

Despliegue óptimo de redes ópticas para comunicaciones en redes eléctricas inteligentes

Optimal deployment of optical networks for smart grids communications

Milton Ruiz ^{1*}, Esteban Inga ²

^{1,2}Grupo de Investigación Redes Eléctricas Inteligentes, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: mruizm@ups.edu.ec

RESUMEN– El presente artículo muestra el diseño óptimo de la red óptica de comunicaciones en redes eléctricas inteligentes. Para analizar el problema de cobertura se define cada una de las subestaciones con sus respectivas coordenadas georreferenciadas, por medio del algoritmo planteado es posible crear el árbol de mínima expansión que comunica a todos los actores del sector eléctrico. Se toma en cuenta una serie de restricciones, tales como rendimiento de cada etapa en términos de requisitos de tasa de bits de datos, potencia, tasa de bits errados (Bit Error Rate) y *jitter*. El objetivo es limitar las distancias entre las subestaciones con la finalidad de evitar equipos adicionales intermedios como los amplificadores de la señal óptica. Las fibras ópticas analizadas son tipo G.652, G.652b y G.655 implementada en el interior del cable de guarda OPGW desplegado sobre las torres de transmisión en el sistema eléctrico. Los parámetros que debe cumplir el diseño de la red de transporte óptico están sujetos al estándar ITU-T G.959.1 para aplicaciones multicanal de corta distancia.

Palabras clave– *Comunicaciones por fibra óptica, optimización, redes inteligentes, redes ópticas pasivas, WDM-PON.*

ABSTRACT–This paper presents the optimal design of an optical communications network in smart grids. To analyze the coverage problem, each substation must be defined with their respective georeferenced coordinates. A number of constraints are taken into account, such as performance of each stage in terms of data bit rate requirements, power, bit error rate (BER) and jitter. The purpose of this work is to limit the distances between the substations in order to avoid additional intermediate equipment such as optical signal amplifiers. The optical fibers analyzed are type G.652, G.652b and G.655 implemented inside the OPGW guard cable deployed on the transmission towers in the electrical system. The design of the optical transport network meets to the ITU-T G.959.1 standard for multi-channel short distance applications.

Keywords– *Fiber optics communications, optimization, smart grid, passive optical networks, WDM-PON.*

1. Introducción

La transformación de la red eléctrica actual, en una red inteligente dinámica, resistente y adaptable, es uno de los mayores desafíos tecnológicos a nivel mundial. Las nuevas redes eléctricas inteligentes permiten a los consumidores controlar el uso de la energía eléctrica, integra la próxima generación de vehículos eléctricos, aumentando la eficiencia y aprovechando mejor las energías renovables combinando el flujo de electricidad y de información de forma bidireccional. Por lo tanto, se debe aprovechar las capacidades informáticas modernas para procesar y transportar grandes volúmenes de información y por esta razón el dimensionamiento de las redes de comunicaciones es de suma importancia.

En la presente investigación se realiza el diseño óptimo de la red de comunicaciones por fibra óptica, utilizada como medio para la transmisión de información por las redes eléctricas inteligentes, tomando en cuenta las siguientes investigaciones.

En [1] se presenta los dispositivos implementados en los hogares inteligentes tomando en cuenta las tasas de transmisión y las tecnologías utilizadas. La investigación brinda un panorama de la data generada en los hogares inteligentes. La gran cantidad de datos debe ser almacenada, gestionada y posteriormente transportada hacia los sistemas de gestión utilizando diferentes medios de comunicación.

Las investigaciones [2][3], optimizan el uso de los canales de radio celular para la transmisión de datos desde los medidores inteligentes hacia las empresas eléctricas, permitiendo la gestión de energía en tiempo real.

En [4] se plantea la infraestructura de red de alta disponibilidad para comunicar a los diferentes actores de las redes eléctricas inteligentes. La investigación brinda un panorama de la topología de red desplegada para comunicaciones WAN en redes eléctricas inteligentes, pero no se describe las características del medio físico por el cual se transmiten los datos.

La literatura descrita en [5] se proporciona una descripción de las comunicaciones en redes eléctricas inteligentes. Se detallada las redes ópticas implementadas para comunicaciones WAN desplegadas por empresas públicas, usando cables tipo OPGW.

En [6] se plantean los beneficios de contar con sistemas de comunicaciones implementados en las redes de transporte de energía eléctrica, pero no se plantean las características de los tipos de fibras que se pueden desplegar.

En [7] se describen todos los sistemas y servicios que brinda la red eléctrica inteligente y, características como tasas de transmisión, latencias y payload necesarios para gestión de energía en tiempo real.

En [8] se presenta el diseño de redes WDM-PON, basado en el árbol de expansión mínima apoyándose en la triangulación Delaunay. Este trabajo brinda una primera perspectiva de optimización mediante la creación de clúster, utilizando nodos distribuidos aleatoriamente no georreferenciados.

En [9] se presenta un algoritmo de optimización para el despliegue de redes PON aplicado a ciudades reales con datos de OpenStreetMap tomando en cuenta edificaciones, distancias y números de usuarios.

Los sistemas de comunicación por fibra óptica permiten el transporte de información a través de largas distancias con altas velocidades para aplicaciones fiables, seguras, eficientes y con altos niveles de disponibilidad.

Los factores que se analizan en comunicaciones por fibra óptica desplegados en cables de guarda en redes eléctricas son: capacidad, atenuación, interferencia, seguridad y costos los mismos se presentan en [10].

La arquitectura de comunicaciones totalmente distribuida en redes eléctricas inteligentes, presentan múltiples sistemas distribuidos de gestión (Distribution Management System) desplegados a nivel nacional. Cada DMS se encarga del almacenamiento y procesamiento de la información proporcionada por los diferentes gestores de la red eléctrica inteligente. Al implementar arquitecturas distribuidas, se optimiza el ancho de banda en las comunicaciones, reduciendo la cantidad de datos a transmitir en su centro de control, debido a que la información que se transmite por cada región son datos depurados que han sido procesados por cada uno de los DMS, ya que solo una pequeña parte de los datos son necesarios para los servicios de operación y gestión.

Por ejemplo, el servicio de gestión de apagones (Outage Management Systems), solo necesita obtener datos de calidad de la energía en situaciones normales.

La figura 1 presenta la red de gestión de información

totalmente distribuida con el despliegue de la red de fibra óptica desde el centro de gestión principal hasta los nodos sucursales.

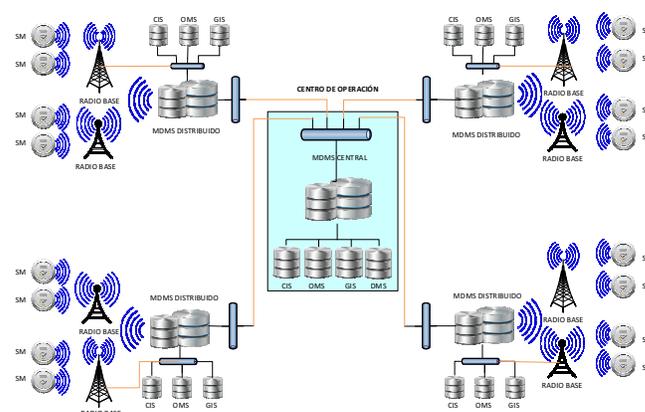


Figura 1. DMS totalmente distribuido.

El diseño se basa en el despliegue de centros de gestión locales, por ejemplo, los datos de lecturas de los medidores inteligentes que son almacenadas y procesadas por sus empresas de distribución. Una vez procesados los datos, son enviados al sistema de gestión central que es el centro nacional de control de energía.

2. Diseño de Red Óptica

El diseño de la red óptica debe ser modelado en base a los tipos de fibras ópticas que se encuentran en los cables OPGW, los mismos que son desplegados por las redes de transmisión eléctrica como cable de guarda, las distancias entre las subestaciones eléctricas dependen de la ubicación geográfica de cada una. Las fibras ópticas más utilizados, son tipo G.652, G.652b y G.655. El cable óptico implementado es tipo ADSS y el cable de guarda es de tipo OPWG[10].

Los fenómenos físicos de degradación de las señales ópticas a tomar en cuenta en el diseño de la red óptica son, dispersión, atenuación, efectos Kerr y efectos Scattering. Los parámetros que deben cumplir la red de transporte óptico están sujetos al estándar ITU-T G.959.1 para aplicaciones multicanal de corta distancia con señal NRZ 10G para fibras tipo G.652 y G.655.

ITU-T G.959.1 establece que en la práctica a 1550 nm vanos de 40 km presentan una atenuación de 11 dB, vanos de 80 km presentan una atenuación de 22 dB. A 1310 nm vanos de 20 km presentan una atenuación de 11 dB y vanos de 40 km presentan una atenuación de 22 dB.

La tabla 1 presenta los parámetros que debe cumplir la

red de transporte óptico, bajo el estándar ITU-T G.959.1 para aplicaciones multicanal de larga distancia hacia fibras tipo G.652 y G.655.

Tabla 1. Parámetros de la red de transporte óptico larga distancia a 10 Gbps [11]

Parámetro	Unidad	Valores
Información General		
Máximo número de canales	--	16
Velocidad binaria codificación de línea	--	NRZ 10G
Máxima tasa de errores	--	10^{-12}
Tipo de fibra	--	G.652 – G.655
Interfaz en el Punto MPI-SM		
Máxima potencia media de salida	dBm	+5
Mínima potencia media de salida	dBm	0
Máxima potencia media total de salida	dBm	+17
Frecuencia central	THz	192,1 + 0,2 m m = 0 a 15
Separación de canales	GHz	200
Trayecto Óptico del Punto MPI-SM al MPI-RM		
Atenuación máxima	dB	22
Atenuación mínima	dB	11
Máxima dispersión cromática	ps/nm	1600 G.652 840 G.655
Interfaz en el Punto MPI-RM		
Máxima potencia media de entrada	dBm	-6
Mínima potencia media de entrada	dBm	-22
Máxima potencia media de total	dBm	+6

La tabla 2 presenta los parámetros que debe cumplir la red de transporte óptico bajo el estándar ITU-T G.959.1 para aplicaciones multicanal de corta distancia hacia fibras tipo G.652 y G.655.

Tabla 2. Parámetros de la red de transporte óptico corta distancia a 10 Gbps. [11]

Parámetro	Unidad	Valores
Información General		
Máximo número de canales	--	16
Velocidad binaria codificación de línea	--	NRZ 10G
Máxima tasa de errores bits	--	10^{-12}
Tipo de fibra	--	G.652 – G.655

Interfaz en el Punto MPI-SM		
Máxima potencia media de salida	dBm	+3
Mínima potencia media de salida	dBm	0
Máxima potencia media total de salida	dBm	+15
Frecuencia central	THz	192,1 + 0,2 m m = 0 a 15
Separación de canales	GHz	200
Trayecto Óptico del Punto MPI-SM al MPI-RM		
Atenuación máxima	dB	11
Atenuación mínima	dB	0
Máxima dispersión cromática	ps/nm	800 G.652 420 G.655
Interfaz en el Punto MPI-RM		
Máxima potencia media de entrada	dBm	+3
Mínima potencia media de entrada	dBm	-11
Máxima potencia media de total	dBm	+15

La ecuación 1 permite calcular el presupuesto de potencias.

$$P_T - \alpha_c \times N - \alpha \times D - \alpha_e \times N_e - M_c - M_e \geq P_R \quad (1)$$

La ecuación 2 permite realizar el cálculo del ancho de banda tomando en cuenta la distancia, coeficiente de dispersión y ancho espectral del láser.

$$AB = \frac{0.5}{D \times W_c \times \Delta\lambda} \quad (2)$$

La ecuación 3 permite determinar la capacidad del canal utilizando el teorema de Nyquist para un canal ideal.

$$C = 2 \times AB \times \log_2 n \quad (3)$$

Donde:

N_e : Número de empalmes

AB : Ancho de Banda [Hz]

C : Capacidad del canal [Mbps]

α_c : Atenuación Conectores [dB]

n : Número de niveles de la señal

α_e : Atenuación de empalmes [dB]

D : Longitud de la fibra óptica [km]

P_T : Potencia de Transmisión [dBm]

- $\Delta\lambda$: Ancho espectral del láser 1 a 5 [nm]
- P_R : Potencia de recepción Mínima [dBm]
- M_c : Margen de seguridad de la fibra óptica [dB]
- α : Atenuación de longitud de fibra óptica [dB/km]
- M_e : Margen de interfaz óptico de transmisión [dB]
- N : Número de conectores del enlace
- W_C : Coeficiente dispersión cromática [ps/km-nm]

El problema a resolver es la comunicación entre todos los actores del sector eléctrico desplegados en una región y el centro nacional de control de energía. La figura 2 muestra en cuadrados la ubicación de cada una de las subestaciones eléctricas o las centrales de generación. El centro de control es representado por una estrella inscrita en un cuadrado.



Figura 2. Sector eléctrico.

El algoritmo 1 comprende la ejecución de los siguientes pasos: Paso 1: Adquirir datos desde un sistema de información geográfica GIS. Paso 2: Calcular distancias entre subestaciones. Paso 3: Generar el árbol de mínima expansión utilizando el algoritmo Dijkstra con la ubicación de las subestaciones y el centro nacional de control de energía. Paso 4: Retornar al paso 3.

Algoritmo 1. Despliegue óptimo de redes óptimas

- 1: Paso 1: Insertar:
- 2: n número de subestaciones
- 3: d_m máxima distancia entre subestaciones
- 4: G_{cc} ubicación georreferenciada centros de control
- 5: w máximo número de saltos
- 6: m máximo número de nodos en clúster
- 7: N_{hop} matriz de coordenadas(X_s, Y_s)
- 8: Paso 2: *forall* $i = 1 : n$
- 9: *Calcular* $dist_{i,j}$ usando n
- 10: *endforall*
- 11: Paso 3: *while* $w \leq m$ && $N_{hop} \leq w$ *do*
- 12: *Delaunay*(X_s, Y_s)
- 13: *forall* $i = 1 : n$
- 14: [*costo, enlace*] = *dijkstra*($G_{cc}, X_s, Y_s, i, n+1$)
- 15: *If* $costo < d_m$ && $enlace > 2$
- 16: *Nodo* \in *red*
- 17: *endif*
- 18: *endforall*
- 19: *endwhile*
- 20: Paso 4: *retornar al paso 3*

La formación de la red de *backbone* de fibra óptica se realiza calculando las distancias entre todos los actores de la red de energía eléctrica. La triangulación *Delaunay-Voronoi* crea un grafo con todos los nodos de la red permitiendo al algoritmo de *Dijkstra* encontrar las rutas con menores distancias y costos de los enlaces.

La figura 3 presenta el despliegue de la red de fibra óptica sobre torres de transmisión eléctrica con sus respectivos nodos, distancias y los tipos de fibras ópticas implementadas.

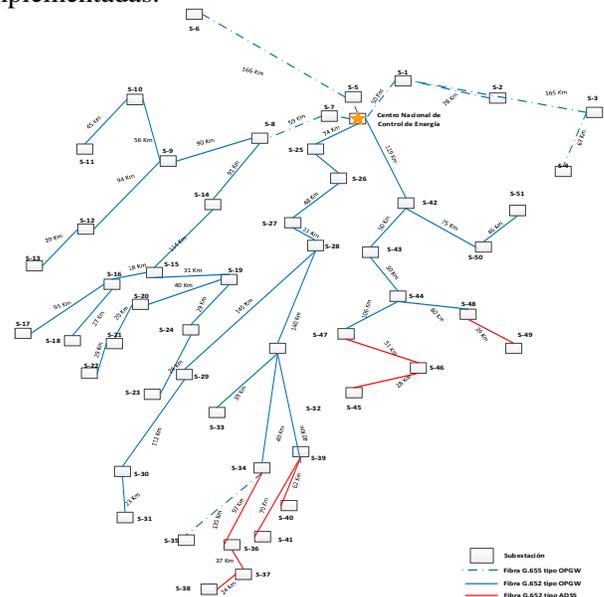


Figura 3. Backbone de fibra óptica.

3. Simulación

El presente diseño es analizado utilizando el software de simulación de redes ópticas *OptSim* versión 2015. Se usa modulación externa por lo tanto los dispositivos que intervienen en la transmisión son: generador de datos, driver NRZ, laser y modulador.

El canal óptico está constituido por: fibra óptica, amplificador óptico y compensador de dispersión.

El receptor está constituido por un filtro óptico, transductor óptico-eléctrico y un filtro eléctrico. A la salida se ubican los dispositivos de medición y análisis como el estimador de ruido, osciloscopio eléctrico y analizador de espectro. La simulación ha sido realizada bajo WDM estableciendo cinco frecuencias en la banda de 193.3 THz y separadas 0.05 THz una de otra. La codificación de los pulsos son NRZ (Non Return to Zero), con modulación externa tipo OOK (On-Off Keying), potencia máxima de salida es de 5 dBm, máxima dispersión cromática 1600 [ps/nm] para fibra G652 y la potencia mínima en el canal de recepción es de -22dBm. La tasa de errores por sus siglas en inglés BER no debe superar valor de 10E-12, por lo tanto el BER esperado en los diseños de los sistemas de transmisión ópticos debe cumplir con la norma establecida por la ITU-T G.959.1.

Dependiendo de la distancia de los enlaces de fibra óptica se debe regular la potencia de salida del canal, permitiendo una potencia de recepción adecuada.

La figura 4 presenta el diseño de la red óptica propuesta, vista desde la capa física en la cual consta del equipo de transmisión, el mismo que envía la señal óptica modulada y a una potencia establecida, permitiendo que la recepción de la señal sea superior a la tasa de señal ruido necesaria para recuperar la información sin errores.

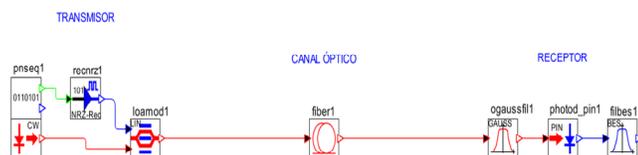


Figura 4. Red óptica propuesta.

En la tabla 3 se presenta la potencia de salida y la sensibilidad del receptor, con estos parámetros se determinan las máximas distancias que se puede transmitir información con comunicaciones ópticas sin amplificación, los parámetros que son tomados en cuenta son establecidos en la norma ITU-T G.959.1.

Tabla 3. Distancia de transmisión máxima sin amplificación

Descripción	Ecuación	Resultado
Corta distancia	$0dBm - 0.275dBm * D \geq 11dBm$	40 km
Corta distancia	$3dBm - 0.275dBm * D \geq 11dBm$	90 km
Larga distancia	$0dBm - 0.275dBm * D \geq 22dBm$	80 km
Larga distancia	$5dBm - 0.275dBm * D \geq 22dBm$	98 km

La tabla 4 presenta los resultados del cálculo del ancho de banda en las comunicaciones por fibra óptica en corta y larga distancia.

Tabla 4. Ancho de banda en MHz

Descripción	Ecuación	Resultado
Corta distancia	$AB = \frac{0.5}{40 * 17 * 1}$	735 MHz
Larga distancia	$AB = \frac{0.5}{98 * 17 * 1}$	300 MHz

La tabla 5 presenta los resultados del cálculo de la capacidad del canal tomando en cuenta la codificación de la señal NRZ.

Tabla 5. Capacidad del canal en Mbps

Descripción	Ecuación	Resultado
Corta distancia	$C = 2 * 735 * \log_2 2$	1470 Mbps
Larga distancia	$C = 2 * 300 * \log_2 2$	600 Mbps

Se deben tomar en cuenta los parámetros de ganancia y compensación, los mismos son regulados de acuerdo a las distancias de transmisión. Estos dos parámetros influyen directamente en la relación de la señal respecto al ruido.

La tabla 6 presenta los resultados de la simulación tomando como valor típico de 17 [ps/km/nm] a la dispersión. La compensación es realizada tomando en cuenta la distancia del canal óptico. La máxima compensación para la fibra G.652 es de 1600 [ps/nm] establecida en la norma ITU-T G.959.1.

La tabla 7 presenta los resultados de la simulación tomando en cuenta la distancia, potencia de salida y potencia de recepción del canal. Los valores obtenidos cumplen con las regulaciones establecidas en la norma

ITU-T G.959.1, por lo tanto, las comunicaciones son seguras y fiables.

Tabla 6. Compensación de la señal óptica

Distancia [km]	Dispersión ps/km/nm	Ganancia [dB]	Compensación [ps/nm]
100	17	0	-710
200	17	9	-1250

Tabla 7. Tasa de bits erróneos

Distancia [km]	Potencia transmisión [dbm]	Potencia recepción [dbm]	Tasa de bits erróneos
100	1.123	-12.069	$0.30342 \cdot 10^{-12}$
200	2.123	-13.018	$0.11255 \cdot 10^{-12}$

La figura 5 presenta el diagrama del ojo en el receptor a 200[km] de distancia de la fuente, siendo la distancia más larga que se obtuvo mediante el algoritmo de optimización.

Es posible observar una mayor varianza en los valores de “unos” en comparación con los “ceros” debido a las no linealidades.

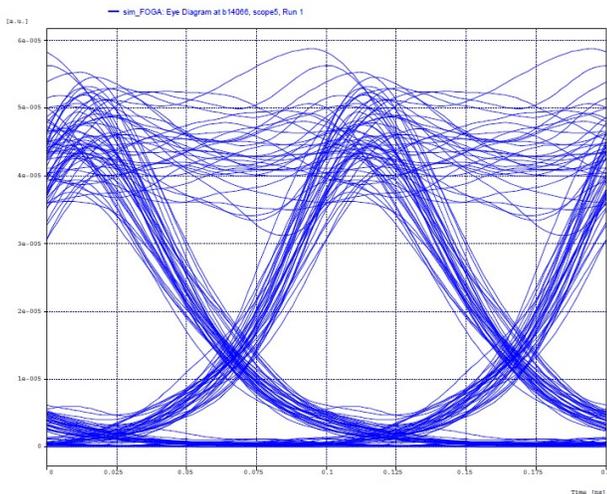


Figura 5. Diagrama del ojo a 200[km] de la fuente.

La figura 6 presenta la potencia del espectro óptico en las diferentes frecuencias de transmisión que van desde 193.2 THz hasta la 193.45 THz con anchos de banda de 5 MHz por canal.

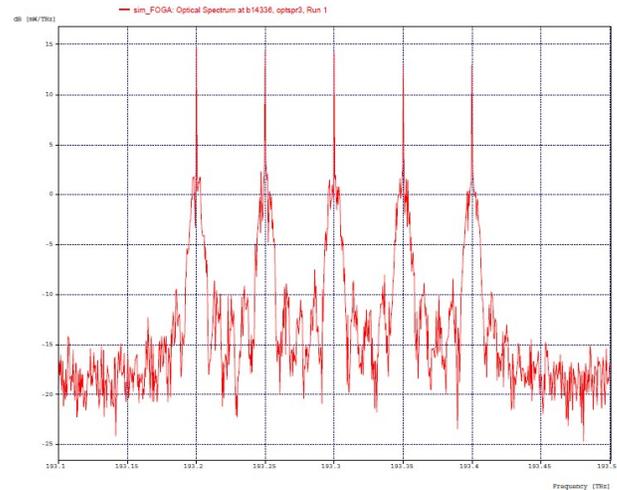


Figura 6. Espectro óptico.

4. Conclusiones

El algoritmo presentado optimiza la infraestructura de comunicación entre todas las subestaciones, centrales de generación y sistemas de gestión de energía dando respuesta a las nuevas necesidades determinadas por las redes eléctricas inteligentes.

Es necesario modificar la compensación de dispersión tomando en cuenta la distancia del canal óptico, ya que afecta de forma directa a la señal en recepción.

La máxima distancia en transmisión depende de la potencia a la salida en el transmisor, el coeficiente de atenuación, la dispersión cromática y la sensibilidad del receptor, por lo tanto, es necesario modificar la ganancia de los amplificadores ópticos y regular la compensación a medida que la distancia del canal óptico aumenta, permitiendo la recepción de datos fiables.

El ancho de banda y la capacidad del canal disponible en un enlace dependen de la distancia y el tipo de fibra óptica, a menor distancia es mayor el ancho de banda, mientras que a mayor distancia el ancho de banda se reduce y por ende la capacidad del canal.

5. Referencias

- [1] M. G. R. Maldonado, “Wireless Sensor Network for Smart Home Services Using Optimal Communications,” 2017 Int. Conf. Inf. Syst. Comput. Sci., pp. 27–32, 2017.
- [2] M. Ruiz, P. Masache, and E. Inga, “Optimal Communications for Smart Measurement of Electric Energy Reusing Cellular Networks,” in 2018 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS), 2018, pp. 198–204.
- [3] M. G. Ruiz Maldonado and E. Inga, “Asignación óptima de recursos de comunicaciones para sistemas de gestión de energía,” Enfoque UTE, vol. 10, no. 1, pp. 141–152, 2019.

- [4] M. Ruiz, P. Masache, and J. Dominguez, "High Availability Network for Critical Communications on Smart Grids," no. Ssn, pp. 1–5, 2018.
- [5] M. Budka, K., Deshpande, J. and Thottan, Communication Networks for Smart Grids: Making Smart Grid Real. London, 2014.
- [6] D. E. Nordgard, K. Sand, R. H. Kyte, E. Bjerkan, T. B. Solvang, and K. Samdal, "Solutions from a national Smart grids demonstration site exploring a fiber-optic communication infrastructure," IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet., pp. 1–5, 2012.
- [7] A. Ghassemi, T. A. Gulliver, J. M. Cioff, and G. K. Karagiannidis, "Radio over Fiber Based Networks for the Smart Grid," 2014, pp. 2646–2652.
- [8] G. V. Arévalo, R. C. Hincapié, and J. E. Sierra, "WDM-PON Design Model Based on the Minimum Spanning Tree Search over Delaunay Triangulations," Proc. - 2015 Asia-Pacific Conf. Comput. Syst. Eng. APCASE 2015, pp. 68–71, 2015.
- [9] G. V. Arévalo, J. E. Sierra, R. C. Hincapié, and R. Gaudino, "A novel algorithm for PON optimal deployment over real city maps and large number of users," pp. 07 (4 .)-07 (4 .), 2017.
- [10] M. Kuch and C. Rehtanz, "Transformation of Electric Power System Models into Information and Communication System Models," 2017, pp. 1–6.
- [11] ITU-T Recommendation G.959.1, "Optical Transport Network Physical Layer Interfaces," pp. 1–74, 2012.