

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Diseño e implementación de un sistema de comunicación  
inalámbrica con tecnología WiMAX alimentado con energía solar  
en el campus de la Universidad del Valle de Guatemala

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por  
Hans Aldo Noack Herrera  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala  
2013



Diseño e implementación de un sistema de comunicación  
inalámbrica con tecnología WiMAX alimentado con energía solar  
en el campus de la Universidad del Valle de Guatemala

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Diseño e implementación de un sistema de comunicación  
inalámbrica con tecnología WiMAX alimentado con energía solar  
en el campus de la Universidad del Valle de Guatemala

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por  
Hans Aldo Noack Herrera  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala  
2013

Vo. Bo. :

(f)



M.Sc. Carlos Esquit

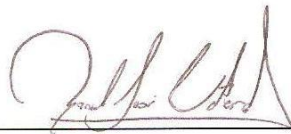
Tribunal Examinador:

(f)



M.Sc. Carlos Esquit

(f)



Ing. Manuel Cotero

(f)



Ing. Pedro Romero

Fecha de aprobación: Guatemala, 18 de junio de 2013.

# CONTENIDO

|  | Página |
|--|--------|
| Lista de cuadros.....  | vii    |
| Lista de figuras .....   | viii   |
| Resumen .....  | ix     |
| I. Introducción .....  | 1      |
| II. Objetivos .....  | 2      |
| III. Justificación .....   | 3      |
| IV. Antecedentes .....   | 4      |
| V. Marco teórico .....   | 5      |
| A. Transmisión y recepción de ondas en enlaces punto a punto .....           | 5      |
| B. Protocolo IEEE 802.16.....  | 8      |
| C. Sistemas de alimentación por energía solar .....                          | 10     |
| VI. Metodología .....  | 13     |
| A. Consideraciones generales.....  | 13     |
| B. Sistema de comunicación .....   | 13     |
| C. Planta de energía solar.....  | 15     |
| D. Diseño del sistema.....   | 17     |
| VII. Resultados .....  | 19     |
| A. Prueba de transmisión a larga distancia.....                              | 19     |
| B. Prueba de transmisión a corta distancia alimentada por energía solar..... | 23     |
| C. Costo del proyecto.....   | 27     |
| VIII. Análisis y discusión.....  | 29     |
| A. Alcance y capacidades del sistema.....                                    | 29     |
| B. Factores físicos del sistema .....  | 30     |
| IX. Conclusiones .....   | 32     |
| X. Recomendaciones.....  | 33     |
| XI. Bibliografía .....   | 34     |
| XII. Anexos .....  | 36     |
| A. Configuración de antenas NanoStation .....                                | 36     |
| B. Caseta de almacenamiento para equipos .....                               | 38     |
| XIII. Glosario.....  | 41     |

## LISTA DE CUADROS

|   | Página |
|---|--------|
| 1. Características de antenas NanoStation .....   | 14     |
| 2. Mediciones de ubicación y distancia para el primer enlace .....                      | 19     |
| 3. Cálculo de enlace de larga distancia .....   | 20     |
| 4. Configuración de antenas. Parámetros físicos y de red.....                           | 20     |
| 5. Medidas de la primera zona de Fresnel.....   | 20     |
| 6. Mediciones de velocidad de transmisión (Mbps) a través del enlace .....              | 23     |
| 7. Consumo diario de energía del sistema de comunicación.....                           | 24     |
| 8. Capacidad energética de la batería.....  | 24     |
| 9. Energía diaria producida por panel solar para los meses de abril, mayo y junio ..... | 26     |
| 10. Costo de materiales para el proyecto. Inversión inicial .....                       | 28     |
| 11. Amortización anual para instalación solar .....                                     | 28     |
| 12. Listado de materiales y costo para caseta de almacenamiento.....                    | 40     |

## LISTA DE FIGURAS

|  | Página |
|--|--------|
| 1. Primera zona de Fresnel en un enlace punto a punto.....   | 6      |
| 2. Enlaces PTMP y PTP .....  | 9      |
| 3. Estructura de una red WiMAX.....  | 9      |
| 4. Diagrama de una instalación solar con una carga de corriente alterna .....                        | 12     |
| 5. Antenas NanoStation Loco M5 y M5.....   | 14     |
| 6. Inyector de poder POE 24 VDC para alimentación de antenas .....                                   | 15     |
| 7. Panel solar Kyocera.....  | 15     |
| 8. Controlador solar Morningstar .....   | 16     |
| 9. Batería Varta de ciclo profundo .....   | 16     |
| 10. Inversor de corriente Xantrex .....  | 16     |
| 11. Diagrama de diseño para enlace de comunicación y planta de energía solar .....                   | 17     |
| 12. Montaje de antena NanoStation M5 en tubo metálico con base .....                                 | 18     |
| 13. Vista superior de los puntos para enlace de larga distancia.....                                 | 19     |
| 14. Vista del enlace desde el edificio J (Punto A) .....   | 21     |
| 15. Vista del enlace desde el edificio A (Punto B).....  | 21     |
| 16. Conexión exitosa con la red a través del enlace inalámbrico .....                                | 22     |
| 17. Medición de potencia de señal (“Signal Strength”) con AirOS.....                                 | 22     |
| 18. Prueba de velocidad de transmisión dúplex con AirOS .....  | 23     |
| 19. Insolación diaria promedio (kWh/m <sup>2</sup> ) durante el año para la ciudad de Guatemala..... | 25     |
| 20. Curvas de corriente-voltaje de panel solar para distintos niveles de irradiación .....           | 25     |
| 21. Sistema fotovoltaico interconectado. Panel solar, batería, inversor y controlador .....          | 26     |
| 22. Enlace de corta distancia (edificio J).....  | 27     |
| 23. Interfaz de entrada para antenas NanoStation .....   | 36     |
| 24. Configuración de parámetros para adaptador inalámbrico en antena NanoStation M5.....             | 37     |
| 25. Plano de caseta de almacenamiento para equipos eléctricos. Vista interior y exterior .....       | 38     |
| 26. Plano de caseta de almacenamiento para equipos eléctricos. Medidas.....                          | 39     |



## RESUMEN

El título del presente trabajo es “Diseño e implementación de un sistema de comunicación inalámbrica con tecnología WiMAX alimentado con energía solar en el campus de la Universidad del Valle de Guatemala”. Fue llevado a cabo durante el primer semestre del año 2013, entre enero y abril.

El proyecto consistió en montar un enlace punto a punto de banda ancha para intercambio de datos, utilizando antenas de microondas con tecnología WiMAX dentro de las instalaciones de la Universidad del Valle. La fuente de energía para un extremo del enlace se obtuvo de un sistema fotovoltaico, con el objetivo de demostrar las posibilidades de un enlace dedicado para aplicaciones de última milla que potencialmente puede ser instalado en lugares remotos, desprovistos de energía eléctrica convencional.

Durante el proyecto se establecieron los criterios necesarios para instalar los equipos de comunicación junto con el sistema de energía solar y se cuantificó el costo total de la instalación en cuanto a los materiales necesarios.

Habiendo implementado el enlace, se logró medir sus características y capacidades: distancias de 106.5 metros (enlace A) y 37.1 metros (enlace B), velocidad del enlace (en Mbps): 140.08 en transmisión, 148.76 en recepción y 179.35 (93.55 TX y 85.80 RX) dúplex. Se calculó además el tiempo mínimo de autonomía del sistema a 2.1 días (15 horas de uso diarias), al alimentar el enlace de comunicación con la planta de energía solar. El costo material de la instalación requiere: Q14,368.70 de inversión inicial y Q573.95 de amortización anual.

# I. INTRODUCCIÓN

La comunicación inalámbrica ha probado ser una opción práctica y confiable en la expansión de redes de datos, en comparación a las conexiones cableadas de cobre y fibra óptica. El acceso a las redes de información en Guatemala ha explotado en los últimos años, sobre todo en la capital.

En el interior del país, su territorio primordialmente rural y geografía accidentada representan un reto para las empresas de telecomunicaciones en cuanto a la ubicación e instalación de los equipos de transmisión necesarios para alcanzar una cobertura, si no total, al menos suficientemente extensa. Se adiciona a esto el factor de desigualdad inherente en la estructura social del país, cosa que condiciona a la mayoría de la población en el acceso a bienes y servicios, principalmente la tecnología, siendo esta privilegio casi exclusivo de las clases media y alta [4].

El llevar tecnología a las regiones más remotas del país, como el acceso a Internet y el intercambio de datos, es, no obstante, un proceso largo. La introducción de este recurso debe empezar por la educación y capacitación de las personas, con tal de poder apreciar el potencial en el uso de estos sistemas, y con ello, poder sacar el mejor provecho de ellos. Por otro lado, a medida que más personas se introducen en el uso de los sistemas de la informática, la demanda por un servicio de conexión confiable y de mayor capacidad es cada vez más grande, por lo que es necesario desarrollar soluciones para satisfacer esta demanda.

Actualmente, la migración a tecnología de nueva generación para las redes de datos ha avanzado gracias a los protocolos desarrollados por distintas organizaciones. La IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) introdujo en el 2002 la familia de protocolos 802.16, conocida popularmente como WiMAX, la cual se ha desplegado en redes de conexión fija y móvil en diversas partes del mundo [13]. En Guatemala, Yego es una de las empresas que actualmente hace uso de transmisores de tecnología WiMAX para ofrecer Internet móvil de amplia cobertura en la capital, usando bandas de frecuencia no licenciadas.

Por otro lado, los equipos WiMAX de conexión fija permiten levantar enlaces inalámbricos dedicados que logran cubrir grandes distancias y proveen amplios anchos de banda, lo cual es de gran utilidad para la interconexión de redes y el intercambio de datos para aplicaciones científicas o comerciales [30].

El objetivo de este proyecto es implementar un enlace punto a punto, con el uso de antenas de transmisión WiMAX. Se desea determinar también si es factible el uso de una planta de energía solar para sostener un extremo del enlace de comunicación. Para ello se instaló el equipo de transmisión y de alimentación entre dos puntos dentro del campus de la Universidad del Valle de Guatemala y se realizaron una serie de pruebas para comprobar el funcionamiento del sistema y determinar sus características técnicas y físicas.

## II. OBJETIVOS

### A. OBJETIVO GENERAL

Implementar un enlace de comunicación inalámbrica entre dos puntos dentro del campus universitario de la UVG utilizando equipos de tecnología WiMAX y energía solar como fuente de alimentación.

### B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir los parámetros técnicos de los equipos de comunicación y alimentación utilizados para el funcionamiento del sistema.
2. Especificar las características del enlace implementado y la autonomía del sistema.
3. Establecer el costo total del equipo y los materiales requeridos para la implementación del sistema de comunicación.

### III. JUSTIFICACIÓN

El despliegue de un enlace de comunicación a pequeña escala, sostenido por energía renovable representa una posible solución que contribuiría a expandir la comunicación digital en Guatemala. Las grandes ventajas que ofrece la familia de protocolos WiMAX (IEEE 802.16) junto con el estándar Wi-Fi (IEEE 802.11) para conexiones inalámbricas permitirían el despliegue de redes de comunicación para el acceso a las redes de datos en las áreas más alejadas y con menor presencia de tecnología en el país.

Un enlace dedicado de banda ancha para la transmisión de datos puede ser útil en el desarrollo de proyectos científicos. En áreas rurales, un sistema de este tipo puede proveer de comunicación digital a comunidades remotas, sin depender de la disponibilidad de energía eléctrica comercial. Debido a esto, el sistema tendría aplicaciones importantes en muchas áreas de interés, como sistemas de comunicación alterna durante algún desastre natural, monitoreo médico de pacientes (telemetría), acceso de información en la Red para centros educativos, establecimiento de WISPs (Proveedores de Servicio de Internet Inalámbrico) en áreas de difícil instalación de cableado, entre otros [30].

La tecnología WiMAX es una de las propuestas más prometedoras en el campo de las telecomunicaciones digitales. Numerosas redes WiMAX se han implementado ya con éxito en diferentes partes del mundo y el número va en aumento [7]. Todos los pronósticos indican que la migración a tecnologías de nueva generación será una realidad en pocos años, por lo que es imperativo que estas empiecen a tomar presencia en el país.

## IV. ANTECEDENTES

El proyecto surgió inicialmente en el 2007 como una iniciativa apoyada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT) para la implementación de un sistema de prueba que demostrara la unión de un sistema de comunicación de última milla con un módulo de alimentación a base de energía solar. El proyecto se desarrolló como un trabajo de graduación del Departamento de Ingeniería Electrónica llevado a cabo por el Ing. Manuel Ruano Siekavizza, con la colaboración del entonces director de departamento M.Sc. Carlos Tercero. El presente trabajo pretende retomar el proyecto y darle conclusión, de tal forma que la tecnología WiMAX pueda ser verificada e implementada en el campus de la Universidad.

En un inicio, el equipo adquirido para el proyecto incluía dos antenas “5012-SUR” para recepción y un módulo de transmisión “5054” de la marca Proxim Wireless, con los cuales se realizaron las primeras pruebas de conexión. A partir del 2012, el equipo Proxim tuvo que ser reemplazado por nuevas antenas, esta vez de Ubiquiti Networks, debido al desgaste y mal estado en que se encontró el equipo. De igual manera, la batería utilizada en la instalación solar tuvo que ser reemplazada. Adicionalmente, para el sistema de alimentación se contaba ya con un panel solar Kyocera de 65 W, un controlador solar Morningstar y un inversor de corriente Xantrex como proveedor de corriente alterna para las antenas. Con este equipo, se procedió a montar y conectar el sistema final.

## V. MARCO TEÓRICO

### A. TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE ONDAS EN ENLACES PUNTO A PUNTO

1. **Ondas de radio.** Las comunicaciones inalámbricas hacen uso de ondas electromagnéticas para enviar información a través del espacio. Una onda electromagnética que es irradiada por una antena se conoce como una onda de radio [8]. Las ondas de radio transmitidas se propagan a través del medio hasta alcanzar el rango de una antena de recepción.

Dependiendo de la aplicación, las ondas o señales de radio abarcarán un rango definido de frecuencias en el espectro electromagnético. Dicho rango se conoce como el ancho de banda de la señal y está estrechamente relacionado con la cantidad de información (bits) que se pueden enviar por unidad de tiempo, i.e. la tasa de transmisión de datos [8].

Para aplicaciones de comunicación a larga distancia (comunicación satelital, enlaces punto a punto, etc.), la transmisión se realiza a altas frecuencias, entre 1 y 100 GHz, rango conocido como de las “microondas” [8]. Se utilizan para ello antenas direccionales en ambos extremos del enlace, las cuales concentran la potencia de transmisión en haces dirigidos, al contrario de las antenas omnidireccionales para difusión masiva que utilizan la televisión y la radio comercial [28].

Las altas frecuencias de los transmisores de microondas son utilizadas para aplicaciones de comunicación a larga distancia por tres razones:

- permiten que las señales transmitidas cubran distancias más lejanas,
- ofrecen un ancho de banda amplio para el veloz flujo de datos y
- requieren de antenas más pequeñas para la transmisión (a mayor frecuencia, el tamaño de la antena disminuye) [19].

2. **Bandas de transmisión.** El espectro electromagnético en su mayoría está altamente controlado por la legislación de telecomunicaciones, según la cual, únicamente los propietarios de licencias tienen permitida la transmisión de señales a una frecuencia determinada. Sin embargo, existen regiones en el espectro que son de uso libre, i.e. no requieren de una licencia y que son avaladas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) [30].

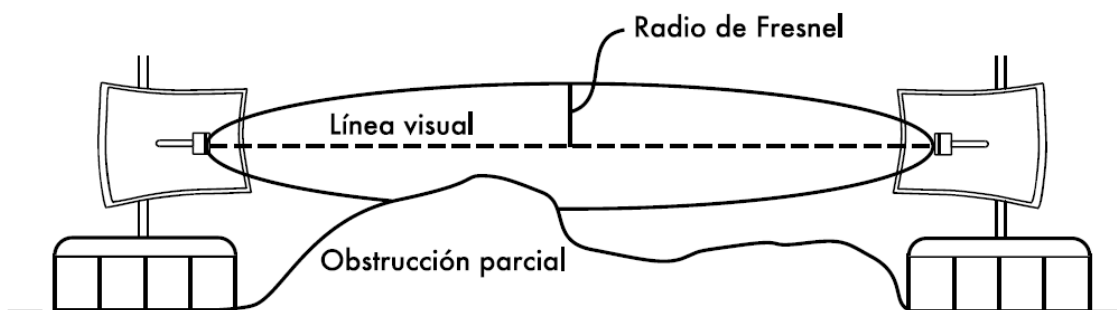
Las bandas ISM (Industrial, Scientific, Medical) son rangos de frecuencia para usos generales y de libre acceso. Por ejemplo, el estándar para los dispositivos Wi-Fi, utiliza las bandas de 2.4 GHz y 5.8 GHz, las cuales se encuentran en el grupo de las ISM [29]. En Guatemala, la Superintendencia de

Telecomunicaciones (SIT) ha reservado en concordancia con las recomendaciones de la ITU las bandas ISM como suspendidas de todo trámite de adjudicación regulada, con tal de promover el desarrollo de las telecomunicaciones y dar una mayor difusión a la tecnología para alcanzar a todos los sectores de la población [21, 22].

3. Línea visual y zonas de Fresnel. En enlaces punto a punto es de suma importancia mantener entre las antenas lo que se conoce como línea visual o “línea de vista” (comúnmente abreviada LOS, por “Line of sight”). El concepto se refiere a que dos antenas separadas cierta distancia tienen línea visual si pueden “verse” una a la otra sin obstrucción alguna en el camino [8] (ver Figura 1).

Debido a la física de las señales de microonda y su propagación en el espacio, la trayectoria de los haces de la señal se ensancha en un enlace de comunicación [8]. Una visualización gráfica de este comportamiento muestra la difusión de la potencia de la señal conforme avanza en el espacio. De acuerdo a la densidad de potencia de la señal, es posible dividir teóricamente el espacio que ocupa la onda en “zonas de potencia”, denominadas zonas de Fresnel [15].

Figura 1. Primera zona de Fresnel en un enlace punto a punto. [8]



La mayor parte de la potencia de la señal se encuentra en la primera zona de Fresnel, por lo que es de vital importancia que este espacio se encuentre lo más descubierto posible. Una regla general para la conexión exitosa en un enlace indica que la primera zona de Fresnel debe quedar libre de obstáculos al menos en un 60%. En general, esta regla asegura que los niveles de potencia en ambos extremos serán suficientes para levantar el enlace satisfactoriamente [15]. Por lo tanto, tener línea visual entre antenas es una condición necesaria pero no suficiente para asegurar el correcto funcionamiento de un enlace de comunicación.

Para el cálculo de la zona de Fresnel se utiliza la medida del radio de Fresnel (Figura 1). Esta medida asiste en el cálculo de la distancia máxima del enlace, así como de las alturas de las torres para las antenas, pero sobre todo indica la distancia que debe separar la trayectoria de la línea visual con cualquier obstáculo en el camino [15]. El radio en metros para la primera zona de Fresnel está dado por:

(Ec. 1)

$$r_f = 17.32 \sqrt{\frac{d_1 * d_2}{f * D}}$$

donde  $d_1$  y  $d_2$  son las distancias en metros desde el punto de interés a los extremos del enlace,  $D$  es la distancia total del enlace en metros y  $f$  es la frecuencia de transmisión en MHz [15]. Nótese que el radio de Fresnel es máximo cuando  $d_1$  y  $d_2$  son iguales a  $D/2$ .

4. Cálculo de un radioenlace. Para garantizar que las antenas en ambos extremos del enlace puedan comunicarse, es necesario que la potencia de la señal en la recepción tenga un valor mínimo para poder detectar e interpretar correctamente la información transmitida [2]. La siguiente ecuación muestra el cálculo típico de un radioenlace a partir de las ganancias y pérdidas básicas en el sistema:

(Ec. 2) [2]

|   |
|---|
| <p>Potencia del transmisor [dBm] – Pérdida en el cable TX [dB] + Ganancia de antena TX [dBi] – Pérdidas en la trayectoria del espacio abierto [dB] + Ganancia de antena RX [dBi] – Pérdidas en el cable del RX [dB] – <b>Sensibilidad del receptor [dBm] = Margen</b></p> |
|---|

La potencia del transmisor es la potencia de salida del radio y se ajusta de acuerdo a los niveles de potencia esperados en el extremo opuesto. Las pérdidas en los cables de transmisión y recepción (TX y RX) dependen del tipo de cable, su longitud y la frecuencia de operación y son usualmente de 0.1 a 1 dB/m. Debe incluirse a esto una pérdida de 0.25 dB por cada conector por el que pase la señal hacia o desde las antenas, si hubieran [2].

La ganancia es un factor de amplificación propio de la antena; puede ser de 2 hasta 30 dBi dependiendo de su diseño. La sensibilidad del receptor se refiere al nivel mínimo de potencia de recepción para decodificar correctamente los bits lógicos y alcanzar cierta tasa de transmisión de bits [2]. El margen es el valor por el cual la potencia de señal recibida excede a la sensibilidad del receptor [13]. Se utiliza un margen positivo para compensar la atenuación de la señal y las pérdidas causadas por interferencia u otras fuentes de ruido en el ambiente (lluvia, por ejemplo). Si la potencia recibida es suficientemente mayor a la sensibilidad, el enlace podrá transmitir datos con un mínimo de error.

La escogencia del margen se basa en la disponibilidad requerida del enlace para las comunicaciones. En enlaces altamente críticos se calculan disponibilidades del 99.999 %, lo cual requiere de un margen alto, entre 20 y 30 dB. En general, para ambientes rurales se utiliza típicamente un margen de 8 dB, mientras que para ambientes urbanos se requiere de un margen mayor, usualmente de 13 dB, para una disponibilidad del 99.0 %, debido a una mayor presencia de ondas electromagnéticas y ruido en el ambiente [2].



La mayor fuente de pérdidas en la transmisión se da en el trayecto sobre el espacio abierto debido a la atenuación que sufre la señal por factores del medio. La pérdida en espacio abierto (“Free Space Loss”) en decibeles se obtiene de la siguiente ecuación:

(Ec. 3) [2]

$$FSL(\text{dB}) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) - 147.55$$

con  $d$  (distancia del enlace) en metros y  $f$  (frecuencia de transmisión) en Hertz. Nótese que las pérdidas en el medio aumentan tanto con la distancia como con la frecuencia.

## B. PROTOCOLO IEEE 802.16

1. **WiMAX.** El estándar 802.16 de la IEEE comprende una familia de protocolos, algunos terminados y otros todavía en progreso. Actualmente el estándar se encuentra asociado al grupo industrial WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), bajo la tutela de la organización WiMAX Forum, encargada de velar por la compatibilidad de operación y certificación de dispositivos que utilizan tecnología 802.16 [30].

El estándar original se concibió como un sistema de acceso a información establecido alrededor de una estación base central que da servicio a múltiples usuarios dispersados en un área relativamente grande, cubriendo un radio de varios kilómetros. De ahí que se considere a WiMAX como una solución viable para desplegar redes de área metropolitana (MANs, por sus siglas en inglés) [30].

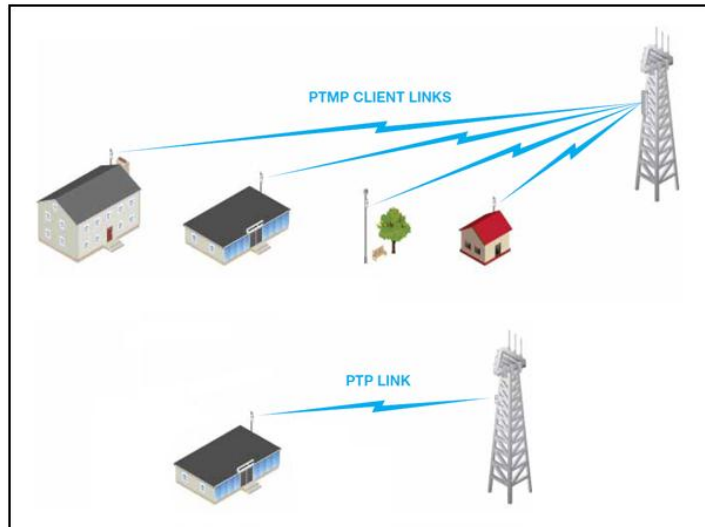
Los protocolos más recientes de la tecnología 802.16 se han desarrollado para proveer el servicio de conexión de banda ancha a la red, con la cobertura y calidad de servicio de las redes de telefonía, además de ofrecer soluciones estandarizadas para la conectividad punto a punto de larga distancia [27].

2. **Protocolos 802.16.** Actualmente, las variantes de mayor popularidad de la familia WiMAX son los protocolos 802.16d para despliegues fijos y 802.16e para despliegues móviles.

a. **802.16d.** El protocolo de acceso fijo permite el establecimiento de un radioenlace entre la estación base y un equipo suscriptor fijo, situado a cierta distancia. 802.16d permite amplios anchos de banda tanto en enlaces punto a punto (PTP) como punto a multipunto (PTMP) [26].

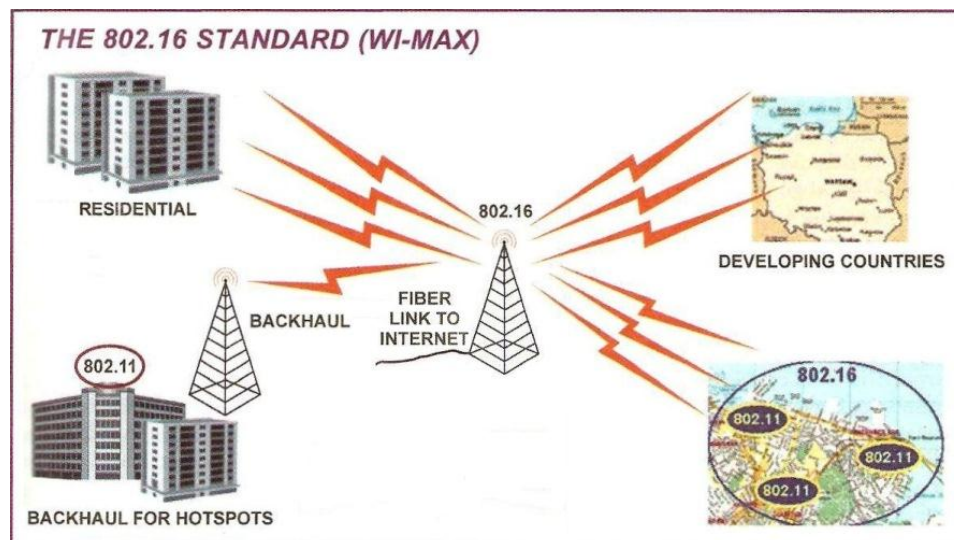
b. **802.16e.** El protocolo de acceso móvil permite el desplazamiento del usuario de la misma manera que en las redes de telefonía celular. Actualmente compite con el estándar de tecnología LTE (Long Term Evolution) por ser la alternativa para las operadoras de telecomunicaciones que apuestan por servicios de movilidad [26].

Figura 2. Enlaces PTMP y PTP. [6]



3. Estructura de una red WiMAX. La estructura típica de una red WiMAX se muestra en la Figura 3. Una red WiMAX es similar a una red de telefonía en que ambas usan estaciones base de transmisión para dar cobertura a grandes extensiones de terreno. Una torre central provee señal de conexión a torres de distribución intermedia (“backhaul”) en un sector a través de un cable de fibra conectado directamente con el proveedor de servicio de internet. Cada torre de transmisión puede a su vez conectar con estaciones suscriptoras instaladas en edificios, hogares y cualquier otro lugar con línea visual hacia la torre. El último paso es la conexión a nivel de red de área local a través de puntos de acceso inalámbricos Wi-Fi (“hotspots”) y/o puntos de conexión físicos sobre una red Ethernet [30].

Figura 3. Estructura de una red WiMAX. [30]



4. **Conexiones de última milla.** En telecomunicaciones, el término “última milla” es utilizado para referirse al tramo final en la entrega de conectividad por parte del proveedor de telecomunicaciones hacia el usuario. En realidad, el tramo puede ser considerablemente mayor que una milla, especialmente en áreas rurales [12]. La cobertura de este último tramo es usualmente un reto para el proveedor debido a que el despliegue estructural que conlleva la instalación del cableado tiene un costo elevado y es físicamente dificultoso. Esto ha llevado a que los proveedores apuesten por soluciones inalámbricas de pequeño y mediano alcance para aplicaciones de conexión PTP y PTMP por ser prácticas y económicas [30].

## C. SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN POR ENERGÍA SOLAR

1. **Sistemas fotovoltaicos.** El uso de paneles fotovoltaicos para la captación de luz solar ofrece una opción de energía alternativa para la generación autónoma de electricidad, i.e. sin necesidad de una conexión a la red eléctrica. Los sistemas de energía solar aprovechan la capacidad que poseen ciertos semiconductores para convertir energía luminosa en corriente eléctrica, con la cual es posible proveer alimentación a dispositivos eléctricos y electrónicos [8].

El dimensionamiento de un sistema de energía solar dependerá de los requerimientos energéticos de los equipos a alimentar, propios de la aplicación, por lo que el diseño efectivo de un sistema fotovoltaico debe considerar la capacidad de producción de energía del equipo, así como adaptarse a las condiciones ambientales y climatológicas de la locación para lograr el mayor rendimiento energético posible [8].

### 2. Componentes de un sistema de energía solar

a. **Panel solar.** Un panel solar se compone de celdas solares (arreglos de semiconductores fotovoltaicos) que captan energía en forma de luz solar para luego transformarla en corriente eléctrica. Las celdas están conectadas eléctricamente para proporcionar un valor específico de corriente y voltaje [8]. La corriente que produce un panel varía proporcionalmente con la intensidad de luz solar, la cual es determinada por factores como: la hora del día, las condiciones climáticas y el mes del año. La potencia del panel determinará el máximo de energía eléctrica que puede producir [8].

b. **Batería.** La batería o acumulador tiene dos propósitos fundamentales en un sistema fotovoltaico: proporcionar energía eléctrica al sistema cuando el panel no la proporciona y almacenar la energía proporcionada por el panel cuando no se consume inmediatamente. El tipo más común de batería empleado en aplicaciones solares es el de plomo-ácido, las cuales logran suministrar una potencia instantánea superior a la que los paneles pueden generar, necesaria para la puesta en marcha de algunos elementos (un motor o una bomba de agua, por ejemplo) [8].

Para aplicaciones que requieren de continuidad de alimentación por períodos largos de tiempo existen las baterías de ciclo profundo, las cuales permiten una descarga continua hasta del 70 % antes de tener que volver a ser cargadas. Esto las hace ideales para alimentar equipos electrónicos de bajo consumo que deben permanecer en operación durante días [8].

Un parámetro importante a considerar en la instalación de baterías para sistemas fotovoltaicos es su temperatura de operación. La recomendación de los fabricantes en el almacenamiento de la batería es mantener una temperatura entre 15° y 25° C, y en un ambiente no húmedo [25]. La batería debe permanecer dentro de estos límites de temperatura para alargar su vida útil y evitar daños o degradación. Temperaturas extremas pueden ocasionar la rajadura del contenedor y el derramamiento del líquido de la batería.

La capacidad de una batería se da usualmente en una medida de amperios-hora (Ah), lo cual indica la cantidad de amperios que la batería puede proveer en cierta duración de tiempo. Por ejemplo, una batería de 20 amperios-hora puede proveer continuamente 20 amperios en una hora de descarga, o 100 amperios en 1/5 de hora. Los fabricantes comprueban el valor de la capacidad para períodos de 6, 20 y 100 horas, dependiendo de la aplicación, siendo 20 el más común para sistemas fotovoltaicos [16].

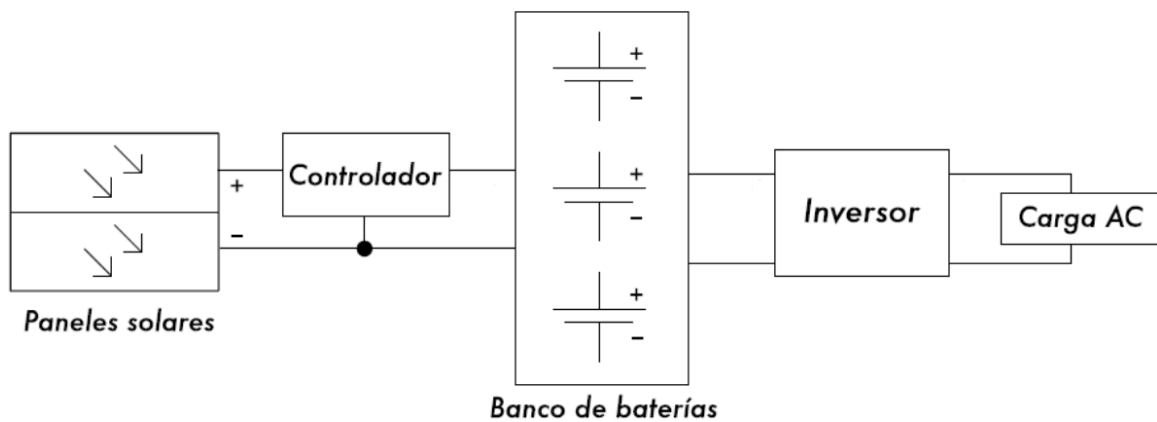
c. Controlador. El controlador o regulador solar es un dispositivo programado para monitorear la carga de la batería, asegurando que funcione en condiciones apropiadas y evitando la sobrecarga o sobredescarga de la misma. Adicionalmente monitorea el voltaje en las terminales del panel y la actividad en la carga para tomar decisiones en cuanto a la conexión o desconexión entre la batería y el resto del sistema [8].

d. Inversor. Un inversor de poder es un convertidor DC/AC, i.e. convierte la corriente continua (DC) proveniente de la batería en corriente alterna (AC) para la alimentación de dispositivos eléctricos. El parámetro más importante en el inversor es la potencia máxima de salida que puede proveer. Cabe notar que se pierde un poco de energía en la conversión, debido a la operación interna del inversor [8].

e. Cableado y conectores. Un cableado adecuado en un sistema de poder asegura una transferencia eficiente de energía hacia los dispositivos. El diámetro de los cables a utilizar dependerá principalmente de la corriente máxima que manejará cada uno de los equipos. Éste se especifica en la jerarquía del American Wire Gauge (AWG) para diámetros y amperajes. De la misma manera, las terminales utilizadas en la conexión de los cables con el equipo deben obedecer el mismo criterio [8]. Asimismo, los cables de transporte de energía entre la batería y el resto del sistema no deben sobrepasar cierta longitud para evitar pérdidas y degradación de los cables por sobrecalentamiento del conductor.

3. **Conexión de los dispositivos.** La Figura 4 muestra un diagrama general de la interconexión de los equipos para un sistema fotovoltaico. Uno o varios paneles (en paralelo) generan corriente eléctrica cuando reciben luz solar. A través del controlador, el banco de baterías almacena la energía recolectada proveniente de los paneles. El inversor convierte la energía almacenada para satisfacer las necesidades de la carga, la cual consume finalmente la energía para efectuar el trabajo. Si todos los elementos se conectan correctamente y reciben mantenimiento apropiado, el sistema puede soportarse a sí mismo por largo tiempo. Esto dependerá sobre todo de la vida útil de las baterías, la cual puede ser hasta de 8 años si se les da un manejo adecuado [8].

Figura 4. Diagrama de una instalación solar con una carga de corriente alterna. [8]



## VI. METODOLOGÍA

### A. CONSIDERACIONES GENERALES

Para llevar a cabo la conexión del enlace y el dimensionamiento de la planta de energía satisfactoriamente, se dividió la metodología en dos pruebas: una prueba de transmisión a larga distancia y una prueba de transmisión a corta distancia alimentada por el sistema fotovoltaico. La primera prueba se realizó para examinar el performance de las antenas al apartarlas cierta distancia entre dos puntos de la universidad y probar la velocidad en la transmisión de datos. Por cuestiones de movilidad del equipo de energía solar, en la primera prueba se utilizó energía eléctrica convencional para las antenas. La segunda prueba se realizó para comprobar el funcionamiento del sistema siendo alimentado por la planta de energía solar y estimar su tiempo de autonomía de acuerdo a la cantidad de energía producida.

El sistema de comunicación fue utilizado para enlazar una distancia menor a 1 kilómetro, dentro de las instalaciones de la universidad. Una primera ventaja de esto es que facilita la orientación de las antenas para tener línea visual. Segundo, simplifica los cálculos del enlace dado que no es necesario considerar la elevación de la curvatura terrestre a esa distancia. Este factor entra en consideración a partir de los 5 kilómetros [2]. Por último, se minimizan las pérdidas en el espacio abierto, las cuales aumentan con la distancia, por lo que los transmisores no requieren trabajar a su máxima potencia para alcanzar el otro extremo [2].

### B. SISTEMA DE COMUNICACIÓN

Para el enlace de comunicación se utilizaron dos antenas de microondas: la NanoStation M5 y NanoStation Loco M5 (Hi-power, 2x2 MIMO AirMAX TDMA stations) de Ubiquiti Networks. Dichas antenas están diseñadas para poder trabajar tanto como estaciones base (puntos de acceso) como suscriptores de servicio en enlaces PTP y PTMP. El software integrado en las antenas permite configurar los parámetros de: ancho de banda del canal, frecuencia de transmisión y potencia de salida, con lo cual es posible adaptar la operación de las antenas acorde a las necesidades del enlace y garantizar un óptimo funcionamiento de acuerdo a las condiciones físicas y climáticas particulares a esa localidad.

Las antenas NanoStation forman parte de la familia AirMAX desarrollada por Ubiquiti Networks, la cual se basa en las especificaciones del protocolo IEEE 802.16d y combina las tecnologías TDMA (Time Division Multiple Access) y MIMO (Multiple Input Multiple Output) para incrementar la cantidad de datos transmitidos por unidad de tiempo y el mejor aprovechamiento del espectro. Las modulaciones BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM permiten a las antenas NanoStation alcanzar hasta 150 Mbps de transmisión (usando el máximo ancho de canal) y lograr distancias de hasta 15 Km con línea de vista [17].

Las características físicas y eléctricas de las antenas se muestran a continuación:

Cuadro 1. Características de antenas NanoStation. [24]

| Parámetro                  | NanoStation M5     | NanoStation Loco M5 |
|----------------------------|--------------------|---------------------|
| Tamaño                     | 29.4 x 8 x 3 cm    | 163 x 31 x 80 mm    |
| Temperatura de operación   | -30° a 75° C       | -30° a 80° C        |
| Frecuencia de operación    | 5170 a 5875 MHz    | 5170 a 5875 MHz     |
| Consumo máximo de potencia | 8 W                | 5.5 W               |
| Ganancia de antena         | 16 dBi             | 13 dBi              |
| Potencia de transmisión    | 8 a 27 dBm         | 4 a 23 dBm          |
| Sensibilidad de recepción  | -96 dBm $\pm$ 2 dB | -96 dBm $\pm$ 2 dB  |
| Multiplexación             | TDMA/OFDM          | TDMA/OFDM           |

Figura 5. Antenas NanoStation Loco M5 y M5. [24]



Las antenas NanoStation integran el software AirOS para asistir a los diseñadores del sistema con herramientas de monitoreo y análisis del enlace, entre ellas: pruebas de velocidad a través del enlace, pruebas para la alineación de las antenas y despliegues gráficos del espectro que se actualizan en tiempo real para observar la distribución de potencia en los canales de las antenas. Gracias a este software, es posible obtener fácilmente mediciones y parámetros útiles en la caracterización del enlace [6].

La operación de ambas antenas requiere de dos conexiones: alimentación eléctrica y conexión a una red Ethernet. Para la alimentación, las antenas usan un inyector de poder POE (Power-Over-Ethernet) como fuente de poder, el cual se encarga de proveer 24 VDC (a partir de una conexión de 120 VAC a 60Hz) por medio de cable UTP hacia las antenas. El adaptador envía entonces tanto voltaje como datos a las antenas.

Figura 6. Inyector de poder POE 24 VDC para alimentación de antenas.



## C. PLANTA DE ENERGÍA SOLAR

1. Equipo. El sistema de energía solar es el encargado de alimentar la antena NanoStation Loco M5 del lado del usuario. Para ello se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

- 1 panel solar Kyocera de 0.75 x 0.65 metros, 22 VDC, 65 W (incluye cable de conexión),
- 1 batería de ciclo profundo Varta, 12 VDC, 90 amperios-hora,
- 1 inversor de corriente Xantrex XM-1000 de 1 KW de poder,
- 1 controlador solar Morningstar SHS-6 de 6 amperios,
- 5 metros de cable eléctrico #6 AWG,
- 5 metros de cable #10 AWG,
- 4 terminales eléctricas de argolla y 4 de punta.

Figura 7. Panel solar Kyocera.





Figura 8. Controlador solar Morningstar.



Figura 9. Batería Varta de ciclo profundo.



Figura 10. Inversor de corriente Xantrex.



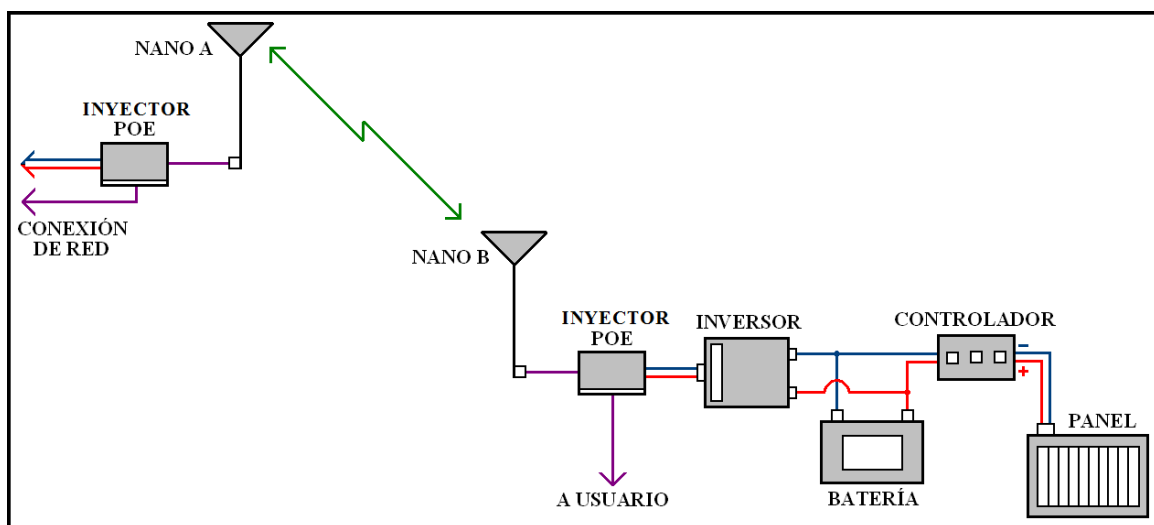
2. Dimensionamiento del sistema de energía solar. El factor más importante a determinar para la planta de energía es su capacidad, i.e. si podrá suplir la corriente necesaria para el funcionamiento de la antena de manera continua. Esto puede calcularse a partir de la potencia máxima que provee el panel solar, la capacidad de la batería y la demanda energética de los dispositivos de comunicación, pero dependerá sobre todo de las condiciones climáticas que se presenten para proveer de energía al sistema [8]. La disponibilidad de radiación solar para un sistema fotovoltaico no es siempre fácil de predecir.

El método más directo de dimensionamiento consiste en estimar las necesidades de energía, y en base a ellas calcular los requerimientos de un sistema que trabaje durante el mayor tiempo posible. Sin embargo, dado que la mayoría de los dispositivos eléctricos fueron adquiridos previo a la realización de este proyecto, se realizó una estimación de la producción energética de la planta y se determinó el tiempo que podrá sostener al suscriptor del enlace de comunicación.

## D. DISEÑO DEL SISTEMA

Para las pruebas se utilizaron cables de red (UTP Cat5) para el envío de datos desde una conexión de red Ethernet hacia los transmisores. Del lado de la NanoStation M5 (Nano A), se conectó la antena a un punto de acceso de red en el laboratorio J-306 a través del inyector POE. Del lado de la NanoStation Loco M5 (Nano B), la salida de datos del adaptador se conectó directamente a una computadora portátil para su recepción. El diseño general del sistema junto con todos los elementos involucrados se muestran en el siguiente diagrama:

Figura 11. Diagrama de diseño para enlace de comunicación y planta de energía solar.



El sistema fotovoltaico (panel, controlador, batería e inversor) trabaja a un voltaje nominal de 12 VDC. El inversor provee una señal eléctrica de 120 VAC a 60 Hz después de la conversión, con lo cual se alimenta el inyector POE para la antena Loco M5, el cual transporta datos desde la máquina del usuario hacia la antena y viceversa.

En el enlace, Nano A es el punto de acceso que provee el servicio de conexión para la estación suscriptora, Nano B. En una aplicación de campo, Nano A estaría montada en un punto alto y despejado, por ejemplo una torre de transmisión, de tal forma que tenga línea visual directa y libre de obstáculos hacia la ubicación del suscriptor. Adicionalmente recibiría energía convencional directamente de una toma de 120 VAC o de alguna otra fuente de poder en la torre. Del lado del usuario, a cierta distancia de la torre de transmisión, Nano B recibe la señal de conexión de la estación base, siendo este extremo del enlace el que es alimentado por energía solar. La señal recibida en Nano B puede entonces utilizarse para proveer de señal a una o varias computadoras por medio de una red Ethernet o un punto de acceso inalámbrico Wi-Fi.

Para las pruebas realizadas, las antenas fueron montadas mediante cinturones plásticos a tubos metálicos de 4 cm de diámetro. Las alturas de los tubos fueron de 1.50 m para Nano A y 0.50 m para Nano B. Los tubos fueron orientados verticalmente con niveles para asegurar línea visual y obtener la mejor recepción posible. Adicionalmente, la batería, el inversor y el controlador solar se almacenaron en una caja plástica bajo sombra en la terraza del edificio J.

Figura 12. Montaje de antena NanoStation M5 en tubo metálico con base.



## VII. RESULTADOS

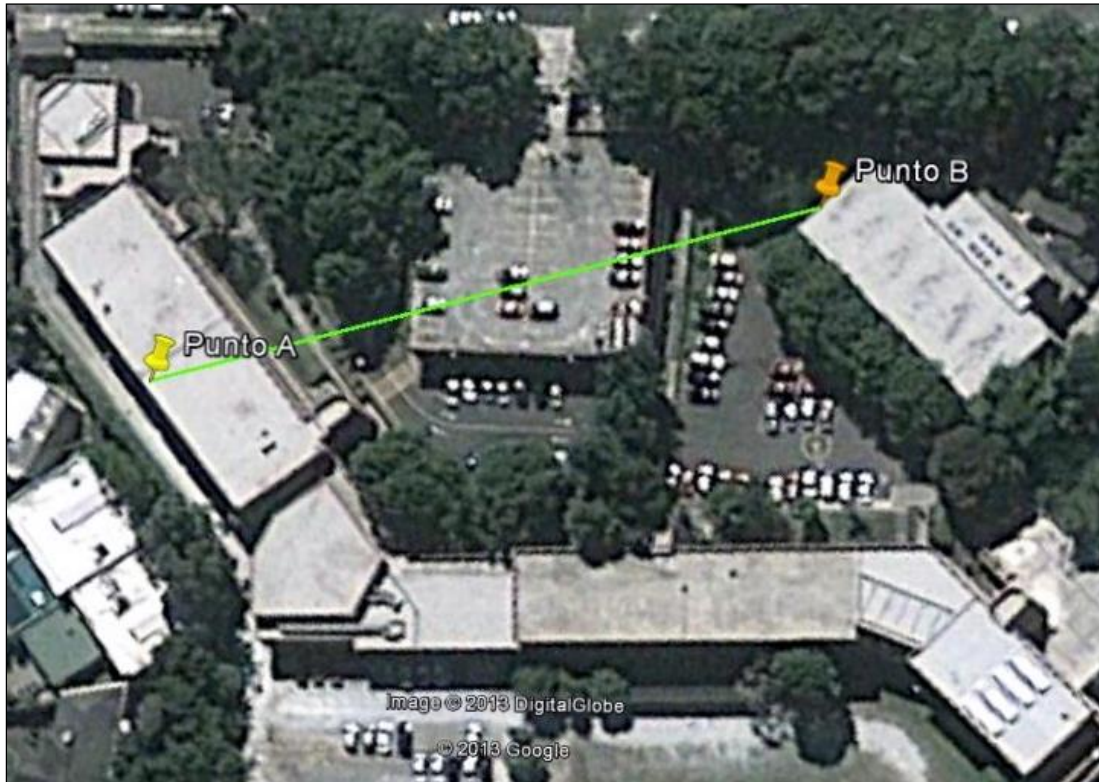
### A. PRUEBA DE TRANSMISIÓN A LARGA DISTANCIA

1. Ubicación y distancia del enlace. La primera prueba para el enlace de comunicación se realizó entre las terrazas de los edificios J y A de la universidad. Una lectura con GPS de ambos puntos y su ubicación en Google Earth permitió establecer la distancia aproximada entre ambos extremos. A partir de la diferencia de altitud se obtuvo la distancia total del enlace. A continuación se detallan las mediciones:

Cuadro 2. Mediciones de ubicación y distancia para el primer enlace.

|                        | Punto A (Edificio J)           | Punto B (Edificio A)           |
|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Ubicación geográfica   | 14°36'20.20"N<br>90°29'18.00"O | 14°36'16.90"N<br>90°29'19.10"O |
| Elevación (m. s. n. m) | 1518                           | 1520                           |
| Distancia lineal       | 106.45 m                       |                                |
| Distancia total        | 106.47 m                       |                                |

Figura 13. Vista superior de los puntos para enlace de larga distancia. [Google Earth]



2. Cálculo del enlace. Dado que no hay modulación ni amplificación de la señal previa fuera de la antena, no se consideran pérdidas en cables ni conectores, por lo tanto, la ecuación para el cálculo del enlace (Ec. 2, página 7) se simplifica a lo siguiente:

(Ec. 4) [2]

$$\text{Potencia del transmisor [dBm]} + \text{Ganancia de antena TX [dBi]} - \text{Pérdidas en la trayectoria del espacio abierto [dB]} + \text{Ganancia de antena RX [dBi]} - \text{Sensibilidad del receptor [dBm]} = \text{Margen}$$

Dado que en el ambiente de la Universidad existen puntos de acceso Wi-Fi y otros dispositivos inalámbricos que pueden causar interferencia, un margen de 13 dB de potencia es suficiente para un enlace confiable, considerando que la distancia no es muy grande. Las pérdidas en el espacio abierto se calcularon mediante la fórmula de FSL (Ec. 3, pág. 8) con una frecuencia de 5745 MHz.

Cuadro 3. Cálculo de enlace de larga distancia.

| Parámetro       | Valor    |
|-----------------|----------|
| Potencia TX     | 8 dBm    |
| Ganancia TX     | 16 dBi   |
| FSL             | 88.18 dB |
| Ganancia RX     | 13 dBi   |
| Sensibilidad RX | - 94 dBm |
| Total (margen)  | 42.82 dB |

3. Configuración y posicionamiento de antenas. Los parámetros de las antenas para el enlace se configuraron a través de una computadora portátil a través del puerto Ethernet (ver Anexo A). Las configuraciones realizadas en cada antena se muestran a continuación:

Cuadro 4. Configuración de antenas. Parámetros físicos y de red.

| Parámetro                       | NanoStation M5   | NanoStation Loco M5 |
|---------------------------------|------------------|---------------------|
| Modo inalámbrico                | Access Point WDS | Station WDS         |
| Ancho del canal                 | 40 MHz           | 40 MHz              |
| Frecuencia                      | 5745 MHz         | 5745 MHz            |
| Potencia de transmisión         | 8 dBm            | 8 dBm               |
| Dirección IP                    | 192.168.6.254    | 192.168.6.236       |
| Máscara de subred               | 255.255.255.128  | 255.255.255.128     |
| Puerta de enlace predeterminada | 192.168.6.129    | 192.168.6.129       |

A partir de la distancia total, se determinó el radio máximo de la primera zona de Fresnel (Ec. 1, pág. 7) y se determinó el despeje necesario de la línea visual al 60 % del radio.

Cuadro 5. Medidas de la primera zona de Fresnel.

| Radio de Fresnel | Radio de Fresnel al 60 % |
|------------------|--------------------------|
| 1.18 m           | 0.708 m                  |

Conectados los transmisores, la conexión se hizo posible y la recepción de datos se pudo observar en la computadora. La distancia del enlace permitió utilizar el ancho del canal a su mayor capacidad (40 MHz). La potencia de recepción calculada fue igualmente corroborada con el software AirOS. Las imágenes siguientes muestran distintas vistas del enlace y el resultado de la conexión:

Figura 14. Vista del enlace desde el edificio J (Punto A).



Figura 15. Vista del enlace desde el edificio A (Punto B).



Figura 16. Conexión exitosa con la red a través del enlace inalámbrico.

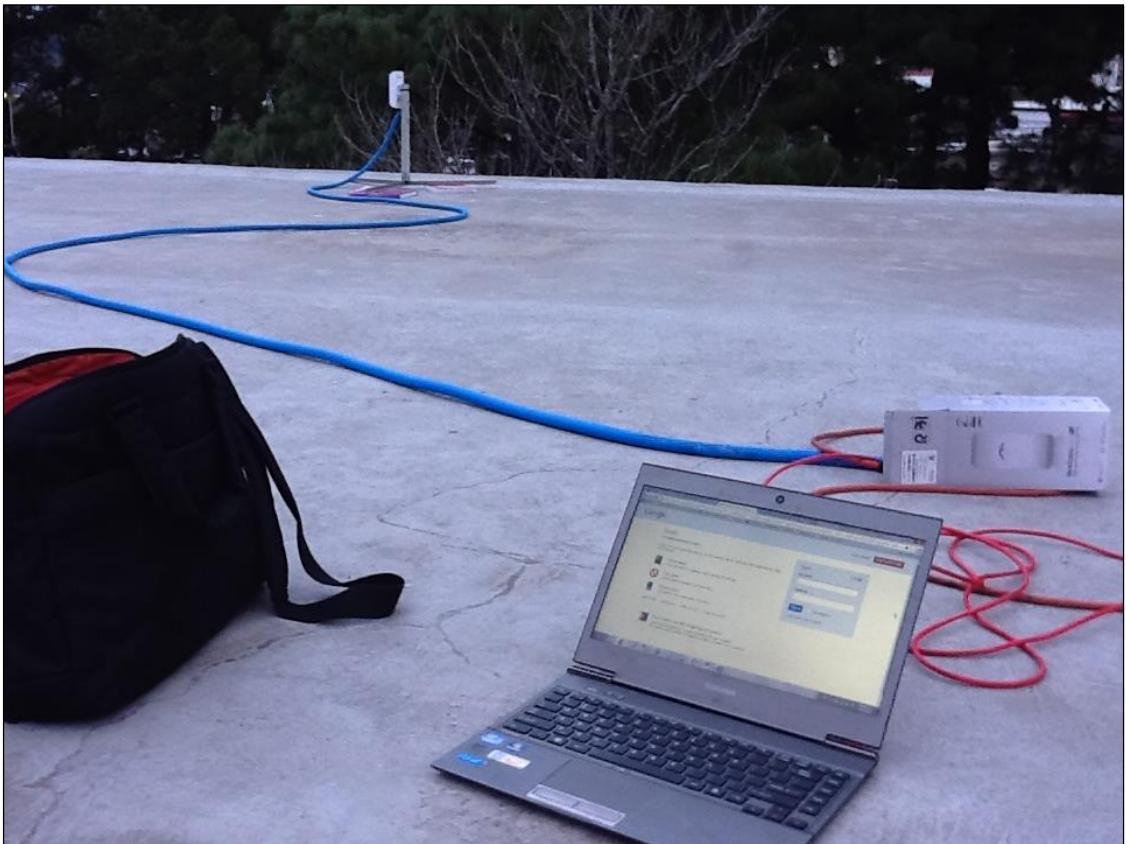





Figura 17. Medición de potencia de señal (“Signal Strength”) con AirOS.

**NanoStation loco M5** **AirOS™**

MAIN WIRELESS NETWORK ADVANCED SERVICES SYSTEM
Tools:  Logout

---

**Status**

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| Device Name: UBNT                     | AP MAC: 00:27:22:B4:6E:81  |
| Network Mode: Bridge                  | Signal Strength:  -40 dBm |
| Wireless Mode: Station WDS            | Chain 0 / Chain 1: -43 / -42 dBm   |
| SSID: hans1                           | Noise Floor: -93 dBm   |
| Security: none                        | Transmit CCQ: 96.7 %   |
| Version: v5.3.2                       | TX/RX Rate: 243.0 Mbps / 240.0 Mbps  |
| Uptime: 00:21:08                      | AirMax: Enabled  |
| Date: 2011-04-29 18:06:05             | AirMax Quality:  93 %     |
| Channel/Frequency: 149 / 5745 MHz     | AirMax Capacity:  77 %    |
| Channel Width: Auto 40 MHz (Upper)    |  |
| ACK/Distance: 28 / 0.1 miles (0.2 km) |  |
| TX/RX Chains: 2X2                     |  |
| WLAN MAC: 00:27:22:5C:BD:5B           |  |
| LAN MAC: 00:27:22:5D:BD:5B            |  |
| LAN: 100Mbps-Full                     |  |

4. Velocidad del enlace. El software AirOS permite realizar mediciones para la velocidad de transmisión de datos entre un dispositivo NanoStation y otro punto de la red. Las pruebas de velocidad pueden realizarse en tres modalidades: transmisión, recepción y dúplex. Se realizó entonces cada una de las pruebas estableciendo las direcciones de red de las antenas Ubiquiti. Abajo se muestran los resultados:

Figura 18. Prueba de velocidad de transmisión dúplex con AirOS.

The screenshot shows a web browser window titled 'UBNT: [NanoStation M5] - Speed Test - Google Chrome'. The address bar shows '192.168.6.254/sptest.cgi'. The main content area is titled 'Network Speed Test' and contains the following elements:

- Select Destination IP:** A dropdown menu with '192.168.6.236' selected and a refresh icon.
- User:** A text input field containing 'ubnt'.
- Password:** A text input field with masked characters '....'.
- Remote WEB Port:** A text input field containing '80'.
- Show Advanced Options:** A checked checkbox.
- Direction:** A dropdown menu with 'duplex' selected.
- Test Results:** A box displaying 'RX: 93.55 Mbps', 'TX: 85.80 Mbps', and 'Total: 179.35 Mbps'.
- Run Test:** A blue button at the bottom right.

Cuadro 6. Mediciones de velocidad de transmisión (Mbps) a través del enlace.

|       | Transmisión | Recepción | Dúplex |
|-------|-------------|-----------|--------|
| TX    | 140.08      | 0.00      | 93.55  |
| RX    | 0.00        | 148.73    | 85.80  |
| Total | 140.08      | 148.73    | 179.35 |

A partir de las mediciones de velocidad anteriores es posible calcular el tiempo estimado de transferencia de archivos entre ambos puntos. Por ejemplo, una biblioteca de música de 5.0 GB ( $4 \times 10^{10}$  bits) podría ser transferida a través del enlace (a 140 Mbps) en aproximadamente 5 minutos.

## B. PRUEBA DE TRANSMISIÓN A CORTA DISTANCIA ALIMENTADA POR ENERGÍA SOLAR

La segunda prueba se realizó con ambas antenas en la terraza del edificio J, a una separación de 37 metros. El lado del receptor en el enlace fue alimentado esta vez por la planta de energía solar, con el objetivo de probar el funcionamiento del sistema y determinar su tiempo de autonomía bajo estas condiciones.



Según la capacidad de producción energética del sistema fotovoltaico, el enlace puede permanecer levantado por cierta cantidad de tiempo, antes de ser necesaria la desconexión de la carga y la recarga completa de la batería [8]. Adicionalmente, para no modificar el consumo de energía en la antena Loco M5 durante la primera prueba, ningún parámetro en su configuración fue modificado.

Para el cálculo del tiempo de autonomía del enlace, es necesario primeramente determinar la magnitud del consumo energético diario que conllevará la operación de los equipos involucrados. Se asumen 15 horas de operación diarias a potencia nominal.

Cuadro 7. Consumo diario de energía del sistema de comunicación.

| Equipo            | Consumo de energía | Horas de uso diario | Watts-hora |
|-------------------|--------------------|---------------------|------------|
| Inversor de poder | 5 W                | 15                  | 75         |
| Inyector POE      | 6.5 W              | 15                  | 97.5       |
| Antena Loco M5    | 5.5 W (máx.)       | 15                  | 82.5       |
| Total Wh diarios  |                    |                     | 255        |

En principio, el enlace puede trabajar ininterrumpido mientras se satisfaga este requerimiento energético cada día. Para ello, el panel solar debe producir al menos esta cantidad de energía durante el día, mientras que la batería acumulará parte de esa energía para sostener el enlace durante las horas de la noche.

El estado inicial asume una batería completamente cargada y una descarga máxima del 50 % para evitar llevarla más allá de su límite energético.

Cuadro 8. Capacidad energética de la batería.

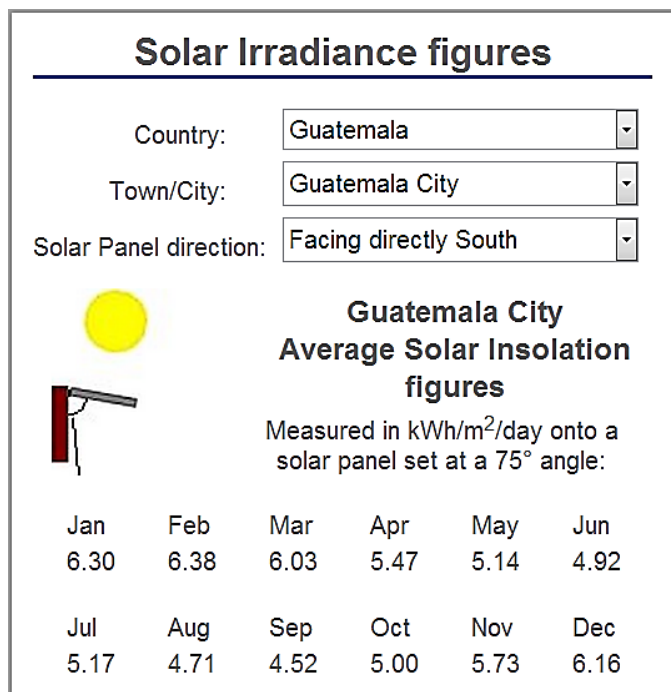
| Capacidad total de batería | Capacidad al 50 % de descarga |
|----------------------------|-------------------------------|
| 1080 Wh (90 Ah x 12V)      | 540 Wh                        |

Si se alimentara el enlace usando solamente la batería, puede verse que el requerimiento diario de 255 Wh limitaría el tiempo de autonomía a un poco más de 2 días. Este tiempo puede tomarse como una referencia de la capacidad mínima de la planta, i.e. en condiciones de muy poca o nula irradiación solar.

Al incluir la contribución del panel solar en la producción de energía eléctrica, es necesario considerar los niveles de irradiación solar que recibirá durante el día en base a su ubicación geográfica y la orientación que se le dará. Debe recordarse que la producción de energía del panel es máxima cuando recibe irradiación directa de luz, es decir, cuando los rayos solares inciden de manera perpendicular a la cara del panel, por lo que su orientación debe ante todo obedecer este principio.

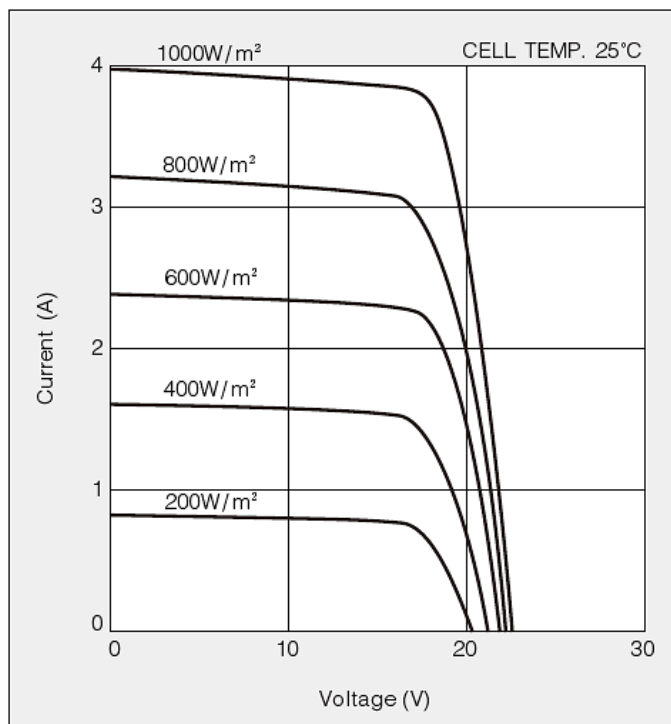
Para la ciudad de Guatemala, los niveles promedio de insolación (cantidad de energía en forma de radiación solar que llega a un área en un día) para cada mes del año se muestran en la Figura 18. Nótese que estos valores dependen de la orientación del panel.

Figura 19. Insolación diaria promedio ( $\text{kWh/m}^2$ ) durante el año para la ciudad de Guatemala. [20]



Las características de producción energética del panel (voltaje y corriente) para distintos niveles de irradiación (medida en  $\text{W/m}^2$ ) se despliegan en la siguiente gráfica:

Figura 20. Curvas de corriente-voltaje de panel solar para distintos niveles de irradiación. [11]



Las medidas de insolación mensual en la Figura 18 permiten obtener un estimado de la irradiación solar promedio que recibe el panel durante el día. A partir de la gráfica anterior, para los meses de abril, mayo y junio se tendrían las siguientes mediciones de energía promedio al día:

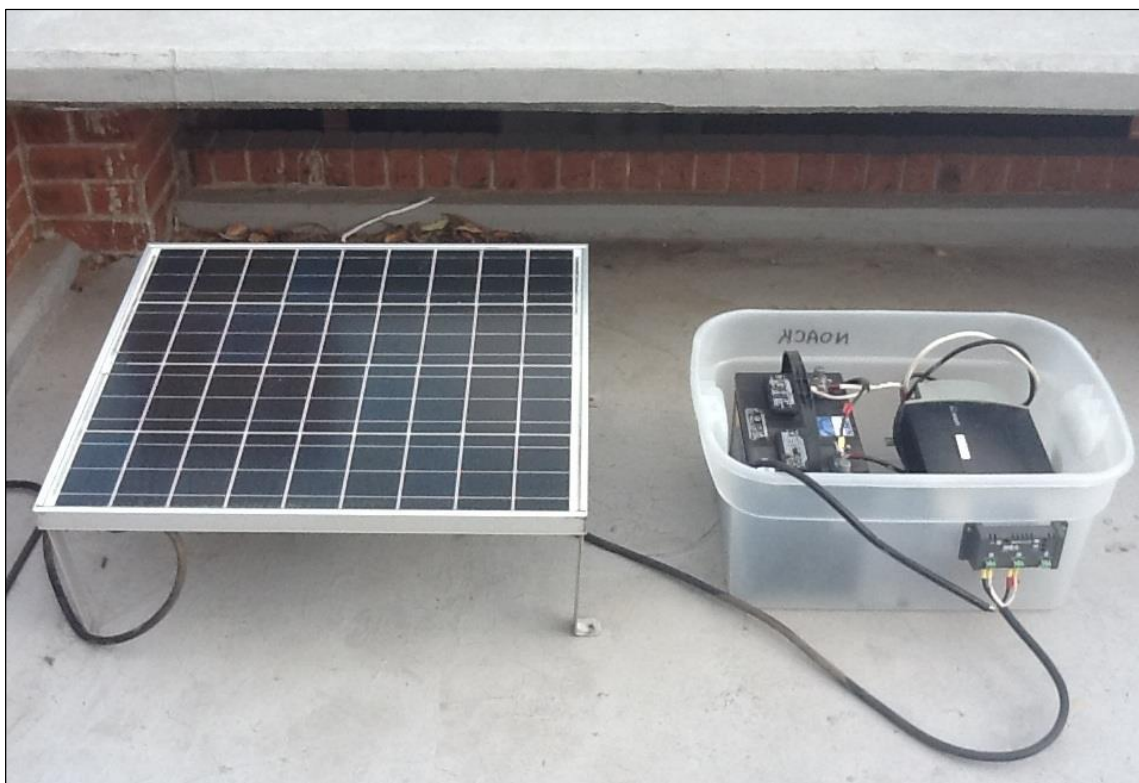
Cuadro 9. Energía diaria producida por panel solar para los meses de abril, mayo y junio.

| Mes   | Irradiación promedio   | Voltaje máx. | Corriente máx. | Potencia máx. | Energía producida |
|-------|------------------------|--------------|----------------|---------------|-------------------|
| Abril | 228 W/m <sup>2</sup>   | 15 V         | 0.90 A         | 13.50 W       | 324 Wh            |
| Mayo  | 214.2 W/m <sup>2</sup> | 15 V         | 0.85 A         | 12.75 W       | 306 Wh            |
| Junio | 205 W/m <sup>2</sup>   | 15 V         | 0.75 A         | 11.25 W       | 270 Wh            |

Los resultados muestran que la energía producida por el panel logra satisfacer el requerimiento de 255 Wh del enlace durante estos tres meses, por lo que la antena puede ser alimentada exitosamente, limitando su uso a 15 horas al día.

Lograr la autonomía completa del enlace (funcionamiento continuo las 24 horas del día) requerirá un redimensionamiento del módulo fotovoltaico, ya sea reemplazando el panel con otro de mayor potencia o adicionando un panel más y conectando ambos en paralelo.

Figura 21. Sistema fotovoltaico interconectado. Panel solar, batería, inversor y controlador.



Al igual que en la primera prueba, el enlace pudo levantarse exitosamente, sin cambios en la calidad de la comunicación ni en la operación de las antenas.

Figura 22. Enlace de corta distancia (edificio J).



### C. COSTO DEL PROYECTO

El presupuesto para este proyecto contabiliza los equipos y materiales para su despliegue e instalación. Tanto el equipo de comunicación como todos los dispositivos que componen el sistema de energía solar fueron cotizados en la ciudad de Guatemala con distintos proveedores. Adicionalmente se incluyó el costo de una caseta de almacenamiento para los dispositivos del sistema (ver Anexo B), la cual se recomienda implementar en caso no exista un lugar más propicio para almacenar los equipos. Debe tomarse en cuenta que gastos adicionales podrán ser necesarios dependiendo de las condiciones físicas y el ambiente alrededor de la instalación. Este presupuesto busca cubrir lo básico para la construcción del sistema.

Debido a que los dispositivos de la planta solar deberán ser reemplazados eventualmente, se hace la división del costo en dos partes: inversión inicial y amortización anual. En la página siguiente se muestra el despliegue del costo total de los materiales y herramientas para este proyecto:

Cuadro 10. Costo de materiales para el proyecto. Inversión inicial.

| Equipo/material  | Proveedor               | Cantidad | Precio unitario | Subtotal               |
|--|-------------------------|----------|-----------------|------------------------|
| Ubiquiti NanoStation M5 (incluye inyector POE)                 | Intecomsa               | 1        | \$ 261.46       | Q 2091.68 <sup>1</sup> |
| Ubiquiti NanoStation Loco M5 (incluye inyector POE)            | Intecomsa               | 1        | \$ 202.54       | Q 1620.32 <sup>1</sup> |
| Tubo metálico galvanizado, 2'' de diámetro, 2 m de longitud    | Electroma               | 2        | Q 176.25        | Q 352.50               |
| Angular de acero, 1'' x 3/16'', 6 m                            | Ferretería El Trébol    | 1        | Q 100.60        | Q 100.60               |
| Corte de angulares, soldado de tubería y angulares             | Metálicas Delta         | -        | -               | Q 120.00               |
| Cincho plástico para exteriores de 24'' (bolsa de 10 unidades) | Cemaco                  | 1        | Q 45.00         | Q 45.00                |
| Panel solar Kyocera, 22V, 65W                                  | Sadeesa                 | 1        | Q 2100.00       | Q 2100.00              |
| Controlador Morningstar SHS-6, 12V, 6 A                        | Sadeesa                 | 1        | Q 350.00        | Q 350.00               |
| Batería de ciclo profundo Varta, 12V, 90 AH (20 horas)         | La Casa de las Baterías | 1        | Q 1176.00       | Q 1176.00              |
| Inversor Xantrex, 1500 W                                       | Deprosolar              | 1        | Q 2300.00       | Q 2300.00              |
| Barra de cobre de 5/8'' x 8'                                   | Electroma               | 1        | Q 41.00         | Q 41.00                |
| Mordaza de 5/8''   | Electroma               | 1        | Q 5.60          | Q 5.60                 |
| Cable eléctrico AWG 6 (metro)                                  | Electroma               | 15       | Q 10.50         | Q 157.50               |
| Cable eléctrico AWG 10 (metro)                                 | Electroma               | 20       | Q 4.50          | Q 90.00                |
| Terminal eléctrica de argolla # 8                              | Diprel                  | 5        | Q 5.00          | Q 25.00                |
| Terminal eléctrica de punta #10                                | Diprel                  | 4        | Q 4.00          | Q 16.00                |
| Cable de red UTP Cat5 para exteriores (metro)                  | Cables y Conectores     | 30       | Q 8.00          | Q 240.00               |
| Cable UTP Cat5 (metro)   | Cables y Conectores     | 15       | Q 6.00          | Q 90.00                |
| Conector RJ-45   | CEF                     | 8        | Q 2.00          | Q 16.00                |
| Ponchadora para conector RJ-45                                 | CEF                     | 1        | Q 110.00        | Q 110.00               |
| Peladora y ponchadora para cable eléctrico                     | Cemaco                  | 1        | Q 80.00         | Q 80.00                |
| Router inalámbrico de 4 puertos (opcional)                     | Office Depot            | 1        | Q 324.50        | Q 324.50               |
| Caseta de almacenamiento                                       | -                       | 1        | Q 2917.00       | Q 2917.00              |
| Total  |                         |          |                 | Q 14,368.70            |

Cuadro 11. Amortización anual para instalación solar.

| Equipo/material                        | Cantidad | Precio unitario | Subtotal  | Vida útil (años) <sup>2</sup> | Costo anual |
|--|----------|-----------------|-----------|-------------------------------|-------------|
| Panel solar                            | 1        | Q 2100.00       | Q 2100.00 | 20                            | Q 105.00    |
| Controlador solar                      | 1        | Q 350.00        | Q 350.00  | 5                             | Q 70.00     |
| Batería de ciclo profundo              | 1        | Q 1176.00       | Q 1176.00 | 5                             | Q 235.20    |
| Inversor de poder                      | 1        | Q 2300.00       | Q 2300.00 | 20                            | Q 115.00    |
| Cable AWG 6 (metro)                    | 15       | Q 10.50         | Q 157.50  | 10                            | Q 15.75     |
| Cable AWG 10 (metro)                   | 20       | Q 4.50          | Q 90.00   | 10                            | Q 9.00      |
| Cable UTP Cat5 para exteriores (metro) | 30       | Q 8.00          | Q 240.00  | 15                            | Q 16.00     |
| Conector RJ-45                         | 4        | Q 2.00          | Q 8.00    | -                             | Q 8.00      |
| Costo anual total                      |          |                 |           |                               | Q 573.95    |

<sup>1</sup> Usando una tasa de cambio de Q8.00 por \$1.00.

<sup>2</sup> Vida útil promedio. Datos tomados de los fabricantes y de [8].

## VIII. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

### A. ALCANCE Y CAPACIDADES DEL SISTEMA

El enlace de comunicación permitió la extensión de la red de datos del departamento de Ingeniería Electrónica (edificio J) hacia la terraza del edificio A, a 106.5 metros de distancia, permitiendo una velocidades de transferencia de 140 Mbps TX, 148 Mbps RX (muy cercanas a los 150 Mbps que ofrece Ubiquiti) y 179 Mbps en dúplex. El sistema fotovoltaico permite sostener el enlace a 15 horas de uso diarias por un mínimo de 2 días, con poca o nula radiación solar. En los meses abril, mayo y junio, el panel puede generar suficiente energía para el sistema para mantener su funcionamiento durante este tiempo.

Para la prueba de larga distancia, el edificio A se eligió por ser la locación más visible y alejada del edificio J. Otros puntos disponibles para enlazar dentro de la universidad no fueron utilizados debido principalmente a inconvenientes para la instalación del equipo o la poca línea de vista entre ambos puntos. Este último factor es crítico debido a que a 5.745 GHz, las pérdidas por colisiones de la señal con obstáculos son mayores que a frecuencias más bajas. La instalación y conexión de las antenas fue sencilla por ser un enlace bastante corto, sin embargo, hay que recalcar que las antenas NanoStation logran transmitir a distancias hasta de 15 kilómetros, por lo que fueron utilizadas al mínimo de su alcance.

Las pruebas de velocidad de conexión mostraron que el enlace tiene una muy alta capacidad para la transferencia de información. Gracias a la tecnología 2x2 MIMO, la cantidad de datos transmitidos por unidad de tiempo en el canal aumenta considerablemente. En el caso de un enlace como este, no hubo inconveniente en utilizar el máximo ancho de banda para la conexión. En enlaces de mayor longitud, las pérdidas por propagación en el medio requieren reducir el ancho del canal para minimizar errores de transmisión, por lo que la velocidad decrecerá proporcionalmente.

El amplio margen de recepción en el enlace (42 dBm) permitió transmitir a potencias muy bajas en ambas antenas, lo cual resultó ventajoso del lado del receptor dado que consume un mínimo de energía, lo cual alarga el tiempo de autonomía. Por otro lado, la frecuencia de transmisión (5745 MHz) produjo un radio de Fresnel máximo de 1.18 m para la primera prueba y 0.70 m para la segunda. En ambas pruebas se trabajó con radios de despeje mayores al 60 % de estas medidas, por lo que no se produjo ninguna pérdida por obstrucción de la señal en el trayecto.

Los equipos NanoStation M5 están diseñados para trabajar en la mayor parte de la banda de 5 GHz, la cual no requiere licencia de operación en muchos países. En Guatemala, la frecuencia más alta libre de licencia en esta banda es 5.905 GHz. Además, las regulaciones de la SIT restringen transmisiones de terceros que sobrepasen 1 W de potencia en bandas licenciadas. En este caso, la frecuencia elegida se

mantuvo dentro de los límites admitidos. En cualquier caso, la potencia de transmisión (6.31 mW, equivalente a 8 dBm) es suficientemente pequeña para no ocasionar mayor interferencia con otras señales.

El sistema de energía solar probó ser una fuente de alimentación factible para sostener el extremo suscriptor del enlace de comunicación. De acuerdo a los datos de la Figura 19 y los cálculos realizados, durante el primer semestre del año, el panel podrá proveer suficiente energía para alimentar la antena 15 horas al día. Entre agosto y septiembre, la producción de energía será la más baja del año, alrededor de 240 Wh. La producción de energía determinará al final el máximo de horas de uso al día para la antena suscriptora. Si se desea lograr autonomía completa las 24 horas del día, el requerimiento de energía será de 408 Wh (ver Cuadro 7), el cual puede cubrirse por todo el año introduciendo un segundo panel al sistema.

El dimensionamiento de la instalación solar debe ante todo responder al grado de necesidad de conexión. Una aplicación crítica como la conexión de red de una entidad gubernamental difícilmente puede servirse de energía solar para sostener sus telecomunicaciones. Para aplicaciones como proveer servicio de Internet inalámbrico o el intercambio de información entre instituciones, la instalación solar es viable tanto en costo como en capacidad. Además, si se desea compartir una señal de conexión a Internet, es posible utilizar un punto de acceso inalámbrico Wi-Fi para desplegar la señal a varias computadoras, los cuales consumen comúnmente entre 5 y 10 W.

En comparación a otros modos de conexión punto a punto (cobre, fibra óptica), una conexión inalámbrica tiene la característica de que su costo no está determinado por la distancia del enlace. En un enlace de fibra óptica por ejemplo, una mayor longitud de enlace requiere de más materiales, más planeamiento y más gasto para su instalación. Si se toma la razón costo-distancia (Quetzal/metro) de un enlace cableado, puede verse que esta aumenta con la distancia. En contraparte, la razón costo-distancia de un enlace inalámbrico disminuye. Al final, la decisión de utilizar un medio u otro, más allá del costo, debe medir los beneficios y riesgos en el despliegue e instalación del enlace, así como la calidad y velocidad de transmisión deseadas.

## B. FACTORES FÍSICOS DEL SISTEMA

El mantenimiento de la instalación es vital para alargar su vida útil y ahorrar en el reemplazo de los equipos. Las antenas, siendo equipo electrónico, son altamente sensibles a perturbaciones en su señal de alimentación. El cable UTP común no está condicionado para aplicaciones a la intemperie; el cobertor plástico que protege los conductores se deteriora con el sol y la lluvia, por lo que no debe utilizarse más que para la conexión en interiores. Otro riesgo son las pequeñas descargas electrostáticas que se generan en los conductores al quedar el cable expuesto al viento y al calor. Estas descargas pueden ser suficientes para quemar el puerto Ethernet de las antenas. A falta de cable UTP para exteriores, el cable se protegió con tubo

flexible plástico (ver Figura 16), lo cual eliminó temporalmente el riesgo de perder la conexión. Para mayor protección e inmunidad al ruido pueden usarse los cables tipo FTP y STP para exteriores.

La protección eléctrica de los dispositivos es igualmente esencial para el sistema. El inversor es el más proclive a generar fallas de corriente y debe estar conectado a un punto de tierra seguro, al igual que el nodo común de retorno entre el controlador, la batería y el inversor. Si se ubica el panel o las antenas en estructuras metálicas altas en un terreno despejado, debe incluirse protección de pararrayos [8].

El lugar de almacenamiento de los equipos eléctricos (batería, controlador, inversor, inyector de poder) debe obedecer ciertos criterios y mantenerse en la mejor condición posible. Se incluye en el Anexo B un plano sugerido para una caseta de almacenamiento (no fue implementada por falta de presupuesto) en la que los equipos pueden ser montados y mantenidos en un ambiente controlado.

La batería es especialmente sensible al calor y a la humedad, por lo que debe almacenarse, al igual que el inversor, en un lugar de suficiente ventilación, nunca expuesta al sol (idealmente su temperatura debe mantenerse entre 15° y 25° C) y, en caso de no ser utilizada por un tiempo, deberá ser recargada regularmente. Para el proyecto, el panel y el controlador solar proveyeron ciclos continuos de carga y descarga para la batería, lo cual la mantuvo activa durante el tiempo que el inversor no estuvo en operación. Una observación importante es que el inversor no fue conectado directamente al borne de “Load” del controlador. Esto fue debido a que la demanda de corriente del inversor al encenderse supera los 6 A límites del controlador, lo que puede llegar a quemar los fusibles internos de este [16].

El panel solar está diseñado para permanecer toda su vida útil a la intemperie; no obstante debe orientarse de manera que reciba la mayor cantidad directa de luz solar al día. Debe asegurarse además de que no incidan en él puntos de sombra en ningún momento. Esto no solo disminuye la eficiencia del panel sino que puede también dañarlo a largo plazo [8].

Factores como la ubicación y el montaje de las antenas serán determinados de acuerdo a los recursos disponibles en la instalación del enlace. Para este proyecto, los equipos Ubiquiti fueron montados en tubos metálicos usando cinchos de sujeción, sobre la terraza de un edificio. Pueden instalarse también en interiores, viendo hacia afuera por una ventana o montadas en el exterior de la pared, con lo cual se ahorrarían gastos en la construcción de estructuras altas para el montaje. La fortaleza de estas antenas es que son versátiles en cualquier condición o lugar, integran todas las herramientas necesarias para monitorear el sitio del enlace y ante todo, son fáciles de configurar y prácticas para aplicaciones inalámbricas PTP y PTMP de corta o larga distancia.



## IX. CONCLUSIONES

Las conclusiones pertinentes al diseño e implementación de un sistema de comunicación punto a punto con tecnología WiMAX y energía solar como fuente de alimentación son las siguientes:

1. El sistema de poder a base energía solar es una fuente factible de alimentación para una antena de tecnología WiMAX, ya que permite sostener su funcionamiento por un mínimo de dos días, a 15 horas de uso diarias, en condiciones de escasa incidencia solar.

2. El enlace implementado ofrece una conexión de alta velocidad al permitir tasas de transmisión de 140.08 Mbps en transmisión, 148.76 Mbps en recepción y 179.35 Mbps (93.55 TX y 85.80 RX) dúplex.

3. La razón costo-distancia de un enlace inalámbrico disminuye al incrementarse la distancia, al contrario de enlaces de estructura cableada.

## X. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones para el desarrollo de un proyecto de este tipo son las siguientes:

1. No se recomienda utilizar un sistema fotovoltaico para aplicaciones de comunicación muy críticas debido a su dependencia en la disponibilidad de luz solar y autonomía limitada.
2. En enlaces que sobrepasen los 5 kilómetros de distancia, es necesario considerar el desnivel entre ambos extremos generado por la curvatura terrestre para la ubicación y orientación de las antenas.
3. Lograr autonomía completa las 24 horas del día para un enlace de comunicación usando energía solar se reduce a determinar el número de paneles solares necesarios tal que la producción total de energía diaria promedio sea mayor o igual al requerimiento energético de los equipos.
4. Los equipos de un sistema fotovoltaico (batería, controlador e inversor) no deben quedar expuestos al sol ni a la humedad. Se recomienda almacenarlos bajo techo, en un lugar seco y ventilado para poder operar de manera óptima. El mantenimiento frecuente es igualmente importante. Negligencia hacia los equipos resultará en pobre desempeño y posible malfuncionamiento del sistema.
5. La instalación del sistema en la terraza del edificio J no contó con un punto de tierra para la seguridad de los equipos. En una instalación de campo es imprescindible que los dispositivos eléctricos y electrónicos estén conectados una toma de tierra para evitar daños por fallas eléctricas.
6. Especial atención debe ponerse a la frecuencia de transmisión de las antenas a utilizar, dado que solo ciertos intervalos en el espectro están libres de regulación. Si la frecuencia del enlace se encontrara entre las frecuencias licenciadas y la potencia de transmisión sobrepasa 1 W (30 dBm), es necesario realizar los correspondientes procedimientos legales con la Superintendencia de Telecomunicaciones.
7. La conexión de las antenas a la intemperie debe hacer uso de materiales acondicionados para trabajar en exteriores (cables, conectores, estructuras de montaje, etc.) para evitar el riesgo de malfuncionamiento debido al desgaste y a otros factores ambientales.
8. Los sistemas de energía solar tienen una vida útil limitada y conllevan un costo anual para el mantenimiento y eventual reemplazo del equipo, por lo que es una buena práctica llevar un fondo de amortización para cubrir estos gastos.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Brain, Marshall; Grabianowski, Ed. *How WiMAX works*.  
<http://computer.howstuffworks.com/wimax.htm> [Enero, 2013]
- [2] Buettrich, Sebastian. 2007. *Cálculo de radioenlace*. Editor: Alberto Escudero Pascual. Tshwane. Creative Commons Deed. 22 págs.
- [3] *Category 5 cable*. [http://en.wikipedia.org/wiki/Category\\_5\\_cable](http://en.wikipedia.org/wiki/Category_5_cable) [Febrero, 2013]
- [4] Estévez Flores, Irene. 2005. *El Mercado de Telecomunicaciones en Guatemala*. Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Guatemala. <http://es.scribd.com/doc/57343123/El-Mercado-de-Telecomunicaciones-en-Guatemala>.
- [5] Free Sun Power. *System sizing estimator*. [http://www.freesunpower.com/system\\_sizing.php](http://www.freesunpower.com/system_sizing.php) [Abril, 2013]
- [6] *Getting started with AirMAX*. [http://wiki.ubnt.com/Getting\\_Started\\_with\\_airMAX](http://wiki.ubnt.com/Getting_Started_with_airMAX) [Marzo, 2013]
- [7] Imachdav. *Wi-Max*. <http://everything2.com/title/Wi-Max> [Enero, 2013]
- [8] International Development Research Centre. 2008. *Redes inalámbricas en los países en desarrollo*. 3ª ed. wndw.net. 413 págs.
- [9] *Introduction to multiple antenna system: SIMO, MISO, MIMO*.  
<http://www.conniq.com/WiMAX/mimo-02.htm> [Abril, 2013]
- [10] *ISM band*. [http://en.wikipedia.org/wiki/ISM\\_band](http://en.wikipedia.org/wiki/ISM_band) [Enero, 2013]
- [11] Kyocera Corporation. *Model KC65T High efficiency multicrystal photovoltaic module*. Datasheet.
- [12] *Last mile connection*. <http://www.goingwimax.com/wimax-glossary/last-mile-connection> [Marzo, 2013]
- [13] *Link margin*. [http://en.wikipedia.org/wiki/Link\\_margin](http://en.wikipedia.org/wiki/Link_margin) [Abril, 2013]
- [14] *List of deployed WiMAX networks*. [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_Deployed\\_WiMAX\\_networks](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Deployed_WiMAX_networks) [Enero, 2013]
- [15] Martin, Leith. 1998. *VHF & UHF pathloss calculations for amateurs*. Melbourne. Summerland Amateur Radio Club Newsletter. 11 págs.
- [16] Northern Arizona Wind & Sun. *Deep cycle battery FAQ*.  
[http://www.windsun.com/Batteries/Battery\\_FAQ.htm](http://www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm) [Marzo, 2013]
- [17] *Selecting AirMAX products*. [http://wiki.ubnt.com/Selecting\\_airmax\\_product](http://wiki.ubnt.com/Selecting_airmax_product) [Marzo, 2013]
- [18] *Signal-to-noise ratio*. [http://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise\\_ratio](http://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise_ratio) [Abril, 2013]
- [19] *Sistemas de comunicación 2*. 2012. Notas de clase. Departamento de Ingeniería Electrónica. Universidad del Valle de Guatemala.
- [20] Boxwell, Michael. 2013. *Solar Electricity Handbook*. Greenstream Publishing.  
<http://solarelectricityhandbook.com/solar-irradiance.html> [Mayo, 2013]

- [21] Superintendencia de Telecomunicaciones. 2004. *Resolución SIT-484-2004*.  
<http://www.sit.gob.gt/files/6013/4731/0879/RES-484-04.pdf> [Febrero, 2013]
- [22] Superintendencia de Telecomunicaciones. 2006. *Resolución SIT-205-2006*.  
<http://www.sit.gob.gt/files/5513/4731/1213/RES-205-06.pdf> [Febrero, 2013]
- [23] Tranzeo Wireless Technologies Inc. *Wireless link budget analysis*.  
[http://www.tranzeo.com/allowed/Tranzeo\\_Link\\_Budget\\_Whitepaper.pdf](http://www.tranzeo.com/allowed/Tranzeo_Link_Budget_Whitepaper.pdf) [Abril, 2013]
- [24] Ubiquiti Networks. *NanoStation M, Nanostation Loco M. Indoor/Outdoor airMAX CPE*. Datasheet.
- [25] Varta. *Battery maintenance and care – Storing and recharging filled batteries*. Guía de usuario.
- [26] *What is WiMAX?* <http://www.wimax.com/wimax-tutorial/what-is-wimax> [Febrero, 2013]
- [27] *WiMAX*. <http://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX> [Enero, 2013]
- [28] *WiMAX antennas*. <http://www.wimax.com/wimax-tutorial/wimax-antennas> [Febrero, 2013]
- [29] *Wireless architectures*. <http://www.wimax.com/wimax-tutorial/wireless-architectures> [Febrero, 2013]
- [30] Wireless Internet Institute. 2003. *The Wireless Internet Opportunity for Developing Countries*. World Times Inc. 127 págs.
- [31] *Wireless bridge*. [http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_bridge](http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_bridge) [Febrero, 2013]

## XII. ANEXOS

### A. CONFIGURACIÓN DE ANTENAS NANOSTATION

Las antenas NanoStation M5 y Loco M5 de Ubiquiti permiten levantar un puente de comunicación para la extensión de una red configurando los parámetros necesarios en cada una de ellas. A continuación se muestra el procedimiento para conectarse con una antena NanoStation a través de una computadora para llevar a cabo la configuración. Pueden consultarse también la “Quick start guide” de los equipos M5, disponible en la página oficial de Ubiquiti Networks ([www.ubnt.com](http://www.ubnt.com)) y el video tutorial “Setting up a simple point to point link” del canal de Ubiquiti en YouTube.

Paso 1. Conectar el inyector POE a un tomacorriente. Usando dos cables de Ethernet, conectar los puertos LAN de la computadora y de la antena hacia el inyector. El cable de la antena debe entrar en el puerto etiquetado “POE” y el cable de la computadora en el puerto “LAN”.

Paso 2. Todas las antenas Ubiquiti traen por defecto la dirección IP 192.168.1.20. Para comunicarse con la antena es necesario configurar el adaptador LAN de la computadora a una dirección IP en la misma subred. En Windows: “Conexiones de red”, luego “Conexión de área local”, Propiedades de Protocolo Internet (TCP/IP) y “Usar la siguiente dirección IP”. Establecer la dirección IP a 192.168.1.21 con máscara de subred 255.255.255.0 y puerta de enlace predeterminada 192.168.1.20.

Paso 3. En el navegador de Internet, introducir en la barra de direcciones: 192.168.1.20. Se abrirá la interfaz de la antena NanoStation. El nombre de usuario y la contraseña son por defecto “ubnt”.

Figura 23. Interfaz de entrada para antenas NanoStation.



Paso 4. En el tab “Wireless” se despliegan los parámetros del adaptador inalámbrico de las antenas. Para establecer el puente de comunicación, la antena M5 se configura en el modo “Access Point WDS” y la Loco M5 en el modo “Station WDS”. La antena M5 deberá identificarse con un nombre SSID para luego poder anclar la antena Loco M5 a ella. Parámetros como el ancho del canal, la frecuencia de operación, la máxima tasa de transmisión, la potencia de salida y la encriptación de datos pueden configurarse aquí. Una vez hechos los cambios, dar click en el botón “Change”. No dar click en el botón “Apply” todavía.

Figura 24. Configuración de parámetros para adaptador inalámbrico en antena NanoStation M5.

The image shows the configuration interface for a NanoStation M5 antenna. The 'Wireless' tab is selected, and the 'Basic Wireless Settings' section is expanded. The configuration includes:

- Wireless Mode:** Access Point WDS (dropdown), with an  for 'Auto'.
- WDS Peers:** Four empty input fields for peer addresses.
- SSID:** hans1 (text input), with an  for 'Hide SSID'.
- Country Code:** United States (dropdown).
- IEEE 802.11 Mode:** A/N mixed (dropdown).
- Channel Width:** 40 MHz (dropdown).
- Channel Shifting:** Disabled (dropdown).
- Frequency, MHz:** Auto (dropdown).
- Extension Channel:** None (dropdown).
- Frequency List, MHz:**  Enabled.
- Auto Adjust to EIRP Limit:** .
- Output Power:** A slider set to 27 dBm.
- Max TX Rate, Mbps:** MCS 15 - 300 (dropdown), with  for 'Automatic'.

The 'Wireless Security' section is partially visible, showing:

- Security:** none (dropdown).
- MAC ACL:**  Enabled.

Paso 5. En el tab “Network”, elegir el modo “Bridge” para ambas antenas. Luego se introducen los parámetros de red: dirección IP, máscara de subred y puerta de enlace predeterminada para los equipos. Estos datos deben ser válidos dentro de la red a la cual se conectan las antenas. Se ofrece también la opción de utilizar el protocolo DHCP para la asignación automática de los parámetros de red. Dar click en “Change” y finalmente en el botón “Apply” para confirmar la configuración.

Paso 6. Una vez estén configuradas y alineadas las antenas, quedará levantado el puente de comunicación. Es posible entonces conectarse nuevamente a cada una a través del navegador para monitorear su funcionamiento y desempeño.

## B. CASETA DE ALMACENAMIENTO PARA EQUIPOS

Figura 25. Plano de caseta de almacenamiento para equipos eléctricos. Vista interior y exterior.

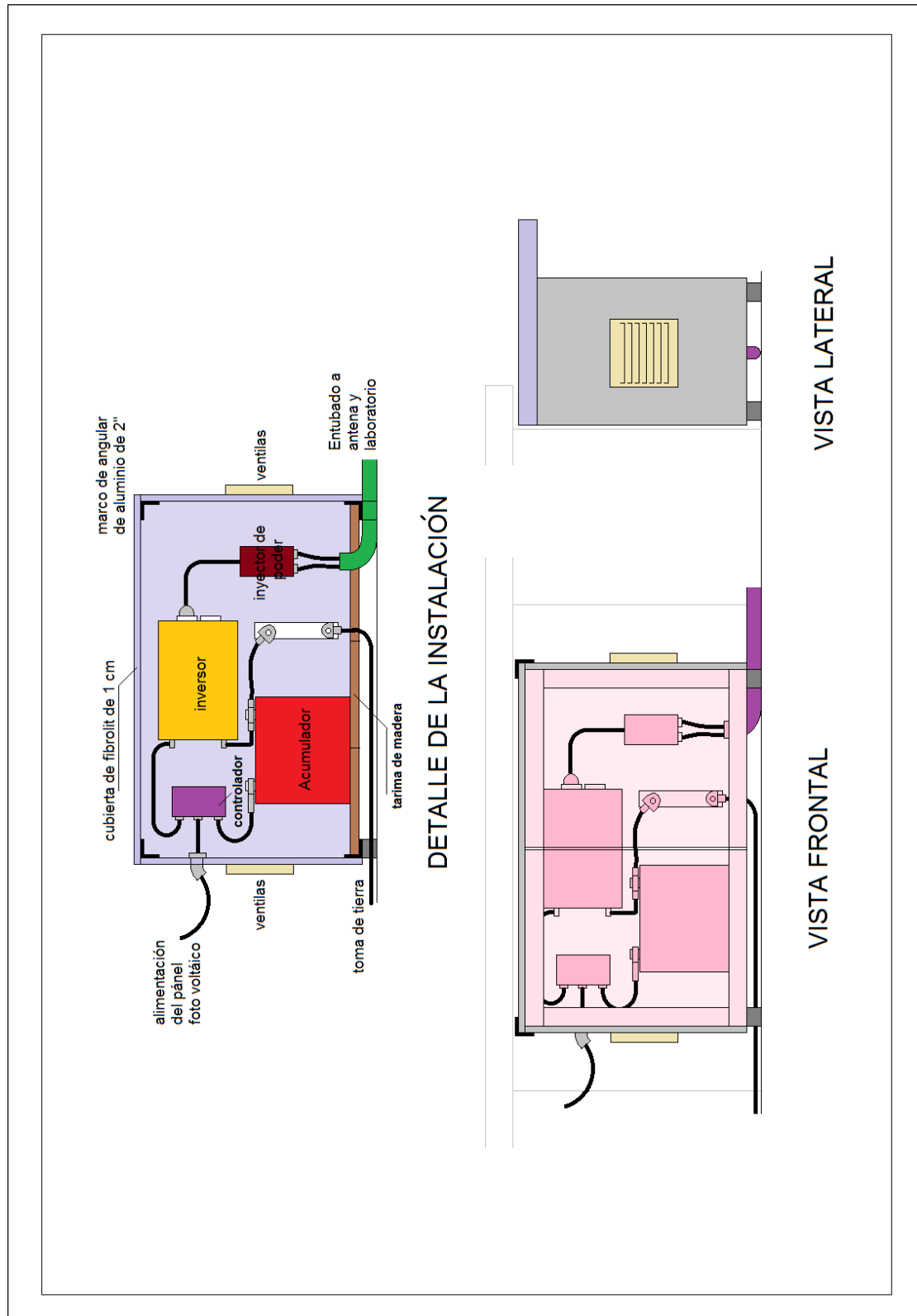


Figura 26. Plano de caseta de almacenamiento para equipos eléctricos. Medidas.





Cuadro 12. Listado de materiales y costo para caseta de almacenamiento.

| Material   | Proveedor   | Cantidad | Precio unitario | Subtotal  |
|--|-------------|----------|-----------------|-----------|
| Angular de aluminio de 2" x 2" x 1/8" x 6.00 m   | Alumicentro | 2        | Q 195.00        | Q 390.00  |
| Arandelas de aluminio para agujero de 1/4"       | Alumicentro | 100      | Q 0.25          | Q 25.00   |
| Rejilla de plástico 10" x 10"                    | Ayrtech     | 2        | Q 295.85        | Q 591.70  |
| Plancha de Fibrolit 4' x 8' x 11 mm              | Casa Hermes | 1        | Q 249.85        | Q 249.85  |
| Remaches pop Ø 3/16" x 3/4"                      | Cemaco      | 150      | Q 0.30          | Q 45.00   |
| Tornillos busca-rosca                            | Cemaco      | 100      | Q 1.25          | Q 125.00  |
| Bisagras galvanizadas 2"                         | Cemaco      | 2        | Q 30.00         | Q 60.00   |
| Chapa de botón con llave                         | Cemaco      | 2        | Q 105.10        | Q 210.20  |
| Tacos de hule Ø 1"                               | Cemaco      | 4        | Q 6.50          | Q 26.00   |
| Pernos galvanizados 1/4" x 2"                    | Cemaco      | 50       | Q 1.50          | Q 75.00   |
| Terminales para acumulador                       | Cemaco      | 1        | Q 48.00         | Q 48.00   |
| Topes de plástico                                | Cemaco      | 2        | Q 15.00         | Q 30.00   |
| Jaladores plásticos redondos                     | Cemaco      | 2        | Q 20.00         | Q 40.00   |
| Calavera de 1 1/2"                               | Electroma   | 1        | Q 52.40         | Q 52.40   |
| Niple 1 1/2" x 2"                                | Electroma   | 1        | Q 20.00         | Q 20.00   |
| Tuerca 1 1/2"                                    | Electroma   | 1        | Q 15.00         | Q 15.00   |
| Regleta para tomas de tierra                     | Electroma   | 1        | Q 45.85         | Q 45.85   |
| Terminales de entallar                           | Electroma   | 20       | Q 2.25          | Q 45.00   |
| Tabla de 1" x 6" x 8' de pino tratado            | Lignum      | 1        | Q 98.00         | Q 98.00   |
| Plancha de lámina acrílica 1.45 x 1.25 x 0.005 m | Metacryl    | 1        | Q 725.00        | Q 725.00  |
| Total  |             |          |                 | Q 2917.00 |

## XIII. GLOSARIO

**Ancho de banda:** El rango de frecuencias en el espectro que ocupa la transmisión de un sistema de comunicación. Se relaciona con la cantidad máxima de datos que pueden viajar en un canal en un segundo (bits por segundo).

**Antena isotrópica:** Antena hipotética que distribuye su potencia en todas las direcciones con la misma intensidad. No es físicamente realizable, pero se utiliza como referencia en el diseño de antenas.

**Backhaul:** Red de retorno. Es la porción de una red que comprende los enlaces intermedios entre la red central y las subredes en sus bordes. Las redes de retorno son usadas para interconectar redes utilizando diferentes tipos de tecnologías, alámbricas o inalámbricas.

**Calidad de servicio:** En inglés, “quality of service” (QoS). Se refiere a los diferentes aspectos que permiten el transporte de datos que demandan mayores recursos en el servicio de transmisión.

**Decibelio (dB):** Es una medida logarítmica que representa la relación entre dos magnitudes: la de interés y una de referencia. En telecomunicaciones se utiliza para expresar ganancias y pérdidas de potencia ( $W$ ) en un sistema. Si la referencia es igual a la unidad, la medida es absoluta. Se define como:

$$dB \equiv 10 \log \left( \frac{P_{int}}{P_{ref}} \right)$$

**Decibelio a un milivatio (dBm):** Representa la relación entre un valor de potencia en Watts referenciado a 1 milivatio (0.001 W). Se define como:

$$dBm \equiv 10 \log \left( \frac{P_{int}}{0.001} \right)$$

**Decibelio isotrópico (dBi):** Se utiliza para expresar la ganancia de una antena en referencia a una antena isotrópica teórica.

**Espectro electromagnético:** El rango de las diferentes frecuencias de la energía electromagnética. Incluye las ondas de radio, microondas, la luz visible y los rayos X.

**Espectroscopio:** Es un dispositivo electrónico capaz de analizar el espectro de frecuencias y desplegar gráficamente la potencia de las señales electromagnéticas presentes en el espacio.

**Estación base:** Se refiere a una estación de transmisión instalada en una locación fija, la cual actúa como el dispositivo central al que se conectan los suscriptores de un servicio inalámbrico.

**Estación suscriptor:** Las estaciones finales de una red de comunicación. Los usuarios utilizan una estación suscriptor como el medio de enlace con la estación base que provee el servicio de conexión.

**Ethernet:** IEEE 802.3, una familia de tecnologías para la interconexión de dispositivos en una red de área local (LAN) por medio de un bus de datos compartido.

**Fibra óptica:** La fibra óptica es un medio de transmisión a base de un hilo muy fino de vidrio o materiales plásticos, por el que se envían pulsos de luz para transmitir información.

**Frecuencia:** En la física de ondas, el número de ciclos por segundo al que oscila una onda, ya sea eléctrica, acústica, magnética o de otra índole. Su unidad es el Hertz (Hz).

**Ganancia:** En la teoría del diseño de antenas, la ganancia (“gain” en inglés) se refiere a la capacidad natural de una antena para aumentar la potencia de las señales que transmite.

**GPS:** Global Positioning System. Es un sistema de navegación que provee localización en cualquier lugar del planeta utilizando técnicas de triangulación por medio de comunicación satelital.

**Irradiación pico:** Las horas de luz solar pico o irradiación pico ocurren cuando los rayos solares inciden lo más directamente posible sobre el panel. La energía producida por un panel solar disminuye cuando la incidencia de la luz ocurre a un ángulo. Irradiación se mide en  $W/m^2$ .

**ISP:** Internet Service Provider. Un proveedor de servicio de internet es una empresa que brinda acceso al Internet a sus clientes a través de diferentes medios como cable de cobre, fibra óptica etc.

**LAN:** Local Area Network. Una red de área local interconecta varias computadoras y dispositivos dentro de una localidad pequeña a través de un protocolo para el intercambio de información, típicamente Ethernet.

**LTE:** Long Term Evolution. Parte de las tecnologías de nueva generación (4G). Es un estándar de comunicación inalámbrica para conexiones de alta velocidad para teléfonos móviles.

**MAN:** Metropolitan Area Network. Una red de área metropolitana es una red que abarca una ciudad entera, interconectando varias LANs a través tecnologías de alta capacidad como enlaces de fibra óptica.

**MIMO:** Multiple Input-Multiple Output. En telecomunicaciones, los sistemas MIMO integran más de una pareja transmisor-receptor entre antenas para aumentar la capacidad del radioenlace. Por ejemplo, un sistema MIMO 2x2 (dos transmisores, dos receptores) permite duplicar la cantidad de datos en la transmisión.

**Onda electromagnética:** Una onda que se propaga en el espacio abierto a través de oscilaciones. Tiene componentes de campo eléctrico y campo magnético.

**OFDM:** Orthogonal Frequency Division Multiplexing. Es un esquema de multiplexación utilizado en sistemas de comunicación de banda ancha. OFDM distribuye los datos sobre un número de ondas portadoras espaciadas a diferentes frecuencias. Este espaciado evita que un demodulador reciba frecuencias que no le pertenecen.

**PSK:** Phase Shift Keying. Es una modulación digital que comunica datos al cambiar la fase de una señal de referencia (la onda portadora). PSK binaria (BPSK) utiliza dos fases para la modulación, separadas 180°. PSK en cuadratura (QPSK) utiliza cuatro fases, lo que permite codificar 2 bits por símbolo transmitido.

**QAM:** Quadrature Amplitude Modulation. En su forma más simple, QAM utiliza dos ondas portadoras desfasadas 90° entre sí y comunica datos al modificar la amplitud de estas. 16QAM y 64QAM usan mayores subdivisiones de fase en las portadoras para transmitir una mayor cantidad de bits por símbolo.

**Router:** Enrutador. Es un dispositivo que reenvía paquetes de datos entre diferentes redes. El proceso de reenviar paquetes hacia el próximo salto es llamado enrutamiento.

**Switch:** Conmutador. Dispositivo de red que permite la comunicación entre varias máquinas en una red de área local al proveer una conexión dedicada entre los equipos.

**TDMA:** Time Division Multiple Access. Es un método de acceso al medio que permite que varios usuarios puedan compartir el mismo canal de frecuencia al dividir la señal en espacios discretos de tiempo. Los usuarios transmiten en rápida sucesión, uno tras otro, cada uno en su espacio de tiempo correspondiente.

**UTP:** Unshielded Twisted Pair. Cable utilizado para redes Ethernet. Se conforma de cuatro pares de hilos trenzados dentro de una chaqueta de plástico. Existen también las variantes Shielded Twisted Pair (STP) y Foiled Twisted Pair (FTP) para aplicaciones que requieren de mayor inmunidad a ruido.

**WDS:** Wireless Distribution System. Un Sistema de Distribución Inalámbrico es un sistema que permite la interconexión inalámbrica de puntos de acceso en una red IEEE 802.11. Permite que la red pueda ser ampliada mediante múltiples puntos de acceso sin la necesidad de un cable troncal que los conecte.

**Wi-Fi:** Abreviación de “Wireless Fidelity”. Estándar de comunicación inalámbrica para dispositivos de tecnología IEEE 802.11 (a, b, g, n). Permite el intercambio de datos entre computadoras de una red de manera inalámbrica.

**WISP:** Wireless Internet Service Provider. Es un proveedor de servicio de internet con infraestructura de red inalámbrica. Las conexiones con los usuarios pueden ser a través de redes Wi-Fi o enlaces dedicados, tanto en bandas de frecuencia licenciadas como no licenciadas.