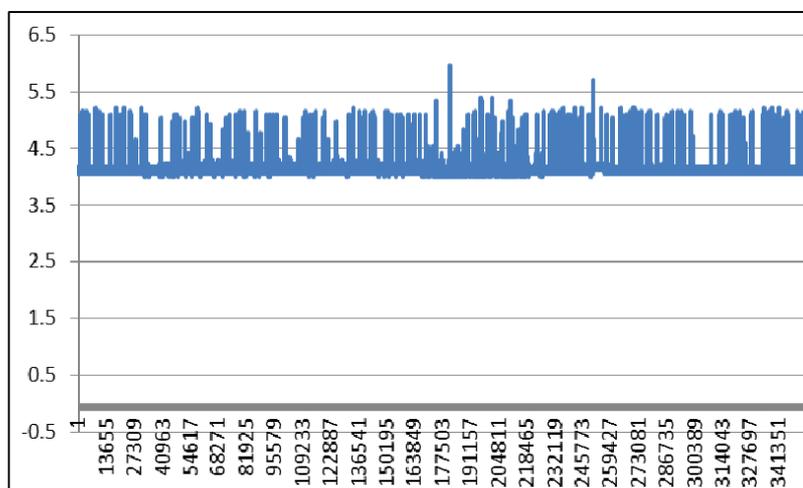


Figura 58: Potencia 21 dbm con comunicación en el enlace (con tráfico)

En este escenario, al trabajar con una potencia de 26dbm en la tarjeta Alix 2D2, se obtuvo la figura 59 con un pico máximo de 6,43515136W que corresponde al valor máximo de potencia en todas las pruebas realizadas, este valor será tomado como referencia para el diseño del sistema fotovoltaico autónomo.

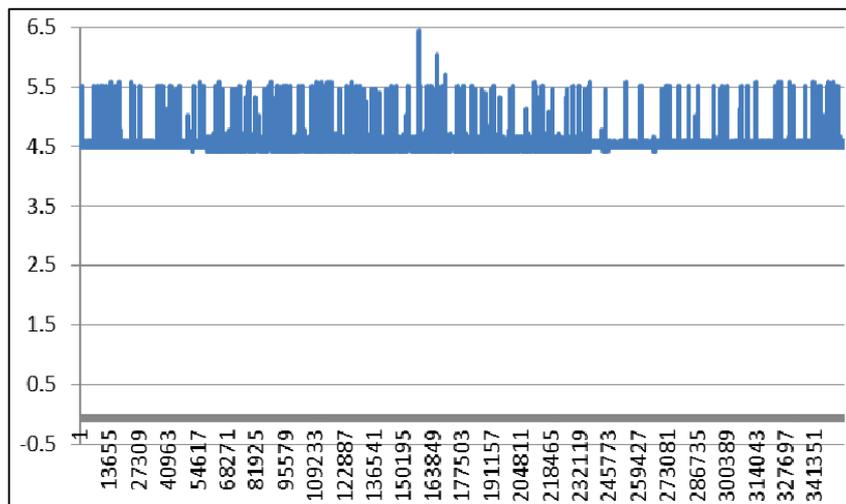


Figura 59: Potencia 26 dbm con comunicación en el enlace (con tráfico)

3.2.2.2 Adquisición de Datos en DC del Netbook HP y Gateway

La adquisición de datos de corriente continua, se la realiza con una resistencia en el terminal positivo para transformar la corriente en voltaje con la ley de ohm $V=I \cdot R$. En la figura 60 se muestra la conexión física entre el Netbook HP con el Gateway y el Arduino UNO con la entrada de alimentación positiva del computador HP.

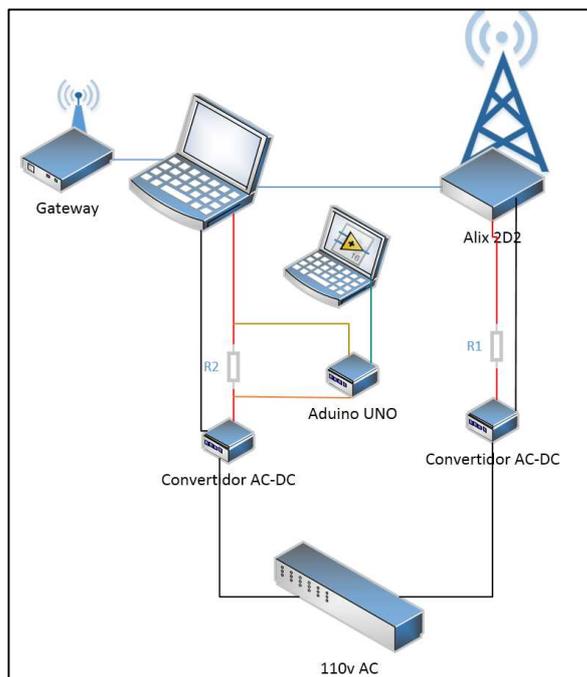


Figura 60: Diagrama de conexión Arduino Uno – Netbook HP y Gateway

El computador tiene dos modos de funcionamiento uno con la pantalla encendida conectado el Gateway y otro con la pantalla apagada conectado el Gateway. En la figura 61 se aprecia el aumento en la corriente debido a que inicialmente el Netbook tiene el monitor apagado y luego de un periodo se enciende.

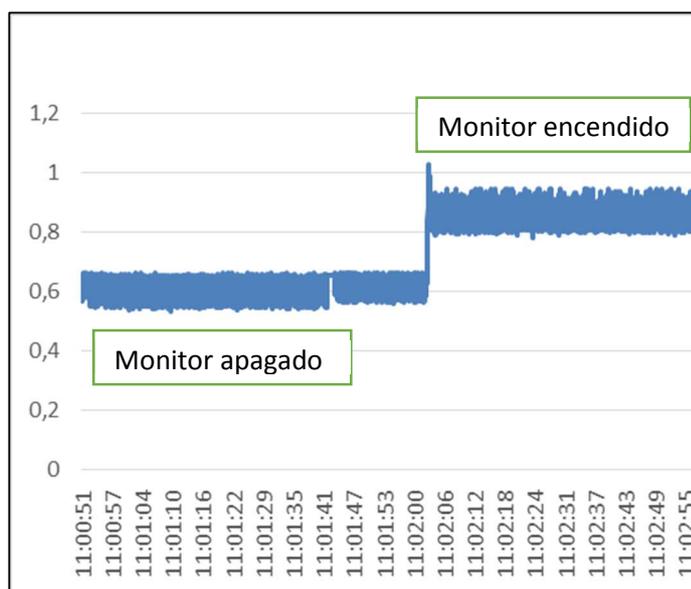


Figura 61: Consumo de Corriente DC del Netbook HP-Gateway

Los valores obtenidos promedio de la corriente en DC del Netbook son los siguientes.

- Corriente (monitor apagado + Gateway): 0.645 A en DC.
- Corriente (monitor encendido + Gateway): 0.853 A en DC.

3.3.3 Adquisición de Datos en AC

Una vez identificado el peor de los casos en los escenarios de prueba posibles, se determinó que a una potencia de transmisión máxima correspondiente a 26 dbm se produce el mayor consumo por lo que en este escenario se decide tomar los valores de corriente en AC utilizando una pinza amperimétrica EOSUN EM306B como se ve en la figura 62.



Figura 62: Toma de valores en corriente AC

En la tabla 18 se muestran los datos de corriente en AC de la tarjeta Alix 2D2 y del computador con la pantalla apagada y encendida.

Tabla 18: Datos de Corriente Obtenidos

Computador pantalla apagada + Gateway	Computador pantalla encendida + Gateway	Alix 2D2
 <p>A digital clamp meter (EoSUN EM306B) showing a reading of 0.28 on its LCD display. The meter is black with a silver dial and is positioned against a white fabric with a black pattern.</p>	 <p>A digital clamp meter (EoSUN EM306B) showing a reading of 0.32 on its LCD display. The meter is black with a silver dial and is positioned against a white fabric with a black pattern.</p>	 <p>A digital clamp meter (EoSUN EM306B) showing a reading of 0.04 on its LCD display. The meter is black with a silver dial and is positioned against a white fabric with a black pattern.</p>

No se consideró realizar las mediciones en diferentes horas del día y en diferentes condiciones climatológicas en el lugar debido a que el Parque Nacional Cotopaxi es una zona protegida y su acceso sólo es permitido hasta las 15 horas, además se incrementaría el número de baterías para mantener los equipos encendidos por tiempos prolongados.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO

4.1 Consideraciones Generales

Como se menciona en el capítulo 2, para dimensionar un Sistema Fotovoltaico Autónomo es necesario seguir una serie de pasos iniciando con la estimación del consumo energético, cálculo del ángulo óptimo, dimensionamiento del sistema de acumulación, dimensionamiento del generador, dimensionamiento del regulador y de ser el caso un inversor.

Para estimar el consumo energético, se inicia calculando la potencia de todos los elementos a utilizar empezando por la Tarjeta Alix 2D2 y el Netbook HP incluido el Gateway.

Tarjeta Alix 2D2

Como se muestra en el capítulo 3 en la adquisición de datos se identifica que el mayor valor pico de potencia en DC es en el escenario 3, cuando la tarjeta de transmisión Alix 2D2 está configurada con la máxima potencia de transmisión (26dbm), la toma de medida fue de 60 segundos y el tiempo de duración de la inyección de tráfico en el enlace fue de 30 segundo, como se indica en la figura 61.

El primer paso para estimar el consumo energético del transmisor es obtener el promedio de potencia de la Tarjeta Alix 2D2 en el momento que existe inyección de tráfico, es decir durante este tiempo se presentan las peores condiciones generando el máximo consumo de energía eléctrica, estas son las condiciones necesarias para que el dimensionamiento del SAF sea lo más exacto posible.

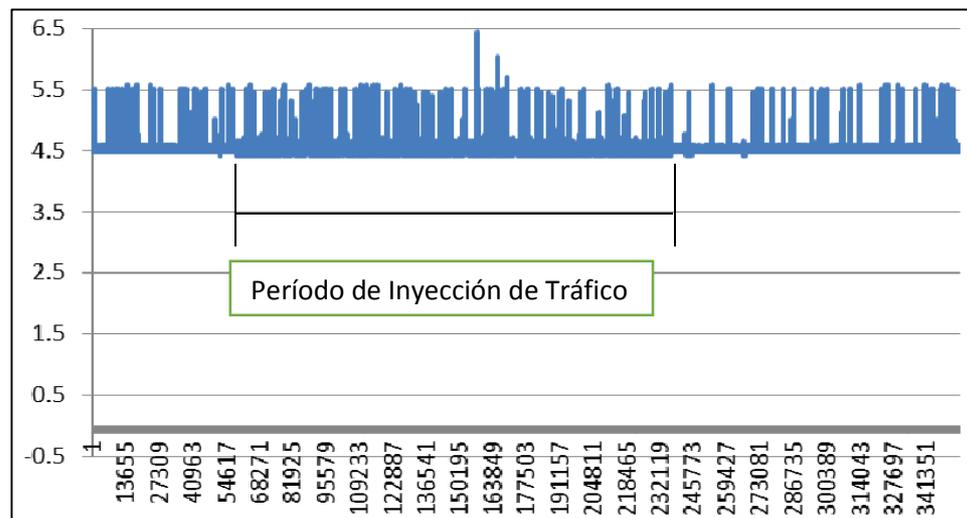


Figura 63: Promedio de potencia DC de la tarjeta Alix durante la inyección.

Por lo tanto, la potencia en DC que el transmisor requiere para su funcionamiento es de 4,51275 W.

Para el consumo de potencia en AC que el transmisor requiere, se utiliza el valor de corriente (0,04A) que se muestra en la tabla 18 en el capítulo 3, y se multiplica por la tensión en AC (110v) teniendo una potencia de 4,4W.

Netbook HP – Gateway

A continuación, es necesario estimar el consumo de potencia de la computadora a utilizar (Netbook HP), en la figura 64 se muestra el consumo de corriente del Netbook con la pantalla apagada y la pantalla encendida.

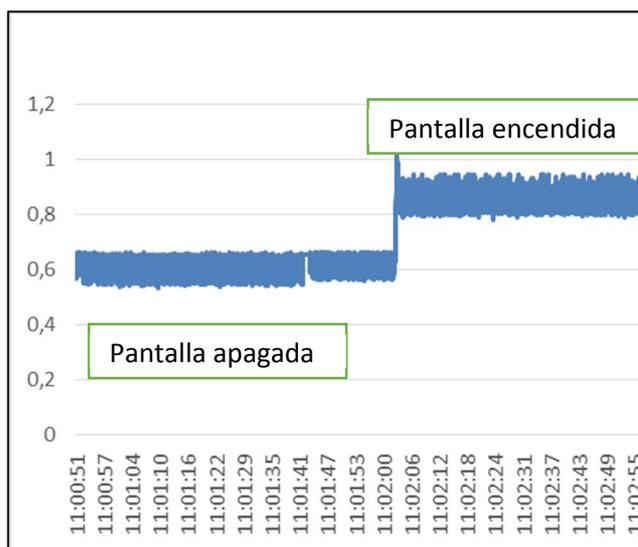


Figura 64: Consumo de Corriente Netbook HP – Gateway On Off

De esta manera se obtienen los siguientes datos en corriente continua:

- Voltaje_comp: 18.5 V en DC.
- Corriente (monitor apagado+ Gateway): 0.645 A en DC.
- Corriente (monitor encendido+ Gateway): 0.853 A en DC.

Puesto que la pantalla no va a permanecer encendida todo el tiempo, se procede a realizar el cálculo con el valor de corriente de 0.645 A.

$P(\text{Computador}+\text{Gateway}): \text{Voltaje_comp} * \text{Corriente}(\text{monitor apagado}+\text{ Gateway})$

Potencia (Computador+Gateway): 18.5 V * 0.645 A

Potencia (Computador): 11,9325 W

Por lo tanto, la potencia en DC que el computador requiere para su funcionamiento es de 11,9325 W.

Para el consumo de potencia en AC que la Netbook HP conectada con el Gateway requiere, se utiliza el valor de corriente (0,28A) que se muestra en la tabla 18 en el capítulo 3, y se multiplica por la tensión en AC (110v) resultando una potencia de 30,8W.

Cálculo del ángulo óptimo de inclinación de los paneles

Como se menciona en el capítulo 2, para realizar el cálculo del ángulo óptimo para la inclinación de los paneles solares, se aplica la fórmula 6 de la página 34 como se muestra a continuación.

$$\textit{Ángulo de Inclinación} = 15^{\circ} + \textit{Latitud} \quad (6)$$

$$\textit{Ángulo de Inclinación} = 15^{\circ} + \textit{Latitud Refugio}$$

$$\textit{Ángulo de Inclinación} = 15^{\circ} + (-0,6636)$$

$$\textit{Ángulo de Inclinación} = 14,336^{\circ}$$

Por lo que los paneles solares deben apuntar hacia el hemisferio norte con un ángulo de inclinación de 14,336°.

4.2 Escenarios de Prueba

Para el diseño y la elección del Sistema Fotovoltaico Autónomo se busca optimizar todos los recursos existentes para generar un ahorro en la parte económica sin dejar de lado el objetivo principal que es mantener la etapa de transmisión funcionando permanentemente.

Para brindar la energía eléctrica necesaria a la etapa de transmisión y con el objetivo de optimizar la mayor cantidad de recursos posibles, el diseño se divide en tres escenarios posibles para su análisis y elección.

- Primer escenario de diseño: Se plantea que el sistema fotovoltaico autónomo funcione a 12Vdc y se utilicen convertidores DC-DC (Step-up) para la alimentación del computador y la tarjeta de transmisión Alix 2D2.
- Segundo escenario de diseño: Se plantea que el sistema fotovoltaico autónomo funcione a 24Vdc y se utilicen convertidores DC-DC (Step-down) para la alimentación del computador y la tarjeta de transmisión Alix 2D2.
- Tercer escenario de diseño: Se plantea que el sistema fotovoltaico autónomo funcione a 12Vdc y se utilicen convertidores AC-DC para la alimentación del computador y la tarjeta de transmisión Alix 2D2.

Cabe mencionar que los equipos estarán funcionando durante todo el día, por lo cual se eligió 24 horas para los cálculos correspondientes.

4.2.1 Primer Escenario de Diseño

En este caso se utilizan paneles policristalinos SIMAX 100W (anexo2), baterías de 12 Vdc (anexo 3) y convertidores DC-DC x16009 Step-up de 2A (anexo 4). Debido a que se utilizara convertidores DC-DC con eficiencia del 94%, se debe recalculer la potencia en DC de cada equipo, en la figura 65 se muestra el esquema del SFA en corriente continua a 12V.

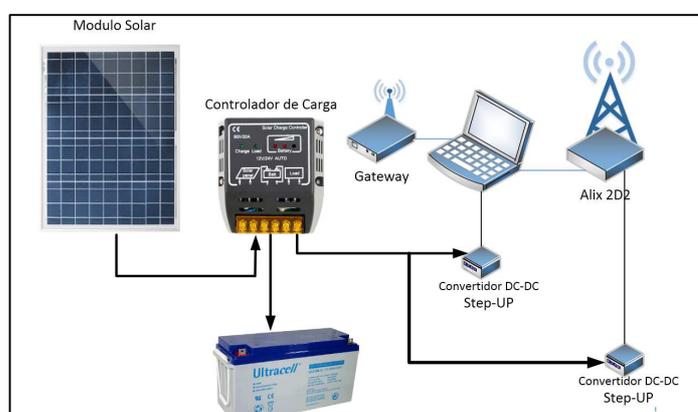


Figura 65: Sistema Fotovoltaico Primer Escenario de Diseño 12V.

En la tabla 19, se detallan los datos de partida para el análisis.

Tabla 19:
Datos Primer Escenario

Datos de partida	Datos	Unidades
Días de autonomía N.	7	Días
Potencia computador.	11,9325	W
Potencia del computador incluyendo la eficiencia del convertidor DC-DC.	12,694	W
Potencia Alix 2D2.	4,512	W
Potencia de la Alix 2D2 incluyendo la eficiencia del convertidor DC-DC.	4,801	W
Consumo diario real.	419,879	Wh/día
Consumo del inversor.	0	W
Consumo del controlador de carga.	0,1	W
Consumo Total	422,278	Wh/día
Voltaje del SFA	12	V

Con estos datos, se procede a realizar el diseño del SFA a 12 V obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 20, los cálculos se adjuntan en el (anexo 8).

Tabla 20:
Resultados Primer Escenario

Cant	Equipo	Configuración	Precio unitario	Subtotal
3	Baterías 150 Ah	Conectada en Paralelo	440	1320
2	Panel Simax 100W	Conectada en Paralelo	120	240
1	Controlador de carga 20A, 12V	N/A	140	140
2	Convertidores DC- DC xl6009	N/A	7	14
Total en dólares				1714

4.2.2 Segundo Escenario de Diseño

Para el segundo escenario, se utilizarán paneles monocristalinos SIMAX 200W (anexo 5) por ser más eficientes que los policristalinos, baterías de 12 Vdc (anexo 3) y convertidores DC-DC Lm2596 Step-down de 3A (anexo 6), el sistema fotovoltaico funcionará con un voltaje de 24VDC. En este diseño se utilizan convertidores DC-DC con eficiencia del 92% por lo que se debe recalculer la potencia en DC de cada equipo, en la figura 66 se muestra el esquema del SFA en corriente continua a 24V.

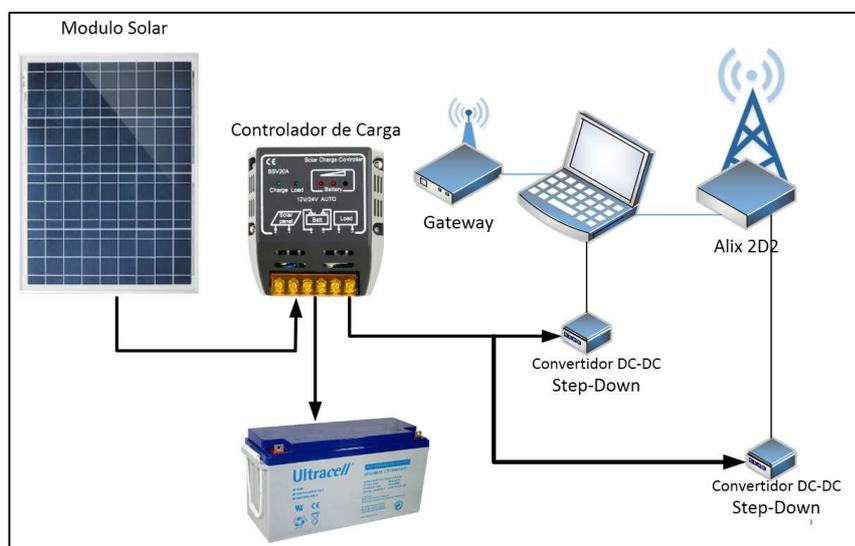


Figura 66: Sistema Fotovoltaico Segundo Escenario de Diseño 24V.

Los datos de partida para el análisis se pueden ver en la tabla 21.

Tabla 21:
Datos Segundo Escenario

Datos de partida	Datos	Unidades
Días de autonomía N.	7	Días
Potencia Computador.	11,9325	W
Potencia del computador incluyendo la eficiencia del convertidor DC –DC.	12,970	W
Potencia Alix 2D2.	4,512	W

Continúa →

Potencia de la Alix 2D2 incluyendo la eficiencia del convertidor DC-DC.	4,905	W
Consumo diario real.	429	Wh/día
Consumo del inversor.	0	W
Consumo del controlador de carga.	0,1	W
Consumo Total.	431,406	Wh/día
Voltaje del SFA.	24	V

Con el uso de estos datos, se procede a realizar el diseño del SFA a 24 V obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 22, los cálculos se adjuntan en el (anexo 9).

Tabla 22:
Resultados Segundo Escenario

Cantidad	Equipo	Configuración	Precio unitario	Subtotal
4	Baterías 150 Ah	2 en Paralelo y 2 en serie.	440	1760
1	Panel Simax 200W	N/A	265	265
1	Controlador de carga 15A, 24V	N/A	150	150
2	Convertidores DC- DC Lm2596	N/A	7	14
Total en dólares				2189

4.2.3 Tercer Escenario de Diseño

Para el tercer escenario de diseño, se utilizan paneles monocristalinos SIMAX 200W (anexo 5), baterías de 12 Vdc (anexo 3), inversor de 180W (anexo 8) y convertidores AC-DC que alimenten al computador y a la tarjeta Alix 2D2, el sistema fotovoltaico funcionara con un voltaje de 12VDC. En este diseño se debe recalcular la potencia debido al consumo de energía eléctrica del controlador de carga y el inversor, en la figura 67 se muestra el esquema del SFA en corriente alterna a 12V.

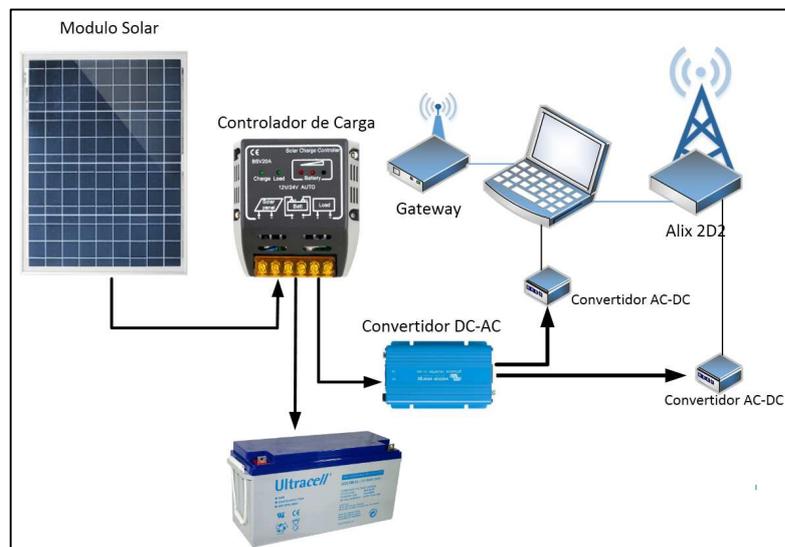


Figura 67: Sistema Fotovoltaico Tercer Escenario de Diseño 12V.

Los datos previos utilizados para los cálculos se detallan en la tabla 23.

**Tabla 23:
Datos Tercer Escenario**

Datos de partida	Datos	Unidades
Días de autonomía N.	7	Días
Potencia Computador.	30,8	W
Potencia Alix 2D2.	4,4	W
Consumo diario.	844,8	Wh/día
Consumo del inversor.	2,1	W
Consumo del controlador de carga.	1,5	W
Consumo Total.	897,6	Wh/día
Voltaje del SFA.	12	V

Una vez que se ha realizado el diseño con el consumo total de energía eléctrica que aumento por causa del inversor y el regulador de carga, en la tabla 24 se muestran los resultados correspondientes al tercer escenario de diseño, los cálculos se adjuntan en el (anexo 10).

Tabla 24:
Resultados Tercer Escenario

Cantidad	Equipo	Configuración	Precio unitario	Subtotal
6	Baterías 150 Ah.	Conectadas en Paralelo	440	2640
4	Panel Simax 200W	2 en Paralelo y 2 en Serie.	265	1060
1	Controlador de carga MPTT 25A.	N/A	590	590
1	Inversor 180W.	N/A	350	350
Total en dólares				4640

En la tabla 25 se resumen los resultados de los 3 escenarios de dimensionamiento.

Tabla 25:
Resumen de los Escenarios

Escenario	N. Paneles	N. Baterías	Inversor	Potencia	Total Dólares
Primero	2 x100W-P	3 x150Ah	N/A	17,48W	1714
Segundo	1 x200W-M	4 x150Ah	N/A	17,87W	2189
Tercero	4 x200W-M	6 x150Ah.	1	32,50W	4640

Se seleccionó la batería Ultracell de 150 Ah a 12 v. puesto que está disponible en el mercado y también se ajusta al rango de temperatura que existe en el volcán Cotopaxi como se muestra en el Anexo 3.

4.3 Análisis de resultados

Para medir el consumo de energía eléctrica de la etapa de transmisión se realizó la implementación de tres escenarios de funcionamiento para la adquisición de datos en AC y DC con la finalidad de obtener datos en condiciones reales, además se requiere encontrar un diseño en el que el SFA sea el más apropiado para la alimentación de los equipos.

En la tabla 25 se resumen los elementos y el precio de cada diseño, por lo tanto, se elige el primer escenario puesto que es el sistema fotovoltaico que consume una menor potencia cuando utiliza los convertidores DC-DC (Step-up) con eficiencia del 94%, en comparación al segundo escenario que utiliza convertidores DC-DC (Step-Down) con eficiencia del 92%, la diferencia en la eficiencia permite un ahorro de una batería y genera un ahorro económico de 475 dólares.

En el tercer escenario de diseño la potencia se incrementa en 15,02 W en comparación al primer escenario, este aumento en la potencia se debe a que se introduce en el sistema un inversor y los convertidores AC-DC para que el SFA cumpla con los 7 días de autonomía, por esta razón, se necesitan de 6 baterías de 150Ah y de 4 paneles de 200W.

La comparación entre el ciclo de cambio de una batería solar con respecto a un panel solar es de 3 a 1 aproximadamente, dicho en otras palabras, por cada cambio de un panel solar se necesita 3 cambios de baterías de plomo ácido por lo que si bien el segundo escenario de diseño requiere un panel menos que el primer escenario de diseño al pasar el tiempo el ahorro en mantenimiento será mayor en el primer escenario.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

5.1 Conclusiones

Se comprobó que el primer escenario de diseño es el más óptimo para cumplir con los 7 días de autonomía, debido a que consume menos potencia y necesita un número menor de baterías con respecto al segundo y tercer escenario de diseño.

Se determinó que el tercer escenario de dimensionamiento es el que más recursos necesita, se requieren 4 módulos fotovoltaicos conectados en paralelo y 6 baterías, esto es debido a que se introduce al sistema un bajo rendimiento por la utilización de los convertidores AC-DC que alimentan al computador y por la tarjeta Alix 2D2 respectivamente.

Se comprobó en la implementación del enlace Cotopaxi-ESPE su correcto funcionamiento, ya que las pruebas de comunicación y de inyección de tráfico necesarias para la adquisición de datos de corriente fueron exitosas.

Se concluye que el uso de convertidores DC-DC Step-Up con eficiencia del 94% permiten el ahorro en el consumo de energía dando como resultado un SFA en corriente continua que garantiza que el sistema de supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi funcione de forma permanente.

5.2 Recomendaciones

Los sistemas fueron diseñados con controladores de carga PWM, y para lograr una mayor eficiencia se podría utilizar controladores MPPT, pero es importante tener en cuenta el incremento del precio del sistema.

Para la adquisición de datos de Corriente en AC y DC se recomienda siempre utilizar los valores en las peores condiciones, es decir que el funcionamiento de los equipos sea los más cercano a la realidad.

Se sugiere un previo análisis del consumo de corriente con un osciloscopio, con el fin de que la frecuencia de muestreo del Arduino UNO garantice evitar aliasing.

Se recomienda realizar una solicitud dirigida al administrador del parque nacional Cotopaxi pidiendo permiso para ingresar con equipos electrónicos y de telecomunicaciones.

Para la implementación del enlace Cotopaxi-Espe se recomienda llevar los equipos previamente ensamblados, revisar las condiciones climáticas, estar preparado físicamente para el ascenso con las unidades de transmisión, monitorización y baterías.

5.3 Trabajos Futuros

Realizar el análisis del consumo de potencia en diferentes condiciones climatológicas puesto lo que la temperatura en el lugar oscila entre -10°C y 20°C mientras que el rango de funcionamiento de la Tarjeta Alix 2D2 se encuentra entre 0°C y 50°C .

Mantenimiento del actual sistema de prevención instalado en el parque nacional Cotopaxi, debido a que presenta fallas de diseño en la comunicación de las estaciones.

La implementación de un sistema remoto para la medición del consumo energético de sistemas de telecomunicaciones en los sitios de funcionamiento.

La implementación de un sistema remoto para la medición de energía producida por los paneles fotovoltaicos en sistemas de supervisión, y así determinar cuándo se debe hacer mantenimiento o reemplazo de los módulos solares.

Se propone el estudio de un sistema híbrido para alimentación de sistemas de supervisión y alerta temprana, debido a que en el volcán Cotopaxi existe suficiente energía eólica.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, J., & Leocadio, H. (2005). Dimensionado de sistemas fotovoltaicos. *Curso de Energía Solar Fotovoltaica. CIEMAT.*
- Alvarez Veintimilla, D. J. (2016). Optimización Energética del Sistema de Supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del Volcán Cotopaxi usando energía fotovoltaica.
- Apolo Cárdenas, D. N. (Enero de 2011). Diseño de la Red de Telecomunicaciones de la Espe para el Sistema de Supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del Volcán Cotopaxi. Sangolquí, Pichincha, Ecuador.
- Archila, D., & Santamaría, F. (2013). State of the art of Wireless Sensor Networks. *Tecnología Investigación y Academia.*
- Arduino. (2017). *Access the Online IDE.* Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/main/software>
- Arenas, D., & Zapata, H. (2011). Libro Interactivo sobre Energía Solar y sus Aplicaciones. Pereira.
- Bejarano, N. (2011). Diseño de un Sistema de Generación Eléctrica Solar para la iluminación externa del modular de la Escuela de Ingeniería en Ecoturismo. Riobamba, Ecuador.
- Briseño, M. (2017). Energía Solar Fotovoltaica. Quito, Pichincha.
- Calvo, M. (23 de 3 de 2012). *¿Qué son las Energías Renovables?* Obtenido de twenergy: <https://twenergy.com/a/que-son-las-energias-renovables-516>
- Cantos, J. (2016). *Configuración de Instalaciones Fotovoltaicas.* Madrid: Ediciones Paraninfo.
- Carrodegua, N. (2016). *Tipos de redes y estándares Wi-Fi, sus diferencias.* Recuperado el 12 de 2016, de norfipc.com: <https://norfipc.com/redes/tipos-redes-estandares-wi-fi-diferencias.php>
- Coudé, R. (23 de Octubre de 2016). *RadioMobile.* Obtenido de <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>
- Ferrer Riera, J. L. (29 de Julio de 2010). Diseño e implementación de un módulo hardware de bajo coste para redes basadas en el estándar IEEE 802.15.4 para la Internet Futura.
- Flores Villafuerte, M., & Narváez, A. M. (2011). *Estudio de la Calidad de Servicio en la Coexistencia entre Nodos Wlan 802.11 b, g y 802.11 e.* Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/616#sthash.IGES2hAS.dpuf>
- Instituto_Geofísico. (2017). *COTOPAXI - Instituto Geofísico - EPN.* Obtenido de view-source:<http://www.igepn.edu.ec/index.php/cotopaxi>
- Juliá, S. (s.f.). *¿Redes inalámbricas o redes por cable?* Recuperado el 01 de 2017, de Gadae Netweb: <http://www.gadae.com/blog/redes-inalambricas-o-redes-por-cable/>
- Kioskea. (06 de 2014). *Redes inalámbricas.* Recuperado el 12 de 2016, de <http://es.ccm.net/contents/818-redes-inalambricas>
- Kumar, M., Gupta, I., Tiwari, S., & Tripathi, R. (2013). A comparative study of reactive routing protocols for industrial wireless sensor networks. *International Conference on Heterogeneous Networking for Quality,*

- Reliability, Security and Robustness* (págs. 248-260). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Londoño Mancheno, I. F. (2011). Implementación de un Sistema de Monitorización de Señales Sísmicas del Volcán Cotopaxi empleando una Red de Sensores Inámbricos. Sangolquí, Ecuador.
- Loster, M. (2010). *Total Primary Energy Supply - From Sunlight*. Obtenido de http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/
- Nasa. (12 de Abril de 2016). *Surface meteorology and Solar Energy*. Obtenido de <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- National_Instruments. (22 de 04 de 2009). *¿Qué es una Red de Sensores Inalámbricos?* Obtenido de <http://www.ni.com/white-paper/7142/es/>
- National_Instruments. (2017). *LabView*. Obtenido de <http://www.ni.com/es-cr/shop/labview/download.html>
- Navarra, U. (2013). *Arquitectura de Redes, Sistemas y Servicios*. Obtenido de Redes inalámbricas 802.11 y acceso al medio: https://www.tlm.unavarra.es/pluginfile.php/8477/mod_resource/content/0/slidesPDF/31y32-CSMA-CA.pdf
- Naylamp_Mechatronics. (s.f.). *Tutorial Arduino + Labview*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=xwtdhWltSIg>
- OEA. (1991). *Desastres, Planificación y Desarrollo: Manejo de Amenazas Naturales para Reducir los Daños*. Obtenido de <http://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea57s/begin.htm#Contents>
- Ortega, V. G. (Junio de 2002). Simulador Convertidores DC - DC.
- Pacco, K. (06 de Julio de 2010). *La Energía Solar Fotovoltaica y sus Aplicaciones*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos82/energia-solar-fotovoltaica-y-sus-aplicaciones/energia-solar-fotovoltaica-y-sus-aplicaciones2.shtml>
- Package_Manager. (2017). *Discover, Create, and Install LabVIEW Add-ons*. Obtenido de <https://vipm.jki.net/>
- Padilla, L. (04 de Mayo de 2013). *El ministerio de Ambiente rehabilitará refugios en cuatro montañas ecuatorianas*. Obtenido de <http://www.andes.info.ec/es/deportes/ministerio-ambiente-rehabilitara-refugios-cuatro-montanas-ecuatorianas.html>
- Puig, P., & Jofra, M. (2007). *Energía Solar Fotovoltaica*. Obtenido de <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/cuadernos-energias-renovables-para-todos-solar-fotovoltaica.pdf>
- Remuñán, M. (01 de 2010). *WiFi: historia, evolución, aplicaciones, desarrollos*. Recuperado el 12 de 2016, de WifiClub: <http://ww1.wificlub.org/featured/wifi-historia-evolucion-aplicaciones-desarrollos/>
- RITAR. (2016). *RITAR Battery*. Obtenido de <http://www.ritarpower.com/index.asp>
- Roca, A. (Septiembre de 2013). Convertidor Buck - Boost de inductores acoplados para aplicaciones fotovoltaicas.
- Style, O. (2012). *Energía Solar Autónoma*.
- SunFields. (2015). *Venta de equipos para fotovoltaica aislada*. Obtenido de <https://www.sfe-solar.com/fotovoltaica-aislada/>

Yepes, H. (13 de Noviembre de 2015). *El volcán Nevado del Ruiz, que arrasó Armero en 1985, se parece al Cotopaxi*. Obtenido de El Comercio: <http://www.elcomercio.com/actualidad/volcan-nevadoruiz-armero-hugoyepes-cotopaxi.html>