

Diseño de la ampliación de la red de comunicación de EMELNORTE utilizando fibra óptica y tecnología inalámbrica

Roberto Román – Pablo Hidalgo L., Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito - Ecuador

Resumen.- El presente proyecto de titulación aborda la descripción de las técnicas de transmisión de datos utilizando fibra óptica y tecnología inalámbrica. Presenta además, el diseño detallado de la ampliación de la red utilizando enlaces de comunicación requeridos por EMELNORTE para la integración de sus estaciones operativas que se encuentran distribuidas en toda su área de concesión utilizando los medios de transmisión citados. Los enlaces se dimensionan de manera que soporten la transmisión de datos SCADA, y de aplicaciones de voz y video sobre IP. En el diseño se establecen las características y parámetros técnicos necesarios para cada uno de los enlaces.

Índices – Capacidad de canal, Enlaces de comunicación, Fibra Óptica, Integración, Propagación inalámbrica, Scada.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las telecomunicaciones se han convertido en uno de los aspectos fundamentales sobre los cuales se fundamenta el progreso de la sociedad moderna. Con el desarrollo de las funciones de automatización y control dentro de los procesos industriales, las redes de telecomunicaciones se han convertido en el soporte fundamental para la integración de los mismos.

Las aplicaciones actuales de las redes industriales a través de la implementación de los sistemas SCADA requieren de un sólido sistema de comunicación con altas capacidades de procesamiento y almacenamiento. Es por ello que las redes de comunicaciones deben suplir las crecientes necesidades de interactividad, movilidad y seguridad. Además deben contar con servicio de rutas redundantes para suplir eventuales fallas en el canal de comunicación y así garantizar la disponibilidad de los datos generados remotamente.

En el presente trabajo se muestran los aspectos fundamentales para el diseño e implementación de enlaces de comunicación que sean capaces de soportar las aplicaciones requeridas por los procesos de transporte y generación de energía eléctrica, localizados en las centrales de generación y subestaciones de la Empresa Eléctrica Regional Norte (EMELNORTE).

I. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN ÓPTICOS^{[1][2]}

La fibra óptica es un medio de transmisión guiado que permite la transmisión de pulsos de luz a través de un filamento de plástico o de Dióxido de Silicio (SiO₂). Se encuentra constituida por el núcleo (*core*), el manto (*cladding*) y un revestimiento externo de protección, que brinda una consistente protección mecánica a las fibras.

A. Transmisión Óptica

Para las transmisiones en fibra óptica se utilizan longitudes de onda (λ^1) ubicadas en el infrarrojo, para lo cual se utilizan cinco ventanas en este rango de longitudes de onda que son:

- Primera Ventana: $\lambda = 850$ nm
- Segunda Ventana: $\lambda = 1310$ nm
- Tercera Ventana: $\lambda = 1550$ nm
- Cuarta Ventana: $\lambda = 1625$ nm
- Quinta Ventana: $\lambda = 1470$ nm

La transmisión de haces de luz a través de la fibra óptica se da gracias a la reflexión y refracción de dichos haces.

Al interior de la fibra se presentan múltiples reflexiones de la señal óptica, lo que es conocido como reflexión interna total, Fig. 1.

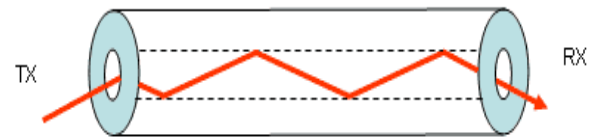


Fig. 1. Reflexión interna total

Para el interfaz entre el aire y el interior de la fibra se posibilita la entrada del haz de luz gracias al efecto de refracción producido; dicho efecto se rige a través de la Ley de Snell que dice: “Los índices de refracción de los medios están en razón inversa a los senos de los ángulos que forman la normal a la superficie de separación con los respectivos rayos de luz”. Se introduce el concepto de ángulo de aceptación, que se define como el ángulo máximo que determina que todo rayo de luz incidente con un ángulo menor al mismo sea refractado hacia el núcleo, Fig. 2.

B. Tipos de Fibra Óptica

La fibra óptica puede distinguirse de acuerdo al número de modos que se propagan a través de la misma (monomodo o multimodo), así como también por la forma del perfil del índice de refracción (escalonado o gradual).

¹ La longitud de onda (λ) se define como la distancia que ocupa en el espacio un ciclo de onda electromagnética.

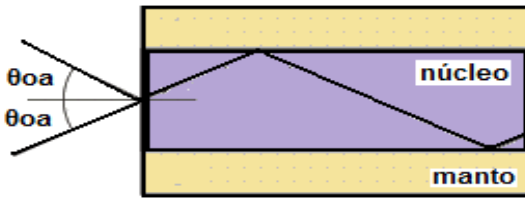


Fig. 2. Ángulo de aceptación.

En las fibras multimodo se transmiten múltiples rayos, diferenciándose en el modo de propagación de cada uno de ellos. Este tipo de fibra se utiliza en comunicaciones de corta distancia, por ejemplo entre edificios comerciales, bancos, dependencias en general, cuya distancia de cableado sea menor a los dos kilómetros.

En las fibras monomodo se presenta la propagación de un solo haz de luz actuando así la fibra como una guía de onda sin producirse rebotes al interior de la misma. Posee mejores características de transmisión en relación a las fibras multimodo por lo que se recomienda su uso para enlaces a largas distancias.

C. Atenuación y Dispersión en los Sistemas de Transmisión Ópticos

La luz que viaja a través de la fibra pierde potencia conforme recorre una distancia determinada; dichas pérdidas causan degradación en la comunicación, por lo cual es imperativo mantenerlas en los niveles más bajos posibles.

Las pérdidas presentes en un enlace óptico pueden ser intrínsecas, debidas principalmente a efectos de absorción o dispersión de Rayleigh y Mie; así como también extrínsecas, debido principalmente a pérdidas por: curvaturas, microcurvaturas, acoplamiento, tendido, ambiente y envejecimiento. Al momento de elaborar el diseño del enlace óptico es primordial tomar en cuenta todas y cada una de las posibles causas de degradación de la transmisión.

Además, en una transmisión óptica se presenta el efecto de dispersión temporal, el cual ocurre cuando el pulso de luz se ensancha a lo largo de la transmisión. Este efecto es directamente proporcional a la longitud de la fibra, y se tienen los siguientes tipos de dispersión: modal, cromática de material, de guía de onda y de polarización.

II. PROPAGACIÓN EN SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICOS^{[4][5]}

La energía electromagnética puede propagarse en forma de voltaje o corriente a través de los cables metálicos y ondas de radio emitidas hacia el espacio libre. La energía electromagnética se distribuye en un rango de frecuencias llamado espectro electromagnético.

Una onda electromagnética contiene tanto campo eléctrico como magnético. Ambos campos se encuentran dispuestos de tal manera que forman un ángulo de 90° entre sí. La

propagación de ondas electromagnéticas por el espacio libre comúnmente se la llama propagación de radiofrecuencia (RF). El espacio libre no implica el vacío, sino que se considera la propagación a través de la atmósfera terrestre.

A. Propagación de Ondas Electromagnéticas

Las propiedades ópticas pueden ser aplicadas a las ondas de radio, ya que las señales ópticas pueden ser concebidas como ondas de alta frecuencia. Para los fenómenos de reflexión y refracción se considera una onda electromagnética que incide sobre superficies que son grandes en relación a su longitud de onda.

Existen tres formas de propagación de ondas electromagnéticas dentro de la atmósfera terrestre: onda terrestre, onda espacial y ondas celestes o ionosféricas. Para el desarrollo de los diseños de los enlaces inalámbricos en el presente trabajo se utiliza la transmisión por ondas espaciales mediante ondas directas (transmisión por línea de vista), Fig. 3.



Fig. 3. Transmisión de ondas electromagnéticas por línea de vista.

B. GANANCIA EN UN ENLACE INALÁMBRICO

La ganancia del sistema se define como la diferencia entre la potencia nominal de salida de un transmisor, y la potencia de entrada mínima necesaria en el receptor.

Para establecer la ganancia requerida en un enlace de microonda es necesario considerar tanto las pérdidas y ganancias que se tienen a lo largo del enlace.

1) : Margen de Desvanecimiento

Las comunicaciones por microondas requieren la propagación de ondas electromagnéticas a través del espacio libre, lo que genera pérdidas inherentes a la trayectoria. Además de estas pérdidas se presentan disminuciones intermitentes en la intensidad de la señal, las cuales se deben a agentes meteorológicos tales como: lluvia, nieve, granizo, entre otros; así como también a trayectorias múltiples de transmisión y a superficies terrestres irregulares. Esta pérdida aleatoria se la conoce como margen de desvanecimiento.

Para cuantificar el margen de desvanecimiento se toman en cuenta los efectos de la propagación por trayectorias múltiples, la sensibilidad del terreno y los objetivos de confiabilidad.

Para un sistema sin diversidad resolviendo las ecuaciones de confiabilidad de Barnett – Vignant se tiene para una disponibilidad anual especificada, la siguiente ecuación:

$$F_m = 30 \log D + 10 \log(6. A. B. f) - 10 \log(1 - R) - 70$$

Donde:

$F_m =$ Margen de desvanecimiento

$30 \log D =$ Efecto por trayectorias múltiples
 $D =$ Distancia (kilómetros)
 $10 \log(6. A. B. f) =$ Sensibilidad del terreno
 $A =$ Factor de rugosidad.
 $B =$ Factor para convertir la peor probabilidad mensual en una probabilidad anual.
 $10 \log(1 - R) =$ Objetivos de confiabilidad
 $R =$ Confiabilidad en tanto por uno
 $1 - R =$ Objetivo de confiabilidad para una ruta de 400 kilómetros en un sentido.

2) : *Pérdidas en la Trayectoria por Espacio Libre*

Son las pérdidas que ocurren en la onda electromagnética cuando se propaga en línea recta de manera directa entre la antena emisora y la antena receptora a través del espacio libre.

Las pérdidas por espacio libre dependen de la frecuencia, y aumentan con la distancia. Se calculan de acuerdo a la siguiente expresión:

$$L_{P(dB)} = 10 \log \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2 = 10 \log \left(\frac{4\pi f D}{c} \right)^2, \text{ donde:}$$

$L_P =$ Pérdidas en la trayectoria en espacio libre.

$D =$ Distancia (metros)

$f =$ Frecuencia (hertz)

$\lambda =$ Longitud de onda (metros)

$c =$ velocidad de luz en el espacio libre

3) : *Cálculo de la Ganancia del Sistema*

Para el diseño de los enlaces inalámbricos es necesario el estudio de factibilidad de la recepción de la señal, para lo cual se analizan los parámetros que generan las pérdidas y ganancias de potencia dentro del sistema.

La potencia captada en recepción se calcula así:

$$P_{RX} = \sum_{\text{ganancias}} - \sum_{\text{pérdidas}}, \text{ donde:}$$

$P_{RX} =$ Potencia de recepción (dBm)

$\sum_{\text{pérdidas}} =$ $L_P + L_f + L_b + F_m$, donde:

$L_P =$ Pérdida en trayectoria por espacio libre (dB)

$L_f =$ Pérdida en alimentador de guía de onda (dB) entre la red de distribución y su antena respectiva

$L_b =$ Pérdida total por acoplamiento (dB) entre la salida de un transmisor o la entrada de un receptor, y su guía de onda de alimentación respectiva

$F_m =$ Margen de desvanecimiento

$\sum_{\text{ganancias}} =$ $P_t + A_t + A_r$, donde:

$P_t =$ Potencia de salida del transmisor (dBm)

$A_t =$ Ganancia de la antena de transmisión (dB)

$A_r =$ Ganancia de la antena de recepción (dB)

El receptor deberá garantizar que su umbral de recepción sea menor que la potencia recibida en el mismo.

III. DISEÑO DE LA AMPLIACIÓN DE LA RED DE COMUNICACIÓN CON FIBRA ÓPTICA Y TECNOLOGÍA INALÁMBRICA

A. Establecimiento de los Enlaces Requeridos

Para el diseño de la ampliación de la red de Emelnorte S.A. previamente es necesario determinar cada uno de los sitios en donde se requiere la implementación de los enlaces. En las tablas I y II se indican los enlaces de fibra óptica e inalámbricos requeridos por la empresa.

TABLA I.

ENLACES DE FIBRA ÓPTICA REQUERIDOS PARA LA AMPLIACIÓN DE LA RED DE EMELNORTE S.A

Estación A	Estación B
Subestación La Esperanza	Agencia Tabacundo
Subestación Cayambe	Agencia Cayambe
Subestación Otavalo	Agencia Otavalo
Subestación San Vicente	Agencia Otavalo
Subestación Cotacachi	Agencia Cotacachi
Subestación Atuntaqui	Agencia Atuntaqui
Subestación Alpachaca	Central Diesel
Subestación Tulcán	Agencia Tulcán
Subestación El Rosal	Agencia Tulcán
Subestación San Gabriel	Agencia San Gabriel
Subestación El Ángel	Agencia El Ángel
Subestación El Chota	Despacho de Carga
Central Ambi	Subestación Alpachaca
Central San Francisco	Agencia Tulcán
Central San Miguel de Car	Subestación Tulcán
Central La Playa	Central San Francisco

B. Estudio del Tráfico que se transmitirá a través de los Enlaces a Diseñar^{[6][7]}

La ampliación de la red de la empresa está destinada principalmente al manejo del tráfico tipo SCADA¹ que permita el monitoreo y control a pequeña escala de las

¹ SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*)

distintas variables que se encuentran en las subestaciones y centrales de la empresa.

TABLA II
ENLACES INALÁMBRICOS REQUERIDOS PARA LA AMPLIACIÓN DE LA RED DE EMELNORTE S.A

Estación A	Estación B
Subestación La Esperanza	Agencia Tabacundo
Subestación Cayambe	Agencia Cayambe
Subestación Otavalo	Agencia Otavalo
Subestación San Vicente	Agencia Otavalo
Subestación Cotacachi	Agencia Cotacachi
Subestación Atuntaqui	Agencia Atuntaqui
Subestación Alpachaca	Central Diesel
Subestación Tulcán	Agencia Tulcán
Subestación El Rosal	Agencia Tulcán
Subestación San Gabriel	Agencia San Gabriel
Subestación El Ángel	Agencia El Ángel
Subestación El Chota	Despacho de Carga
Central San Francisco (Bodega Tulcán)	Agencia Tulcán

Además, la empresa tiene como visión futura la implementación de ciertas aplicaciones IP tales como voz y video – vigilancia, las cuales podrán ser accedidas desde las subestaciones y centrales. Se considerará el requerimiento de ancho de banda que permita manejar dichas aplicaciones a través de los nuevos enlaces de comunicación.

Para determinar la capacidad de canal requerido para subestaciones y centrales de generación, se debe tomar en cuenta las variables físicas y eléctricas generadas tanto en las centrales como en las subestaciones. Para el cálculo de la capacidad de canal requerida por las aplicaciones SCADA, se calcula la velocidad de transmisión necesaria para cada una de de las variables en base a los parámetros técnicos de los equipos utilizados para la red interna en cada una de las estaciones.

Luego se calcula la capacidad necesaria para las aplicaciones de voz y video sobre IP que serán implementadas a futuro por la empresa.

En la tabla III se indica el resumen del requerimiento de capacidad de canal para cada una de las aplicaciones que se transmitirán sobre los enlaces a diseñar.

TABLA III
REQUERIMIENTOS DE CAPACIDAD DE CANAL PARA LAS APLICACIONES A TRANSMITIR.

Tipo de datos	V _{tx} [Kbps]
SCADA en las centrales	77,31
SCADA en las subestaciones	25,6
Voz IP	59,2
Video – vigilancia	1356,32

C. Diseño de la Ampliación de la Red utilizando enlaces de Fibra Óptica^{[1][2][8]}

Se tomará como referencia el diseño del enlace que interconecta al Despacho de Carga con la subestación Alpachaca, para lo cual se establece primeramente la ubicación geográfica y las características de acceso a las estaciones a enlazar.

1) Consideraciones preliminares

Para el diseño de los enlaces de fibra óptica es necesario establecer la velocidad de transmisión (B) a manejar y la longitud del enlace (L). Además se debe escoger el resto de parámetros adecuados para el enlace tales como: longitud de onda, tipo de fibra óptica, fuentes y emisores ópticos. Dichos parámetros serán los puntos fundamentales en el diseño.

Se tomará como referencia el diseño del enlace que interconecta a Central El Ambi con la subestación Alpachaca, para lo cual se establece primeramente la ubicación geográfica y las características de acceso a las estaciones a enlazar.

2) Requerimiento de capacidad de canal para el enlace

En la tabla IV se indica el requerimiento de canal para el enlace.

TABLA IV
CAPACIDAD REQUERIDA PARA EL ENLACE CENTRAL EL AMBI – SUBESTACIÓN ALPACHACA

Tipo de datos	V _{tx} [Kbps]
SCADA en la central	77,31
Voz IP	59,2
Video – vigilancia	1356,32
TOTAL	1492,83

El requerimiento de velocidad de transmisión es pequeño en comparación a los manejados por fibras ópticas de altas capacidades, por lo que bastaría con la utilización de fibra óptica multimodo para cada uno de los enlaces ; sin embargo, la empresa pensando a futuro, en la posibilidad de brindar a la comunidad nuevos tipos de servicios ha requerido que los enlaces sean sobredimensionados para capacidades mayores a las requeridas, lo cual es posible con la utilización de fibra óptica monomodo para cada uno de los enlaces.

3) Selección de la ruta y análisis del tipo de cable a utilizar

Para los enlaces a diseñar surgen principalmente dos alternativas para el tendido del cable de fibra óptica: a través de canales subterráneos a través de estructuras que permitan el tendido aéreo. En el primer caso surgen algunas complicaciones en vista de que se requeriría la construcción de las rutas de cañería a través de todo el recorrido de la fibra entre estaciones terminales. En cambio para el tendido del cable aéreo de fibra óptica, se cuenta con los postes de hormigón propiedad de la

empresa, a través de los cuales se encuentran las líneas de transmisión de energía eléctrica, constituyéndose así en rutas válidas y establecidas para el tendido aéreo del cable. Por lo cual se concluye que el tendido aéreo constituye la mejor opción para el diseño de los enlaces de fibra óptica requeridos por la empresa.

En el mercado sobresalen tres tipos de cables aéreos de fibra óptica: OPGW, ADSS y Figura en 8. En la tabla V se presenta un análisis comparativo entre las características de éstos cable.

Luego de analizar detenidamente las características de los cables, y de acuerdo a las características del enlace requerido y de la postería existente, se escogió a la fibra ADSS como la más conveniente para éste y el resto de los enlaces. Se debe destacar que, además de su inmunidad a la interferencia electromagnética y a la caída de rayos, su mantenimiento es fácil y el costo del cable y del sistema completo son menores al que se incurriría con la utilización del cable OPGW. Es oportuno también señalar que los vanos sobre los cuales se tenderá el cable aéreo son medianos y pequeños, por lo cual no se tiene la necesidad de proponer el cable de Figura en 8

El cable ADSS a utilizar deberá ser de estructura holgada (*loose tube*) debido a que éste presenta un buen aislamiento ante las fuerzas externas, así como también posee buenas prestaciones contra la deformación, envejecimiento y degradación. Cuenta además con un revestimiento interno, el cual presenta un soporte adicional en el proceso de tendido.

TABLA V

COMPARACIÓN ENTRE CABLES ADSS, OPGW Y FIGURA EN 8.

Parámetros	ADSS	OPGW	Figura en 8
Confiabilidad	alta	alta	alta
Sobrecarga estructural	baja	considerable	considerable
Inmunidad ante caída de rayos	total	ninguna	total (con guía dieléctrico)
Instalación en sistema nuevo	simple	simple	simple
Instalación sobre sistema existente	simple	complejo	simple
Facilidad de mantenimiento	fácil	difícil	Fácil
Costo del cable	bajo	alto	medio
Costo de instalación	bajo	alto	Bajo
Costo total del	bajo	alto	Medio

sistema			
Acceso a fibras ópticas	fácil	difícil	fácil

La Unión Internacional de Telecomunicaciones en el sector de normalización (UIT-T) ha publicado dos recomendaciones para tendidos aéreos de fibra óptica monomodo que son: G.652 (Características de las fibras y cables monomodo estándar) y G.655 (Características de fibras y cables ópticos monomodo con dispersión desplazada no nula).

Si bien las características de transmisión de la fibra que se ajusta a la norma G.655 presenta mejores prestaciones para el soporte de aplicaciones que demandan gran ancho de banda, la capacidad requerida para los enlaces a diseñar a corto y a largo plazo no justifica la inclusión de este tipo de cable. Además, los enlaces de fibra óptica requeridos por la empresa son de distancias cortas y medias, con lo cual sería suficiente la utilización de un cable monomodo que cumpla con la recomendación G.652. Cuando los enlaces de fibra óptica se encuentran en este rango de longitud no es necesaria la inclusión de compensadores de dispersión en el trayecto, lo que encarecería el enlace y haría necesaria la utilización de un cable de fibra óptica que cumpla con la recomendación G.655 que es ideal para transmisión en altas velocidades para grandes distancias pero con un costo considerablemente mayor.

Dentro de la recomendación G.652, la más utilizada y recomendada es la G.652D, debido principalmente a que sobre la misma se soportan altas tasas binarias de transmisión de datos, y permite además transmisiones en un rango amplio de longitudes de onda adicionales que va desde los 1360 nm hasta los 1530 nm.

4) Cálculo de potencia para el enlace

Para garantizar que un enlace de fibra óptica se encuentre correctamente dimensionado se debe cumplir la siguiente relación que incluye todos los parámetros que influyen en la atenuación total del enlace:

$$P_T - n * \alpha_C - \alpha * D - \alpha_e * N_e - M_C - M_e \geq P_R,$$

Donde:

- P_T = Potencia de transmisión [dBm]
- α_C = Atenuación debida al conector utilizado en el interfaz [dB]
- n = Número de conectores de extremo a extremo del enlace
- α_e = Atenuación debida a los empalmes [dB]
- α = Atenuación debida a la longitud de la fibra óptica [dB/Km]
- D = longitud efectiva de la fibra óptica [Km]
- N_e = Número de empalmes

- M_C = Margen de seguridad del cable de fibra óptica [dB]
 M_e = Margen del interfaz óptico de transmisión [dB]
 P_R = Potencia de recepción mínima [dBm]

Para los extremos del enlace se usarán conectores SC que son los empleados generalmente para la transmisión de datos, los cuales nominalmente introducen pérdidas de 0,4 dB cada uno. Cabe señalar que para cada extremo del enlace se cuenta con un cable *Patch cord* a la salida del ODF, el cual servirá para la conexión con los equipos activos del sistema. Por lo tanto para cada enlace se tiene la existencia de seis conectores.

El margen de reserva para los equipos por envejecimiento y condiciones ambientales están en el orden de 2 a 3 [dB] y el margen de seguridad para los cables debido a futuras reparaciones está entre 1 y 2 [dB].

Actualmente, cuando se requiere la inclusión de empalmes a lo largo del trayecto de la fibra óptica se utiliza la técnica de fusión, la cual incluye pérdidas que se encuentran en el rango de 0.01 a 0.2 dB. Cuando éste es el caso, se deben incluir elementos de encapsulado, los cuales protegen a los empalmes de los esfuerzos y de la contaminación.

Por lo mencionado anteriormente, para el cálculo de atenuación del enlace se tiene:

$$-5[\text{dBm}] - 6 * 0,4[\text{dB}] - 0,4 * 4,302[\text{dB}] - 2[\text{dB}] - 3[\text{dB}] \geq -26 [\text{dBm}]$$

$$-14,1208 [\text{dBm}] \geq -26 [\text{dBm}]$$

Por lo tanto, al ser la potencia recibida mayor que la sensibilidad del receptor, el enlace es satisfactorio.

El ancho de banda resultante para el enlace es el siguiente:

$$AB = \frac{0,5}{4,327[\text{Km}] * 5,3 \left[\frac{\text{ps}}{\text{nm. Km}} \right] * 5[\text{nm}]}$$

$$AB = 4,36 [\text{GHz}]$$

IV. DISEÑO DE LA AMPLIACIÓN DE LA RED UTILIZANDO ENLACES INALÁMBRICOS

Se toma como referencia el diseño y simulación del enlace Bodega Tulcán (Central San Francisco) – Agencia Tulcán.

Para el diseño de los enlaces inalámbricos se usa el paquete computacional Radio Mobile que permite simular el comportamiento de los enlaces inalámbricos en base a la disposición geográfica de los puntos a enlazar y los parámetros técnicos de los equipos a usar.

A. Radio Mobile^[9]

Radio Mobile usa el modelo de propagación Longley – Rice, el cual, se basa en la teoría del electromagnetismo y el análisis estadístico de las características del terreno y los parámetros del radioenlace. Permite predecir la atenuación media de una señal de radio que se propaga por un entorno troposférico

sobre terreno irregular. El modelo fue estimado para frecuencias comprendidas entre los 20 MHz y los 40 GHz, y para distancias entre 1 Km y 2000 Km.

Para los cálculos de propagación, el modelo Longley – Rice tiene los siguientes parámetros: frecuencia, PIRE¹, tipo de antena, altura de la antena, polarización de la antena, refractividad, permitividad, conductividad y el clima.

B. Requerimiento de capacidad de canal para el enlace

El enlace a diseñar además de transmitir los datos generados en la central San Francisco, deberá garantizar la capacidad del canal para los datos que se generan en la Central La Playa, debido a que para ésta última se establece el diseño de un enlace de fibra óptica que la interconecta con la central San Francisco, previo a su interconexión con la Agencia Tulcán. En la tabla VI se indica el requerimiento de canal para el enlace.

TABLA VI

CAPACIDAD REQUERIDA PARA EL ENLACE BODEGA TULCÁN (CENTRAL SAN FRANCISCO) – AGENCIA TULCÁN.

Tipo de datos	Vtx [Kbps]
Central La Playa (enlace fibra óptica)	1492,83
SCADA en la central	77,31
Voz IP	59,2
Video – vigilancia	1356,32
TOTAL	2985,66

C. Consideraciones preliminares para el diseño

Primeramente se describe la situación geográfica de las estaciones a enlazar como sigue:

La Bodega Tulcán (Central San Francisco) está ubicada en la provincia del Carchi, en la parte nororiental de la ciudad de Tulcán, en las siguientes coordenadas: 00° 49' 39.36" Norte, 77° 42' 45.08" Oeste a 2921 m.s.n.m.

La Agencia Tulcán se localiza en las siguientes coordenadas: 00° 48' 39.10" Norte, 77° 43' 4.34" Oeste a 2944 m.s.n.m. Se ubica en el centro de la ciudad, en la zona urbana. Al situarse dentro del perímetro urbano se cuenta con una buena accesibilidad al lugar. El edificio donde opera la agencia Tulcán es de tres pisos y cuenta con una altura aproximada de 14 metros; en la parte superior del edificio se tiene un mástil de 4 metros de altura, por lo que se tendría una altura efectiva total de 18 metros para la ubicación de las antenas para el diseño.

La trayectoria del enlace se encuentra libre de obstáculos, es decir, se cuenta con una línea de vista despejada. La distancia entre los dos puntos a enlazar es de 1956 metros. La altura a la que se debe colocar la antena en la bodega es de 9 metros con

¹ PIRE: Potencia Isotrópica Radiada Equivalente

respecto al nivel suelo, y en la agencia a una altura de 15 metros con respecto al nivel del mismo.

Con la ayuda del modelo digital de terreno SRTM¹ utilizado por Radio Mobile se puede observar, en el perfil de terreno entre las dos estaciones a enlazar, que la primera zona de Fresnel se encuentra totalmente despejada, Fig.4.

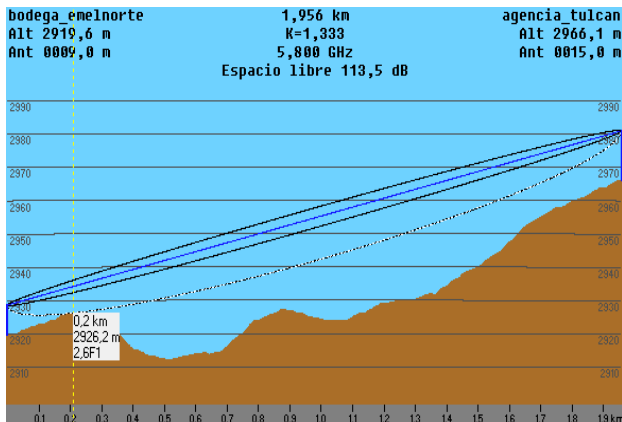


Fig. 4. Perfil de terreno entre la Bodega (Central San Francisco) y la Agencia Tulcán.

D. Cálculos de propagación y simulación del enlace en Radio Mobile

Los parámetros con los cuales se realizó la simulación del radioenlace se muestran en la tabla VII; éstos fueron determinados de acuerdo a las características geográficas, topográficas y ambientales de las estaciones a enlazar. Se señala también que los parámetros de ganancia de las antenas y potencias transmitidas por el radio base son los mínimos con los que se asegura un comportamiento aceptable del enlace.

En la simulación del enlace se cuantifican las pérdidas generadas en el enlace debidas a la propagación de las ondas electromagnéticas en el espacio libre, pérdidas por el entorno natural o urbano y las pérdidas generadas por conectores y líneas de conexión. Además, con el valor de potencia que indica la simulación se establece el margen de recepción mínimo que deberá tener el receptor.

El porcentaje a incluir en el campo de pérdidas adicionales por entorno urbano y boscoso representa la cantidad aproximada de territorio de este tipo dentro del mapa de trabajo. Por lo tanto, en las zonas urbanas la determinación del porcentaje adecuado dependerá exclusivamente de la presencia de edificios, casas, vías y avenidas con números considerables de vehículos en movimiento (efecto Doppler²) y vegetación ligera. Para las zonas rurales este porcentaje dependerá de la densidad de vegetación y territorio boscoso que se localice entorno al enlace a simular.

¹ SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

² Efecto Doppler: se refiere al aparente cambio de frecuencia que se percibe en recepción debido al movimiento del emisor de la señal con respecto al receptor.

TABLA VII

ENLACE BODEGA TULCÁN (SAN FRANCISCO) – AGENCIA TULCÁN

CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO	
Frecuencia de operación	5,8 [GHz]
Distancia	1956 [m]
Refractividad de la superficie	301 [unidades-n]
Conductividad del suelo	0,02 [S/m]
Permitividad relativa al suelo	25
Inclusión de pérdidas por entorno urbano	60%
Clima	Continental templado
Topología	Enlace punto – punto
PARÁMETROS DE LOS EQUIPOS USADOS EN LA SIMULACIÓN	
Potencia Transmisión	23 dBm
Ganancia antena Tx	12 dBi
Ganancia antena Rx	12 dBi
Umbral de recepción	1 [μV]
PÉRDIDAS EN EL ENLACE Y CARACTERÍSTICAS DE RECEPCIÓN	
Pérdidas en el espacio libre	113,5 dB
Pérdidas en línea	0,5 dB
Pérdidas entorno urbano	25,6 dB
Pérdidas totales de propagación	140,0 dB
Nivel de recepción	1,4089 [μV]

V. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA LA INCLUSIÓN DE LOS ENLACES DISEÑADOS SOBRE LA RED WAN ACTUAL DE LA EMPRESA^[10]

La red WAN que actualmente tiene la empresa opera de manera que las agencias envían los datos a través de una conexión ADSL a través de la Red Metropolitana de Andinadatos (ahora CNT³). Las agencias de Tulcán, Otavalo y Cayambe tienen disponible un ancho de banda de 512 Kbps, mientras que el resto de agencias disponen de 256 Kbps. Al edificio matriz llegan los datos transmitidos por las agencias mediante un enlace en fibra óptica de 4 Mbps resultante del conjunto de los anchos de banda disponibles para cada una de las agencias.

Cada enlace ADSL fue monitoreado con la ayuda del paquete ZenossTM Core para obtener valores picos reales de ocupación del canal. Tomando en cuenta que estos valores picos reportados establecen la mayor ocupación operativa del canal, se adiciona a los mismos el volumen de tráfico

³ CNT: Consejo Nacional de Telecomunicaciones

SCADA que será añadido por los nuevos enlaces de comunicación. Para garantizar el correcto funcionamiento de la red global debe garantizarse que la capacidad de canal alquilada a la CNT soporte dicha inclusión de tráfico. Los resultados se muestran en la tabla 8.

Cuando la empresa implemente las futuras aplicaciones de voz y video sobre IP para las subestaciones y centrales deberá replantear los planes de capacidad de canal alquilados a la CNT de acuerdo al estudio de tráfico resumido en la tabla VIII.

TABLA VIII

ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD DE LA TRANSMISIÓN DEL NUEVO VOLUMEN DE TRÁFICO GENERADO POR LOS ENLACES DISEÑADOS.

Agencia	Veloc. pico medida [Kbps]	Capac. de canal adicional [Kbps]	Capac. canal requerido [Kbps]	Capac. de canal alquilado [Kbps]
Tulcán	312,44	283,11	595,55	512
San Gabriel	26,01	25,60	51,61	256
El Ángel	6,56	25,60	32,16	256
Atuntaqui	46,73	25,60	72,33	256
Otavalo	22,17	51,20	73,37	512
Cotacachi	21,04	25,60	46,64	256
Cayambe	30,12	25,60	55,72	256
Tabacundo	8,61	25,60	34,21	256
Matriz	381,54	487,91	869,45	4096

CONCLUSIONES

- Al establecer los enlaces de comunicación que interconectan las subestaciones y centrales de generación, se incorporan con ayuda de los sistemas automatizados nuevas capacidades de monitoreo, medición, control y registro, lo cual garantiza una mejora en los procesos operativos de dichas dependencias, y a la vez cumplen los requerimientos exigidos por el CENACE.
- Para el correcto dimensionamiento del tráfico a manejar por cada uno de los enlaces fue necesario establecer el nivel y el método de compresión, tanto para la voz como para el video sobre IP, el cual determinará la calidad y comportamiento de las aplicaciones mencionadas.

- De acuerdo a las características de los enlaces de fibra óptica se estableció la utilización del cable aéreo tipo ADSS como el más conveniente en relación al cable OPGW y al Figura en 8, debido principalmente a su alta inmunidad a los efectos de los campos electromagnéticos en el cable con la inclusión de la capa antitracking, su fácil mantenimiento y su costo total menor.
- Radio Mobile es un paquete computacional que permite en base a un modelo digital de terreno la simulación de un enlace de radio cualquiera en función a su situación topográfica, ubicación geográfica, equipos y elementos a utilizar, en base a modelos matemáticos que simulan el comportamiento de la propagación de ondas electromagnéticas.

RECOMENDACIONES

- Si bien, en el análisis de tráfico se realiza una previsión a futuro en relación a la capacidad a ser soportada por los enlaces, se recomienda dejar un margen adicional de ancho de banda disponible, el cual evitará futuras complicaciones causadas principalmente por el apareamiento de nuevas aplicaciones y tecnologías que no pueden ser anticipadas en la actualidad.
- La rutas que fueron determinadas para el tendido del cable de fibra óptica se establecieron tomando en cuenta la disminución de riesgo de robos o sabotajes, al seguir principalmente la postiería que aloja el sistema de distribución de energía eléctrica en alta tensión, lo cual brinda un mayor nivel de seguridad, por lo que se recomienda seguir los recorridos establecidos.

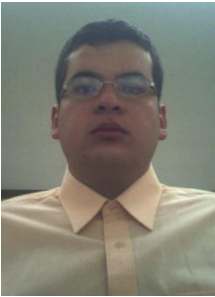
REFERENCIAS

- [1] JIMÉNEZ, María Soledad. MSc. Comunicaciones Ópticas. 2007
- [2] SANZ, José Martín. Comunicaciones Ópticas. Tercera Edición. Paraninfo S.A. 1996
- [3] CORRAL, Fabián. MSc. Sistemas de Fibra óptica. 2007.
- [4] TOMASI, Wayne. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. Cuarta Edición. Prentice – Hall. 2003
- [5] BERNAL, Iván. Ph.D Comunicaciones Inalámbricas. Revisión de conceptos básicos de antenas y propagación. EPN. 2008.
- [6] EMELNORTE S.A. Dirección de Distribución. Jefatura de Subestaciones. Manual Técnico de operación y funcionamiento de los equipos utilizados en la automatización de subestaciones.
- [7] EMELNORTE S.A. Dirección de Generación. Automatización de procesos en la Central El Ambi. Ing. Diego Ortiz.

- [8] Guía de diseño para Estaciones Transformadoras. Guías de diseño normas de sistemas de comunicaciones por fibra óptica. Transener S.A.
- [9] MANUAL de Radio Mobile, http://download.ehas.org/docs/manual_radiomobile.doc
- [10] Información entregada por EMELNORTE S.A. Dirección del Centro de Cómputo. Ing. Xavier Brito.
- [11] ROMÁN Roberto Ing., Diseño de la Ampliación de la red de comunicación de EMELNORTE S.A. utilizando fibra óptica y tecnología inalámbrica, E.P.N. Febrero de 2010.

titulación. Se ha desempeñado como consultor y asesor para algunas entidades públicas y privadas. Sus áreas de interés actuales son: Redes de Información, Comunicaciones Inalámbricas y Transmisión de Datos. Es miembro de la Association for Computing Machinery (ACM) y el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

BIOGRAFÍA



Roberto Xavier Román Vásquez.

Nacido en Ibarra –Ecuador, el 29 de octubre de 1985. Sus estudios primarios los realizó en la Escuela “La Salle” en la ciudad de Ibarra. En el año de 1997 ingresó al Colegio Fisco-misional “San Francisco” de la ciudad de Ibarra en donde finalizó sus estudios secundarios, obteniendo en el año 2003 su título de

Bachiller con Especialización Físico–Matemáticas. Obtuvo su título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en la Escuela Politécnica Nacional en Febrero de 2010. Realizó las prácticas pre-profesionales en el Grupo TV Cable (Ibarra) y en INGETESAC, empresa dedicada al diseño e implementación de enlaces inalámbricos y en fibra óptica.



Pablo Hidalgo Lascano. Nació en Ambato en 1959. Obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en la Escuela Politécnica Nacional (1985) siendo declarado el mejor graduado de su promoción. Becado por el Gobierno Alemán y auspiciado por la E.P.N.

realizó estudio de postgrado en Telecomunicaciones en el Deutsche Bundespost (1988 - 1990) y en la Maestría de Conectividad y Redes de Telecomunicaciones en la E.P.N. (2000 - 2002) Actualmente se desempeña como profesor principal del Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información de la E.P.N. Fue promotor y Coordinador de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Redes de Información de la E.P.N. (2000 – 2007). Ha dirigido más de 60 tesis de grado y proyectos de