



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica
Escuela Profesional de Ingeniería de Telecomunicaciones

**Diseño de una red LTE para mejorar la disponibilidad
de la flota pesada en un ámbito minero**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de
Telecomunicaciones

AUTOR

José Andrés LEANDRO FRETTEL

ASESOR

Mg. Jesús Otto VILLANUEVA NAPURÍ

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Leandro, J. (2024). *Diseño de una red LTE para mejorar la disponibilidad de la flota pesada en un ámbito minero*. [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería de Telecomunicaciones]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	José Andrés Leandro Fretel
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72050740
URL de ORCID	No Aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Jesús Otto Villanueva Napurí
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	25726864
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-3380-4991
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Jean Carlos Malca Fernandez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	45535181
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Arlich Joel Portillo Allende
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10125495
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Roberto Florentino Unsihuay Tovar
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	19944586
Datos de investigación	
Línea de investigación	No Aplica
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	No Aplica

Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Apurímac Provincia: Cotabambas Distrito: Challhuahuacho Latitud: -14.089130106698509 Longitud: -72.33562079067644
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Abril 2021 – Junio 2022
URL de disciplinas OCDE	Telecomunicaciones https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.05 Sistemas de automatización, Sistemas de Control https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.03 Ingeniería de sistemas y comunicaciones https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.04



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



ACTA DE SUSTENTACIÓN TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

ACTA N°040/FIEE-CTGT/2024

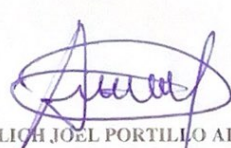
Los suscritos Miembros del Jurado, docentes permanentes de las Escuelas Profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha 03 de junio del 2024, como presidente de Jurado el **MG. JEAN CARLOS MALCA FERNANDEZ**, integrado por el Miembro de Jurado el **MG. ARLICH JOEL PORTILLO ALLENDE**, el Miembro de Jurado **MG. ROBERTO FLORENTINO UNSIHUAY TOVAR** y Miembro Asesor el **MG. JESÚS OTTO VILLANUEVA NAPURÍ**.

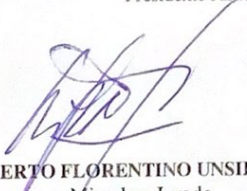
Después de escuchar la Sustentación Presencial del Trabajo de Suficiencia Profesional del Bachiller **JOSÉ ANDRÉS LEANDRO FRETTEL** con código N° 15190278 que para optar el Título Profesional de Ingeniero de Telecomunicaciones sustentó el Trabajo de Suficiencia Profesional titulado **DISEÑO DE UNA RED LTE PARA MEJORAR LA DISPONIBILIDAD DE LA FLOTA PESADA EN UN ÁMBITO MINERO**.

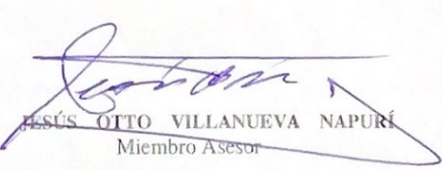
El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió otorgarle el calificativo de *16 (Dieciséis)*

Ciudad Universitaria, 03 de junio del 2024


MG. JEAN CARLOS MALCA FERNANDEZ
Presidente Jurado


MG. ARLICH JOEL PORTILLO ALLENDE
Miembro Jurado


MG. ROBERTO FLORENTINO UNSIHUAY TOVAR
Miembro Jurado


MG. JESÚS OTTO VILLANUEVA NAPURÍ
Miembro Asesor



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

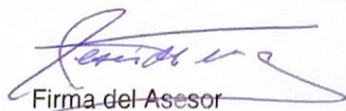
Universidad del Perú. Decana de América

Vicerrectorado de Investigación y Posgrado



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo **MG. JESÚS OTTO VILLANUEVA NAPURÍ** mi condición de asesor acreditado con el Acta de Sustentación de Trabajo de Suficiencia Profesional: **DISEÑO DE UNA RED LTE PARA MEJORAR LA DISPONIBILIDAD DE LA FLOTA PESADA EN UN ÁMBITO MINERO** presentado por el bachiller **JOSÉ ANDRÉS LEANDRO FRETTEL**, para optar al título profesional de Ingeniero de Telecomunicaciones. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 8% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**. Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado correspondiente.


Firma del Asesor

DNI: **25726864**

Nombres y apellidos del asesor:

Mg. Jesús Otto Villanueva Napurí



RESUMEN

El presente trabajo trata sobre la implementación de una red para mejorar la disponibilidad de la flota pesada y el monitoreo, en tiempo real, de las unidades de la empresa minera Las Bambas. Con la integración de las nuevas configuraciones para la migración de equipos y usando las herramientas de monitoreo para observar la operatividad de los equipos de red en todas las unidades de la flota. A su vez, se incluye el mantenimiento rutinario de los equipos y nodos de estándar “Long Term Evolution”, para optimizar las comunicaciones inalámbricas de transmisión de datos.

La implementación de la red generó una disminución considerable de incidencias en la flota, aumentando su disponibilidad.

Se realizó el análisis comparativo de los desempeños de la nueva red LTE y la anterior red MESH y se observó un mejor desempeño de la red nueva, y la reducción de procedimientos peligrosos para el personal de la mina.

Palabras clave: LTE, throughput, eNB, SIM card, troubleshooting.

ABSTRACT

The present work deals with the implementation of a network to improve the monitoring, in real time, of the fleet units of the Las Bambas mining company. With the integration of new configurations for equipment migration and using monitoring tools to observe the operation of network equipment in all fleet units. In turn, routine maintenance of “Long Term Evolution” standard equipment and nodes is included to optimize wireless communications for data transmission.

The implementation of the network and the monitoring tools generated a considerable decrease in incidents in the fleet, increasing its availability.

A comparative analysis of the performance of the new LTE network and the previous MESH network was carried out and a better performance of the new network was observed, and the reduction of dangerous procedures for mine personnel.

Keywords: LTE, throughput, eNB, SIM card, troubleshooting.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	i i
ABSTRACT	iii
TABLA DE CONTENIDO	iv
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABLAS	viii
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO II: INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD	2
2.1 Institución – Actividad que desarrolla	2
2.2 Periodo de duración de la actividad.	2
2.3 Finalidad y objetivos de la entidad	2
2.4 Razón social	3
2.5 Dirección postal	3
2.6 Correo electrónico del profesional a cargo	3
2.7 Ubicación	3
CAPITULO III: DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	4
3.1 Organización de la actividad	4
3.2 Finalidad y objetivos de la Actividad	4
3.2.1 Finalidad	4
3.2.2 Objetivos	4
3.2.2.1 Objetivo General	4
3.2.2.2 Objetivos Específicos	5
3.3 Problemática	5
3.3.1 Problema General	5
3.3.2 Problemas Específicos	5
3.3.3 Justificación e importancia de la investigación	6
3.4 Metodología	7

	v
3.4.1 Bases teóricas	7
3.4.2 Marco conceptual	10
3.4.3 Acrónimos	15
3.4.4 Glosario de términos	17
3.4.5 Descripción de la implementación	19
3.5 Procedimiento	21
3.5.1 Decomisionamiento de la red Mesh	21
3.5.2 Transición a la nueva red LTE	24
3.5.3 Implementación de la red LTE	24
3.6 Resultados	45
CAPITULO IV: CONCLUSIONES	51
4.1 Justificación	51
4.2 Metodología aplicada	51
4.2.1 Evaluación económica	51
4.2.1 Evaluación técnica	54
4.3 Conclusiones	59
CAPITULO V: RECOMENDACIONES	60
CAPITULO VI: BIBLIOGRAFIA	61
CAPITULO VII: ANEXOS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Red LTE.	10
Figura 2: Topología MESH.	11
Figura 3: Ubicación de los ST's y Puntos Fijos.	12
Figura 4: Throughput actual en la mina Las Bambas.	14
Figura 5: Capas de red.	22
Figura 6: Diagrama de red inalámbrica.	22
Figura 7: Arquitectura de la red de transmisión.	25
Figura 8: VLAN por Interface.	26
Figura 9: Sincronización por GPS.	28
Figura 10: Trama bytes.	28
Figura 11: Asignación IP/VLAN.	30
Figura 12: Topología Fast IP Rerouting LTE.	31
Figura 13: Diagrama de red LTE de Las Bambas.	32
Figura 14: Ubicación de los Sites LTE de Las Bambas.	33
Figura 15: Modelo de referencia.	34
Figura 16: Modelo de referencia para redes industriales ISA95.	36
Figura 17: Asignación de puertos en ASR1001-X.	37
Figura 18: Diagrama topología red LTE.	39
Figura 19: Conexiones entre Switches Core y Firewalls.	40
Figura 20: Conexiones entre Switches Core y ASR1K.	42
Figura 21: Diagrama topología de red core LTE.	43
Figura 22: Porcentaje de incidencias por tecnología.	46
Figura 23: Incidencias por nivel de criticidad.	46
Figura 24: Criticidad de incidencias según tipo de equipo.	47
Figura 25: Evolución de incidencias en la flota.	47
Figura 26: Evolución de incidencias en la flota por categoría.	48
Figura 27: Ranking de soluciones aplicados.	49

Figura 28: Infraestructura instalada RAN.	54
Figura 29: Diagrama de hardware RAN- RU.	55
Figura 30: Infraestructura instalada software.	56
Figura 31: Equipos instalados en las unidades de flota.	57
Figura 32: Numero de tickets atendidos por mes.	58
Figura 33: Disponibilidad de eNodeB por mes.	58
Figura 34: Comunicación ASR1K y red Corporate e Industrial.	65
Figura 35: Comprobación de operatividad de equipo en flota.	68
Figura 36: Equipos asignados a la herramienta de monitoreo NagiosXI.	69
Figura 37: Configuración del VPN.	70
Figura 38: Topología RAN y CORE.	71
Figura 39: Migración de equipos a la nueva red LTE.	72

LISTA DE TABLAS

TABLA 1: Disposición de actividades.	20
TABLA 2: Ubicación y coordenadas de los solar trailers.	23
TABLA 3: Ubicación y coordenadas de los puntos fijos.	23
TABLA 4: Calidad de Servicio y Perdida de paquetes.	26
TABLA 5: DSCP y QCI.	27
TABLA 6: Costos para cada cabecera adicional LTE.	29
TABLA 7: SLA.	29
TABLA 8: Nombres de los Hosts y Puertos designados integración SW Core y Firewall.	40
TABLA 9: Nombres de los Hosts y Puertos designados integración SW Core y ASR1K.	41
TABLA 10: Redes disponibles y segmentación de direcciones.	42
TABLA 11: Nombres de los Hosts , IP's y Puertos designados integración SW Core y Sites	44
TABLA 12: Nombres de los Hosts , IP's y Puertos designados comunicación entre SW Core.	44
TABLA 13: Nombres de los Hosts , IP's y Puertos designados integración SW Core y Routers ASR1K.	45
TABLA 14: KPI's	50
TABLA 15: Presupuesto del proyecto.	52
TABLA 16: Presupuesto del proyecto anual.	53

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

Durante los tres primeros quinquenios de este siglo, el Perú ha experimentado un notable crecimiento económico, impulsado, en gran medida, por el precio de los metales, que produjo grandes inversiones en la mejora de sus procesos de producción (OSINERGMIN, 2017). En ese ámbito, algunas empresas extractoras mejoraron sus sistemas de redes e interconexión y consecuentemente la gestión de su flota, este es el caso de la minera Las Bambas, que se vio forzada a actualizar sus sistemas de producción. Anteriormente utilizaba una red MESH que usa la tecnología “solar trailers” para dar cobertura a su flota, debiendo mover los equipos cuando había eventos de voladuras por las zonas, por tal motivo, se decidió actualizar a un sistema de red LTE (Las Bambas, 2019).

En el presente trabajo se ve el proceso de implementación de los nuevos equipos de red (routers, switches y servidores) y la migración de equipos antiguos a la nueva red LTE, se presentan la justificación de la implementación de la nueva arquitectura de red LTE, la evaluación técnica y económica del proyecto y las conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO II: INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD

2.1. Institución – Actividad que desarrolla.

Comtecsa del Perú S.A. – Las Bambas – Operador NOC de la red de Las Bambas – Departamento de Informática.

2.2. Periodo de duración de la actividad.

Las actividades del presente proyecto se realizaron desde marzo del 2021 hasta enero 2022.

2.3. Finalidad y objetivos de la entidad.

Comtecsa del Perú S.A. proporciona el servicio de configuración y monitoreo de la red LTE para la minera Las Bambas. El objetivo de la entidad es ser una compañía que entiende adecuadamente las necesidades de nuestros clientes, sus motivaciones, preocupaciones y objetivos, con el fin de desarrollar un tipo de solución adecuado para cada uno de ellos, entregando una atención personalizada y alta calidad de servicio promoviendo permanentemente el mejoramiento de nuestros procesos.

2.4. Razón social.

20546803849 - COMTECSA DEL PERU S.A.C.

2.5. Dirección postal.

Dirección Legal: Av. Javier Prado Oeste 757, Oficina 1005

Distrito: Magdalena del Mar

Departamento: Lima – Perú

2.6. Correo electrónico del profesional a cargo.

El Ing. Jorge Alonso Cárdenas Acosta es el profesional encargado del Departamento de Informática y su correo electrónico es:

jorge.cardenas@comtecsa.pe

2.7. Ubicación.

Minera Las Bambas – Cotabambas – Apurímac (+ 4000 m.s.n.m).

CAPITULO III: DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

3.1 Organización de la actividad.

Las actividades para mejorar el monitoreo de la flota en tiempo real se organizaron de la siguiente manera:

- Recolección de datos y estadísticas de la antigua red.
- Identificación de requerimientos.
- Configuración de los equipos.
- Descripción del servicio de monitoreo a los equipos de red.
- Análisis de las configuraciones y equipos de la nueva red LTE.

3.2 Finalidad y objetivos de la Actividad

3.2.1 *Finalidad*

El presente trabajo tiene por finalidad mostrar los beneficios de la red LTE, el monitoreo de equipos de red y la configuración de equipos para la minera Las Bambas.

3.2.2 *Objetivos*

3.2.2.1 *Objetivo general.* Mejorar la disponibilidad de la red inalámbrica de la flota pesada, carguío y acarreo, mediante una red que usa el estándar LTE, de banda ancha de alta velocidad.

3.2.2.2 *Objetivos específicos.*

- Garantizar el buen funcionamiento de los equipos de la red inalámbrica implementando procedimientos de configuración, operación y mantenimiento.
- Reducir los errores de configuración de los equipos de red mediante pruebas de conectividad, operatividad y simulaciones.
- Mejorar la detección de problemas operativos de equipos de red implementando un sistema de monitoreo en tiempo real.

3.3 Problemática

Las incidencias de red, debido a la falta de monitoreo en la flota minera, reducen la disponibilidad de la flota de carguío y acarreo, perjudicando la producción.

3.3.1 *Problema General*

¿ Cómo mejorar la disponibilidad de la red inalámbrica de la flota pesada, acarreo y carguío?

3.3.2 *Problemas Específicos*

- ¿Como garantizar el buen funcionamiento de los equipos de la red inalámbrica?
- ¿Cómo reducir los errores de configuración de los equipos de red?
- ¿Cómo mejorar la detección de problemas operativos de equipos de la red?

3.3.3 Justificación e importancia de la investigación

El presente trabajo se justifica porque permite mejorar: los niveles de disponibilidad en los equipos de red, mejorando la producción, el servicio de redes e interconexión de empresas extractoras, la producción por el monitoreo adecuado de la flota, generando una mejor calidad de servicio y cobertura en la zona donde se desarrolla la extracción. Asimismo, la investigación ha permitido obtener información actualizada de los sistemas de redes que se usan en el mundo, a las que las empresas extractoras que operan en territorio peruano deben prestar atención.

Justificación social: Se reemplazó la red con el objetivo de eliminar el riesgo de exposición del personal dentro del tajo con la antigua red MESH, como por ejemplo mantenimiento de los solar trailers o también reubicarlos diariamente por voladuras

Justificación tecnológica: El presente trabajo se justifica porque permite mejorar la funcionalidad de monitoreo y configuración de equipos de red, reduciendo las incidencias y errores mediante determinadas configuraciones.

Justificación económica: El presente trabajo se justifica porque la introducción de infraestructura celular redujo el costo significativamente debido a la propagación disponible y a frecuencias más bajas. Las implementaciones de LTE pueden requerir significativamente menos dispositivos de infraestructura que una implementación típica de Wi-Fi (IGF, 2021).

3.4 Metodología

3.4.1 Bases teóricas

Obiako, Preston, Montero y Zimmer (2020) en su investigación “Ventajas de una red privada LTE”, presentan las ventajas de poseer dicha red en el ámbito minero, comparando una red privada con una pública, desarrollando un enfoque cuantitativo, de tipo proyectivo, no experimental, utilizando una matriz de observación. El estudio arribó a las siguientes conclusiones:

- En los casos donde las redes Wi-Fi Mesh y LMR (Land Mobile Radio) funcionan mal, las redes LTE sirven como un excelente reemplazo, brindando confiabilidad y robustez en operaciones de misión crítica y ofrecen mayor flexibilidad.
- LTE es la columna vertebral de la industria actual, cada vez más centradas en aumentar la transmisión de datos y la automatización, proporciona la velocidad, la conectividad y la confiabilidad necesarias para operaciones de misión crítica (puede colocarse solo “críticas”).
- Las tecnologías que compiten con LTE son LMR y Wi-Fi Mesh. LMR tiene una funcionalidad limitada y solo proporciona funciones simples como PTT (Push to Talk). Wi-Fi Mesh es ideal para pequeñas empresas, pero no es escalable de manera efectiva para operaciones más grandes.

Global Mining Guidelines Group (GMG) (2019) en el estudio “Directrices en infraestructura de comunicaciones para la minería subterránea” de proporciona una visión de alto nivel de los procesos que necesita el personal de la mina para cumplir con los requisitos de planificación y diseño al crear o reemplazar la infraestructura de comunicaciones de la mina, desarrollada según los parámetros de enfoque cuantitativo, de tipo sustantivo, no experimental, utilizando una matriz de observación. El estudio concluye que:

- Un sistema de seguimiento de activos debe integrarse con los procesos mineros existentes para mejorar su valor, y asegurar la productividad; siendo importante reconocer la complejidad de implementar un sistema efectivo. En términos sencillos, un sistema de seguimiento por sí solo puede obtener un valor limitado; pero cuando se utiliza para respaldar las actividades de la mina, se pueden generar indicadores de mejora (OEE, TEEP, OTD) y optimizar el rendimiento.
- Las tecnologías inalámbricas brindan una capacidad cada vez mayor en las redes de operaciones mineras, siendo su adopción rápida y creciente. La movilidad de esta tecnología la hace muy atractiva. La conexión de equipos de producción móviles, como equipos de perforación, a una red inalámbrica se ha convertido en la opción predeterminada. Asimismo, es muy común el seguimiento del personal y la comunicación de voz inalámbrica.

Armas (2011) en el “Diseño e implementación de una tecnología de acceso a internet para vehículos en movimiento en una minera” presenta el caso del acceso a Internet para la flota pesada en la empresa minera Sociedad Minera Cerro Verde S.A. que mejoró la infraestructura de la red de comunicaciones de la minera: El estudio fue desarrollado según los parámetros de enfoque cuantitativo, de tipo proyectivo, no experimental, y el trabajo de campo fue realizado con un estudio de la plataforma de enlaces existentes, las tecnologías empleadas y los requerimientos de los usuarios finales. El trabajo de campo consistió en:

- El uso del estándar 802.b/g en el diseño, que permitió que el sistema de comunicaciones tuviera un porcentaje de escalabilidad del 15% en relación al número de usuarios atendidos por estación y simultáneamente.
- El dimensionamiento de las redes de telecomunicaciones, que se puede realizar con diferentes criterios, siendo recomendable considerar prioritariamente el criterio de cobertura, al inicio, porque el criterio de capacidad no es crítico debido a la baja penetración de usuarios en los primeros años de operación.

Las empresas de telecomunicaciones, empresas mineras, municipios, etc., trabajan bajo el criterio de la demanda, es decir, a medida que aumenta el número de usuarios, la empresa aumenta el número de recursos.

- El concepto de Internet Móvil representa mucho más que la movilidad aplicada a Internet. A diferencia de internet fijo, siempre está al alcance del usuario, esto quiere decir que además de añadir la dimensión de la movilidad a los servicios de internet, proporciona servicios innovadores que se pueden adaptar a la ubicación, preferencias, y necesidades del usuario móvil.

Tchao (2018) en el estudio “Evaluación del rendimiento de una red 4G LTE” presenta las evaluaciones de rendimiento de los parámetros de red clave seleccionados de una red LTE implementada en la banda de 2600 MHz en Ghana, África. Fue desarrollado según parámetros de enfoque cuantitativo, de tipo proyectivo, experimental. El trabajo fue realizado usando configuraciones MIMO 2X2, 4X4 y 8X8 de las redes implementadas, utilizando una matriz de observación. El estudio arribó a las siguientes conclusiones:

- Las simulaciones mostraron que 8X8 MIMO funciona mejor que 2X2 MIMO y 4X4 MIMO en términos de rendimiento y cobertura.
- Los datos de campo, recopilados en 2X2 MIMO 4G LTE implementado en la banda de 2600 MHz, mostraron un rendimiento promedio máximo medido por sector de 29,9 Mbps y un rendimiento máximo de enlace descendente de 62,318 Mbps para usuarios dentro de un rango de celda de 2,5 km de distancia de la estación base.

3.4.2 Marco conceptual

La tecnología LTE ofrece un soporte para muchas aplicaciones a largas distancias, con algunas ventajas significativas sobre las soluciones basadas en redes Mesh, particularmente en las áreas de mitigación de interferencias y contención. La figura N° 1 resume la comunicación entre la red LTE y redes externas.

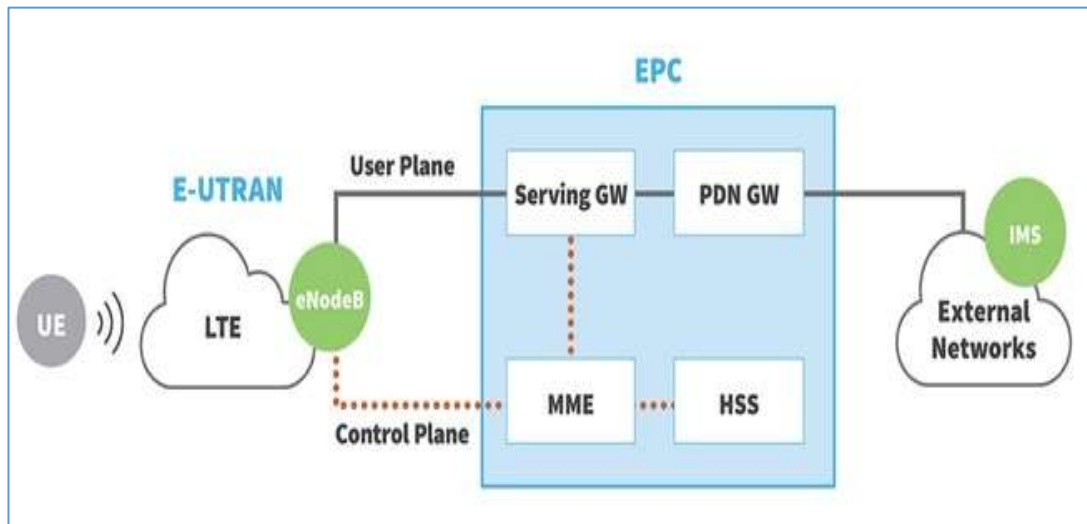


Figura 1: Red LTE. Fuente: Telefónica (2019).

LTE (Long-Term Evolution) es un estándar inalámbrico de cuarta generación (4G) que proporciona mayor capacidad y velocidad de red para teléfonos celulares y otros dispositivos de red en comparación con la tecnología de tercera generación (3G). LTE ofrece velocidades máximas de transferencia de datos más altas que 3G, inicialmente hasta 100 Mbps de descarga y 30 Mbps de carga. Proporciona latencia reducida, capacidad de ancho de banda escalable y compatibilidad con versiones anteriores del Sistema global para comunicaciones móviles (GSM) y la tecnología del Servicio de telecomunicaciones móviles universales (UMTS) existentes (Cisco, 2019).

La figura N° 2 muestra la topología tipo MESH con los dispositivos de red interconectados, permitiendo tener redundancia en la red.

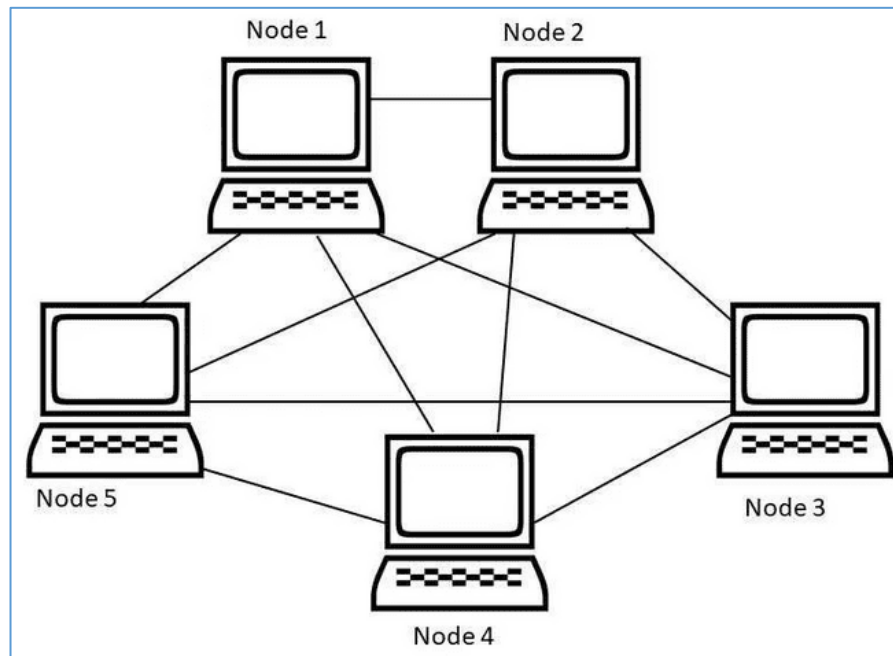


Figura 2: Topología MESH. Fuente: Telefónica (2019).

Una topología MESH es una configuración de red en la que cada computadora y dispositivo de red están interconectados entre sí. Esta configuración de topología permite que la mayoría de las transmisiones se distribuyan incluso si una de las conexiones falla (Hytera, 2021). Es una topología comúnmente utilizada para redes inalámbricas (Agyapong, 2018). En la figura N° 3, se muestra la configuración de “solar trailers” distribuidos en la mina Las Bambas, emulando la topología MESH, para aumentar la cobertura



Figura 3: Ubicación de los ST's y Puntos Fijos. Fuente: Google Earth (2020).

Bandas usuales para redes con tecnología LTE: LTE corresponde a las Releases 8 y 9 (versiones) del 3GPP. Una de las características principales de la tecnología LTE es la flexibilidad del ancho de banda (en MHz) que puede ser utilizado, el cual va desde unos pocos MHz hasta un máximo de 20+20MHz por cada portadora LTE. De esta manera, en LTE los operadores pueden elegir cualquiera de las siguientes combinaciones de espectro:

- 1.4+1.4 MHz
- 3+3 MHz
- 5+5 MHz
- 10+10 MHz
- 15+15 MHz
- 20+20 MHz

Los operadores eligen la opción que mejor se adecue a la cantidad de espectro que poseen. Por ejemplo, en el Perú se tienen despliegues de redes LTE con las siguientes combinaciones: 10+10 MHz, 15+15 MHz y 20+20 MHz.

Al respecto, mientras más espectro se use, los operadores pueden ofrecer mejores velocidades (en Mbps) de acceso a sus clientes. Es preciso indicar que, a la fecha, la tecnología LTE es ofrecida por todos los operadores móviles peruanos que poseen red: América Móvil, Entel Perú S.A. (en adelante, Entel), Telefónica y Viettel Perú S.A.C (en adelante, Viettel).

Throughput asimétrico: Es la entrega de una capacidad de enlace ascendente significativamente menor que la de enlace descendente. La minería y la mayoría de las otras aplicaciones industriales de IoT generalmente requieren mucho más velocidad en el enlace ascendente que el descendente (Nokia, 2019). Esto no solo es cierto para las aplicaciones mineras típicas, como el estado y la gestión de flotas, sino que aumenta en otras aplicaciones como sistemas CCTV y otros dispositivos de monitoreo que requieren casi el 100 % del enlace ascendente de los datos. Diseñar una red que utilice las capas de red correctas en los lugares correctos puede aliviar el problema. Los ejemplos pueden incluir el uso de redes punto a multipunto (PMP) o Wi-Fi para video o incluso monitoreo continuo.

Interconexión de Capa 3 y Capa 2: La tecnología LTE es una solución de Capa 3, mientras que muchas aplicaciones de minería requieren Capa 2. Esto puede solucionarse mediante la utilización de tecnologías de tipo túnel que hacen que estén disponibles las conexiones de Capa 2 sobre LTE (Jang, 2020).

Esto es posible gracias al protocolo de tunelización de capa 2 (L2TP): El protocolo de tunelización de capa 2 (L2TP) es un protocolo para tunelización de tráfico de capa 2 a través de una red de capa 3. Se puede usar L2TP para habilitar la tunelización del protocolo punto a punto (PPP) dentro de la red.

El protocolo Layer 2 Tunneling Protocol (L2TP) es un Tunneling Protocol usado por un Proveedor de servicios de Internet (ISP) para soportar el Redes privadas virtuales (VPN).

Para definir la configuración mínima para L2TP, se incluye las siguientes instrucciones en el (Edit Access) nivel jerárquico en el (Anexo 1).

Gestión de conexiones : La gestión de conexión tradicional en arquitectura Mesh puede ser limitante. En un entorno de producción minera, el equipo debe reconectarse lo más rápido posible cuando la máquina entra y sale de una zona de cobertura. La administración de conexión mejorada puede minimizar este proceso, asegurando que el dispositivo se conecte lo más rápido posible al ingresar a un área de cobertura.

Menor uso de maquinaria y procedimientos: Para tener una disponibilidad en los equipos de red en la red Mesh se usan trailers solares para expandir la cobertura, pero esto genera gastos en mantenimiento y combustible además de tener que desplazarlos todos los días debido a los procedimientos de voladura en la mina. Con la nueva red LTE, se implementó siete nodos estáticos y se decomisaron los trailers solares. En la figura N° 4 Se observa la cobertura que se posee actualmente y las velocidades pico en cada zona.

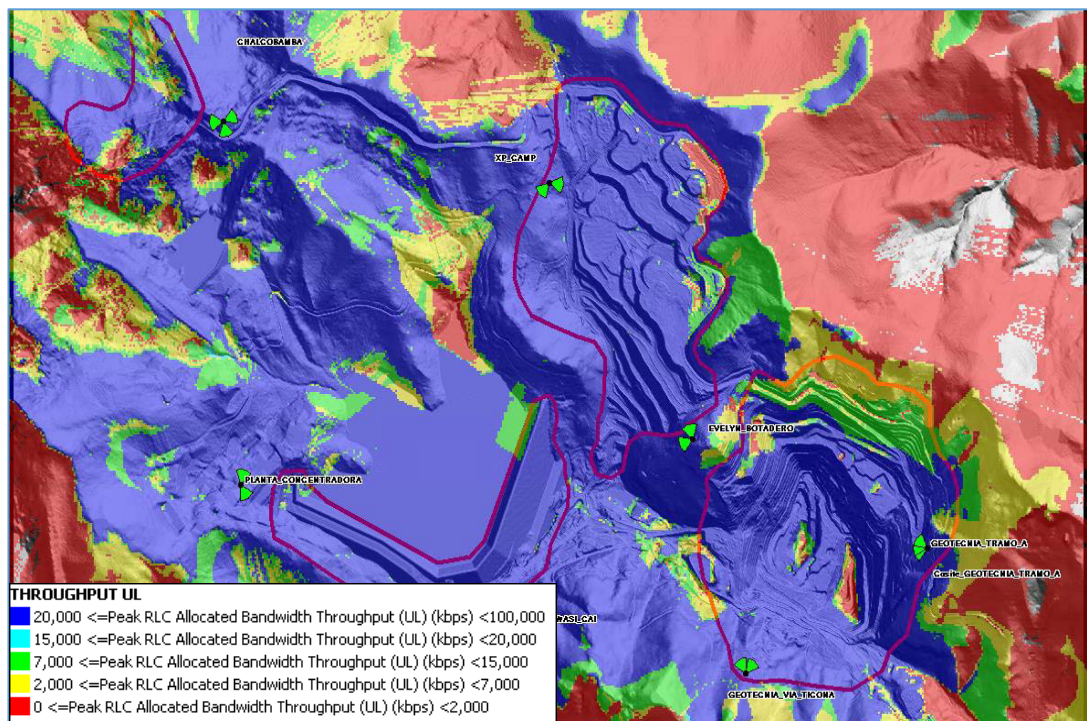


Figura 4: Throughput actual en la mina Las Bambas. Fuente: Comtecsa (2021).

Con la implementación de eNB's alrededor de la mina los equipos de la flota de carguío y acarreo pueden estar disponibles en toda la zona minera y tener un throughput alto y sin interrupción de comunicación.

Protocolos: Se usan los protocolos EIGRP y BGP para controlar el tráfico entre las redes LTE y OT/IT en casos de empresas mineras debido a que reducen los tiempos de reconvergencias, EIGRP es un protocolo intradominio, mientras que BGP es un protocolo interdominio, como protocolo exterior. BGP presenta funcionalidades de control de políticas administrativas de enrutamiento mucho más diversas que cualquier otro protocolo. Se tomo en cuenta el uso de recursos y su escalabilidad, se adoptó EIGRP con el objetivo de reducir los tiempos de reconexión entre equipos y aumentar la disponibilidad de la red.

3.4.3 Acrónimos

- BFD (Protocolo de detección de reenvío bidireccional): Es un mecanismo para la detección rápida de fallas en las rutas de reenvío.
- CCTV (Circuito cerrado de Televisión): Sistema de video vigilancia.
- CSR Connection success rate: Es la tasa de éxito de conexión RRC (Radio Resource Control).
- eNB (evolved Node B): Estación base LTE. Integra todas las funciones de acceso de la red LTE. El eNB realiza la transmisión de los paquetes IP hacia/desde los equipos de usuario junto con los mensajes de señalización necesarios para controlar la operación de la interface de radio. (Artizan Networks, [What is the LTE eNB](#), 2008).
- EPC (Envolved Packet Core): Es la red principal del sistema LTE, que ofrece una visión general de la arquitectura de la red central.
- E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network): Es la red de acceso especificada para LTE, que utiliza la tecnología OFDMA

en la interfaz radio para la comunicación con los equipos de usuario.(3GPP, [Worlds first femtocell standard](#), 2009).

- E-RAB (E-UTRAN Radio Access Bearer): Servicio de transferencia de paquetes.
- FBBA (Flexi Capacity Extension Sub-Module): Modulo de extensión en banda base para FSMF
- FortiClient (Cliente de Fortinet): es una suite de seguridad de Fortinet que permite establecer conexiones remotas por VPN desde un computador.
- FPPD (Flexi Power Distribution Sub-Module): Modulo de distribución de energía para el FSMF.
- FRPB (Flexi RF Module): Modulo de radio remoto para estación base LTE
- FSMF (Flexi Multiradio System Module): Es una estación base modular para su uso en la red de acceso de radio (RAN) de una red móvil.
- FTIF (Flexi Transmission Module): Modulo de Transmisión para FSMF
- KPI (Key Performance Indicator): Son los indicadores o valores cuantitativos que se pueden medir, comparar y monitorear, con el fin de exponer el desempeño de los procesos y trabajar en las estrategias de un servicio.(Rios Jacobo, [Key Performance Indicators \(KPI\)](#) , 2010).
- LMP (Local Management Port): Puerto de gestión local.
- LTE (Long Term Evolution): LTE, por sus siglas en inglés, lo que en español se traduce como Evolución a largo plazo, en telecomunicaciones, es un estándar para comunicaciones inalámbricas de transmisión de datos de alta velocidad para teléfonos móviles y terminales de datos. (T-Mobile, [¿Qué son los datos LTE y qué significan?](#) , 2010).
- MDVR-5208: Equipo que gestiona las cámaras conectadas, tiene internamente un HDD y una memoria SD para almacenamiento de video.
- MME (Mobility Management Entity): Entidad de Gestión de movilidad de la red LTE, es la encargada de gestionar el acceso de los terminales de usuario a través de la red de E-UTRAN. (Sami Tabbane, [Core Network Dimensioning](#), 2016).

- OEE (Overall Equipment Effectiveness): Es un indicador cuyos parámetros miden la eficiencia de la maquinaria y los procesos en la industria con el fin de realizar la mejora continua de estos. (Stel Order, [OEE, TEEP y OOE](#), 2022).
- OTD (Operator Trunk Dialing): Marcación troncal del operador.
- OVP (Over Voltage Protector): Protector de sobretensión.
- QoS (Calidad de servicio): es un mecanismo usado en LTE para asegurar un bearer de tráfico apropiado.
- RFT (Radio Frequency Transceiver): Es un dispositivo electrónico (por lo general) pequeño utilizado para transmitir y / o recibir señales de radio entre dos dispositivos. (Bo Zhao, Design of Radio-Frequency Transceivers for Wireless Sensor Networks, 2010) .
- RRC (Radio Resource Control): Es un protocolo de capa 3 utilizado entre el UE y la estación base para su comunicación.
- RRU: Unidad de radio remota.
- SAE-GW (Serving Gateway): Servicio de puerta de enlace, es el responsable de la organización de tráfico de paquetes en enlace descendente, ya que por su parte eNodeB es responsable del tráfico en enlace ascendente.(Farooq Bari, [SAE and Enhanced Packet Core](#), 2008).
- TEEP (Total Effective Equipment Performance): Rendimiento efectivo total de los equipos. (Stel Order, [OEE, TEEP y OOE](#), 2022).
- UE (Equipo de Usuario): Se refiere al router que establece la conexión entre el usuario o vehículo y la red LTE.
- E-UTRAN Cell Availability: Es la disponibilidad del servicio de la E-UTRAN.
- E-UTRAN Drop Ratio: Es el porcentaje de caídas de la E-RAB.

3.4.4 Glosario

- Bearer: Un bearer puede entenderse como una conexión lógica entre los diferentes elementos de la red LTE y tiene asociadas ciertas

características como la QoS entre otras, así como un identificador que lo hace único. (Carlos Serra, Arquitectura general del sistema LTE, 2013).

- Decomisionamiento: es la remoción o reubicación de un equipo, servicios de apoyo.
- MIMO (Multiple Input Multiple Output): Tecnología que permite transmitir altas tasas de datos junto con gran eficiencia espectral mejorada.
- PAGING (Mecanismo de aviso): El Paging en un sistema que tiene como meta principal la transmisión inalámbrica de breves mensajes a un terminal portátil.
- RAN (Radio Access Network): Parte de un Sistema de telecomunicaciones móviles. Implementa una tecnología de acceso por radio. Conceptualmente, reside entre un dispositivo como un móvil o cualquier maquina controlada de forma remota y proporciona conexión con la red CORE. (Juniper , [Qué es la RAN](#), 2012).
- Red MESH o en Malla: Tecnología de red inalámbrica tipo telaraña que utiliza las frecuencias 2.4 GHz y 5.0 GHz, para comunicación digital confiable y segura; es la capa de acceso a red para que los usuarios y sistemas se puedan conectar. (Camilo Astudillo, [Red Mesh](#), 2011).
- Remolque solar (solar trailer): Es una unidad móvil que funciona con energía solar o combustible.
- RSRP (Señal de referencia de potencia recibida): Es la más simple de las medidas de la capa física del UE y es un promedio línea en Watts de la señal de referencia del enlace descendente a través del ancho de banda del canal. (Arlet, [Funcionamiento del RSRP](#), 2023) .
- Throughput: Es definido como la velocidad real de transporte de datos a través de una red telemática, el cual normalmente se mide en Mbit/s y siempre será inferior al ancho de banda o bandwidth. (Vesga Ferreira, [Análisis sobre el comportamiento del rendimiento \(Throughput\) en redes LAN](#), 2012).
- Troubleshooting: Proceso de diagnóstico del origen de un problema .
- VPN (Red Privada Virtual): Es una conexión VPN permite crear una red local sin necesidad que sus integrantes estén físicamente conectados entre sí, sino a través de Internet.

3.4.5 Descripción de la implementación

Se hizo la decomision de la red mesh donde se retiraron 17 solar trailers y se implementó la nueva red LTE, diseñada en conjunto con Telefónica del Perú, Nokia y Comtecsa, donde se migraron los equipos de red y se aplicaron actualizaciones en routers y switches.

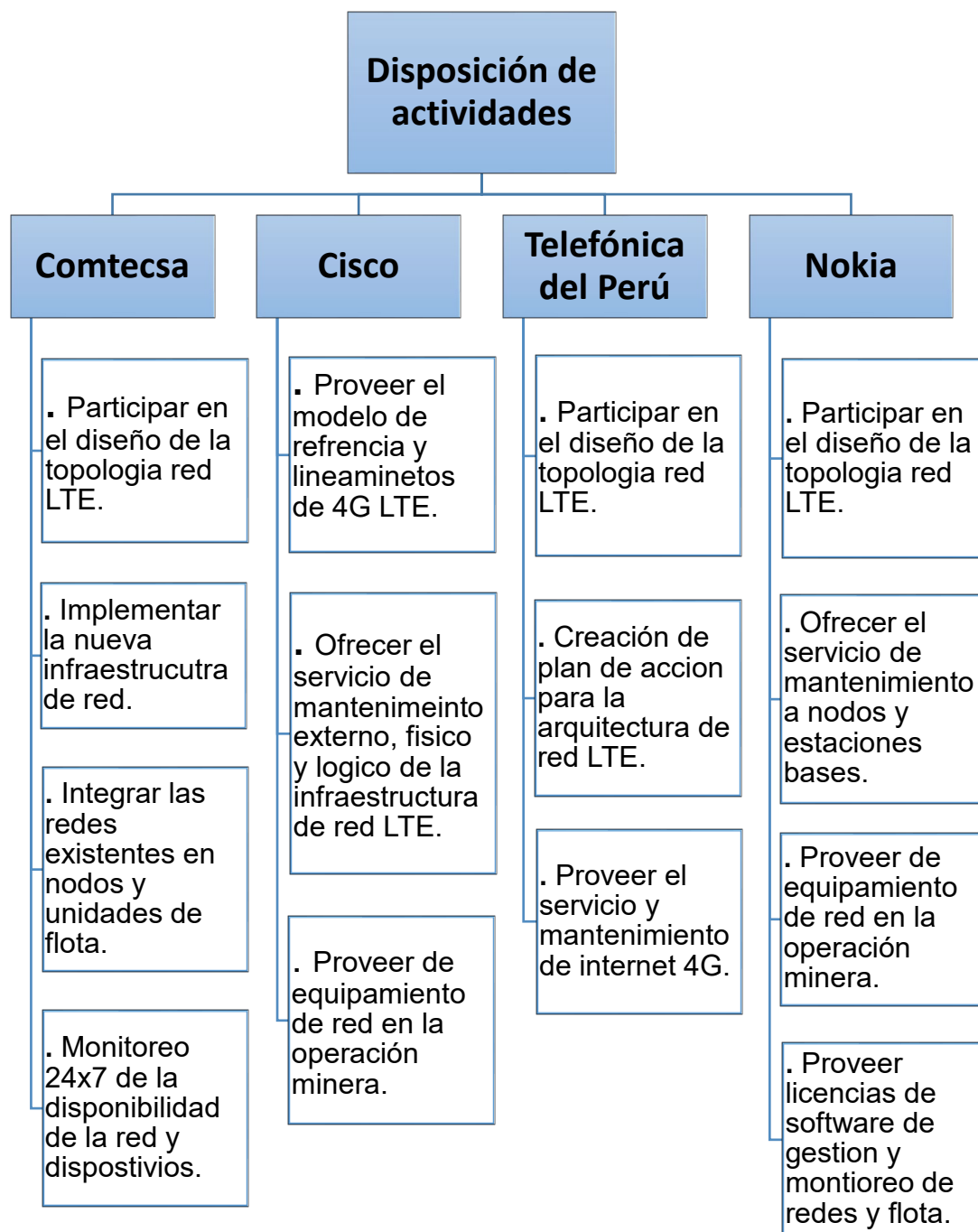
Los equipos de red de la flota se comunican mediante radioenlace a los siete nodos LTE y estos nodos están conectados a los switches core (PELABWL01 y PELABWL04), provistos por Nokia y Cisco, los routers ASR1K están en comunicación con los switches core, las redes corporate e industrial están bajo el protocolo EIGRP mientras que los vEPC-1 y 2 bajo el protocolo BGP. Se registran SIM's para los equipos usando las herramientas de registro como TITAN Master de NetNumber e ISE de Cisco donde se activa el funcionamiento del chip asignándole una IP y un pool de direcciones, estos trabajos fueron implementados por Comtecsa.

Mediante los receptores de GPS se puede monitorear la posición de las unidades de flota usando los satélites GPS (GLONASS, Galileo, IRNSS) y la herramienta Trimble. La flota usa los tipos de routers IR829GW-LTE-LA-NK9 y IR809G-LTE-LA-K9 y un sistema de CCTV para monitoreo en tiempo real, se configuró estos routers con la versión IOS 15.9, esto se puede monitorear desde las herramientas de monitoreo NagiosXI e Intellimine, provistos por Nokia, donde se observa el estado de la unidad y la disponibilidad del router y sus periféricos.

Las incidencias se muestran en la flota mediante la aplicación ProVision donde se observa el último estado de la unidad y la conectividad de los equipos, donde se resuelven o se escala al próximo nivel si la incidencia es mayor.

A continuación, se detalla el organigrama para el proyecto de implementación y diseño de la nueva red LTE.

TABLA 1: Disposición de actividades.



3.5 Procedimiento

El proyecto comprendió cuatro etapas:

- Decomisionamiento de la red MESH
- Transición a la nueva red LTE
- Plan de acción para la integración de las redes LTE
- Implementación de red LTE en los distintos equipos de la flota de mina

3.5.1 Decomisionamiento de la red Mesh:

Se procedió a decomisionar la infraestructura de la red MESH en MLB, la cual inicio operando desde abril de 2017. Con una arquitectura enmallada con 17 Solar Trailers, 4 puntos fijos, 1 APT Master y 1 End Point Manager (EPM). Todo el equipamiento corresponde a las marcas 3DP, Rajant, Morningstar, Elinx, Cambium Network y Cisco System. El decomisionamiento no impacto en ningún equipo o servicio ya que todos los equipos y servicios y aplicaciones ya fueron migrados 100 % a la red LTE de MLB, sin embargo, para realizar el trabajo bajo condiciones controladas se siguió los pasos para asegurar la correcta desconexión de los componentes de la red MESH.

LA RED MESH: En la figura N° 5 se muestra la arquitectura de la red MESH, cuya infraestructura cuenta con tres capas:

- Punto-a-punto (PTP) backhaul, FO
- Distribución punto-a-multipunto (PMP)
- El punto de acceso BreadCrumb.

La cuarta capa de la arquitectura es de los equipos clientes. La figura N° 6 muestra el diagrama de red entre los nodos y los equipos de red instalados en la flota minera (Smith, 2022).

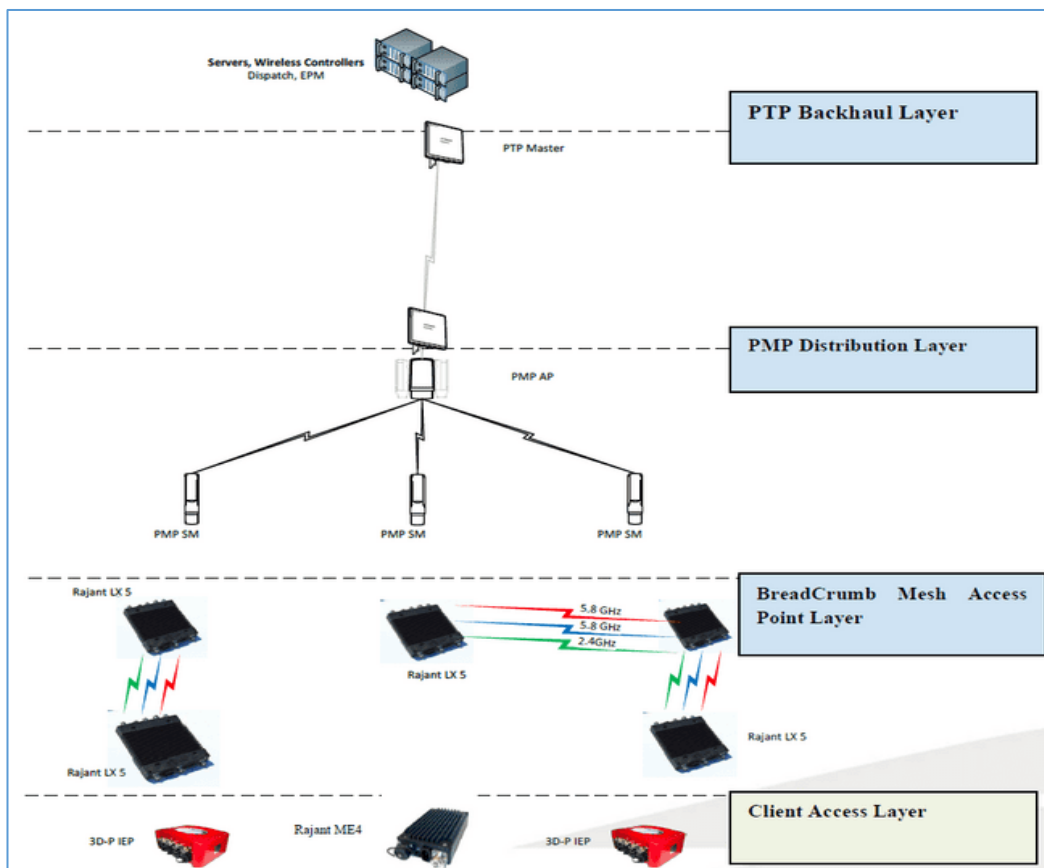


Figura 5: Capas de red. Fuente: MMG (2021).

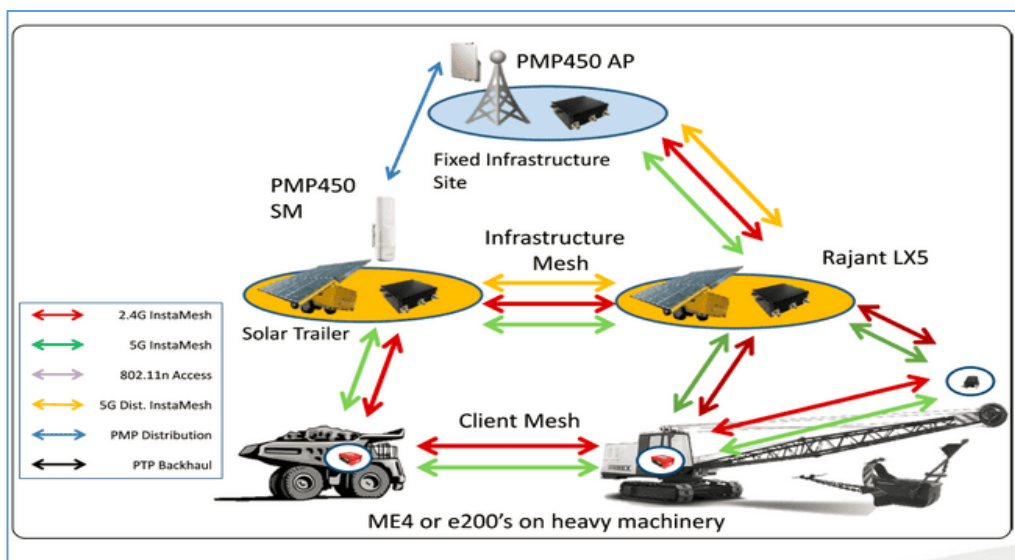


Figura 6: Diagrama de red inalámbrica. Fuente: MMG (2021).

En las tablas N° 2 y N° 3 se observan las coordenadas y ubicación de los solar trailers y puntos fijos.

UBICACIÓN Y COORDENADAS DE LOS ST Y PUNTOS FIJOS

Solar trailers

.Hay 7 Solar trailers desplegados para aumentar la cobertura, ver tabla N° 1

TABLA 2: Ubicación y coordenadas de los solar trailers.

ST	Coordenadas Geograficas		Altura	OBS	UBICACIÓN
	Latitud	Longitud	Z		
ST01	14°5'3.88" S	72°17'28.94" W	3900	Actualizada	Fase 05B, subiendo a la antena de Evelyn
ST02	MANTENIMIENTO POR ROBO		3900	Actualizada	Plataforma de mantenimiento - TAKIRUTA
ST03	SPARE		3900	Actualizada	Plataforma de mantenimiento - TAKIRUTA
ST04	14° 6' 3.34" S	72° 16' 57.18" W	3900	Actualizada	Via alterna de tramo 2, ingresando por la via alterna de la derecha de Bravo 04
ST05	14° 4' 14.84" S	72° 17' 39.78" W	3900	Actualizada	Bot. Huancarane, frente a Cambio de guardia
ST06	14°5'38.43" S	72°17'28.85" W	3900	Actualizada	Plataforma 6, Chancador primario
ST07	14° 6' 3.40" S	72° 17' 4.30" W	3900	Actualizada	Plataforma IMCO, nivel superior de via Mayra, pasando truckshop a 300 metros
ST08	14°4'53.95" S	72°17'4.78" W	3900	Actualizada	Canal de coronación, altura bravo 65
ST09	14° 5' 59.86" S	72° 18' 53.25" W	3900	Actualizada	Frente a Descarga DIQUE-ET04, Costado de Tramo1, parte inferior de Presa de Relave lado sur
ST10	14° 3' 50.78" S	72° 18' 25.87" W	3900	Actualizada	Campamento XP, ingresando a la mano izquierda, zona de parqueo
ST11	14° 5' 38.82" S	72° 16' 17.19" W	3900	Actualizada	Tramo A. Costado de caseta de Geotecnia
ST12	14° 4'58.25" S	72°18'4.96" W	3900	Actualizada	Via alterna de via tramo HR01 parte media alta de tramo HR01
ST13	14° 4' 52.33" S	72° 17' 36.54" W	3900	Actualizada	Garza 5, costado de tramo 9
ST14	14° 5' 32.67" S	72° 18' 14.61" W	3900	Actualizada	Via tramo1, caseta color azul, costado de exubicación de chancador movil
ST15	14° 5' 46.52" S	72° 16' 31.38" W	3900	Actualizada	Ingresando por garza 1, parte alta de Fase 4, lado este
ST16	14° 5' 29.75" S	72° 19' 36.72" W	3900	Actualizada	Parte alta de Presa de Relave lado oeste
ST17	PLAT. ARMADO		3900	Actualizada	Equipo se encuentra en Plataforma de armado como repetidor celular.

Puntos Fijos

Existen 4 puntos fijos distribuidos en la mina, ver tabla N° 3.

TABLA 3: Ubicación y coordenadas de los puntos fijos.

PUNTOS FIJOS	Coordenadas Geograficas		Altura	OBS	UBICACIÓN
	Latitud	Longitud	Z		
Truckshop	14°6'8.25" S	72°16'52.76" W	3900	Actualizada	Techo de Truckshop
Evelyn	14°5'8.68" S	72°17'28.80" W	3900	Actualizada	Poste Mesh, Cerro Evelyn
Crusher	14°5'35.59" S	72°17'29.93" W	3900	Actualizada	Chancador primario
Antawasi	14° 5' 49.30" S	72° 18' 25.70" W	3900	Actualizada	Poste Mesh, costado de RRCC

3.5.2 Transición a la nueva red LTE:

Debido a la necesidad de mejorar la productividad de la flota y mejorar los procesos de atención se decidió cambiar de arquitectura de red MESH a LTE donde se retiraron los 17 Solar Trailers y estructurando una arquitectura de red LTE donde se implementó nuevos equipos, se migraron a la red LTE y se cambió de configuración a los routers, servidores, switches, etc. gradualmente para no afectar el servicio la implementación total de la nueva red LTE finalizó en enero de 2022 con el decomisionamiento y migración total de los equipos de la antigua red MESH. En los siguientes puntos se explicará de forma detallada la arquitectura de red LTE de la minera La Bambas, que protocolos y configuraciones se siguieron para implementarla.

3.5.3 Implementación de la red LTE:

La implementación de la red LTE comprende

- **Arquitectura de la red**
- **Diseño de Red LTE**
- **Plan de acción**
- **Plan de acción para la integración de las redes MIND -LTE**

Arquitectura de red LTE

En la figura N° 7 se muestra la arquitectura de la red de transmisión, indicando las diferentes interfaces para los servicios involucrados en la interconexión entre el eNB y el EPC:

- **S1_U** (eNB ↔ SAE-GW)
- **S1_MME** (eNB ↔ MME)
- **X2_U** and **X2_C** (source eNB ↔ target eNB)
- **O&M** i/f (eNB ↔ O&M system / iOMS).

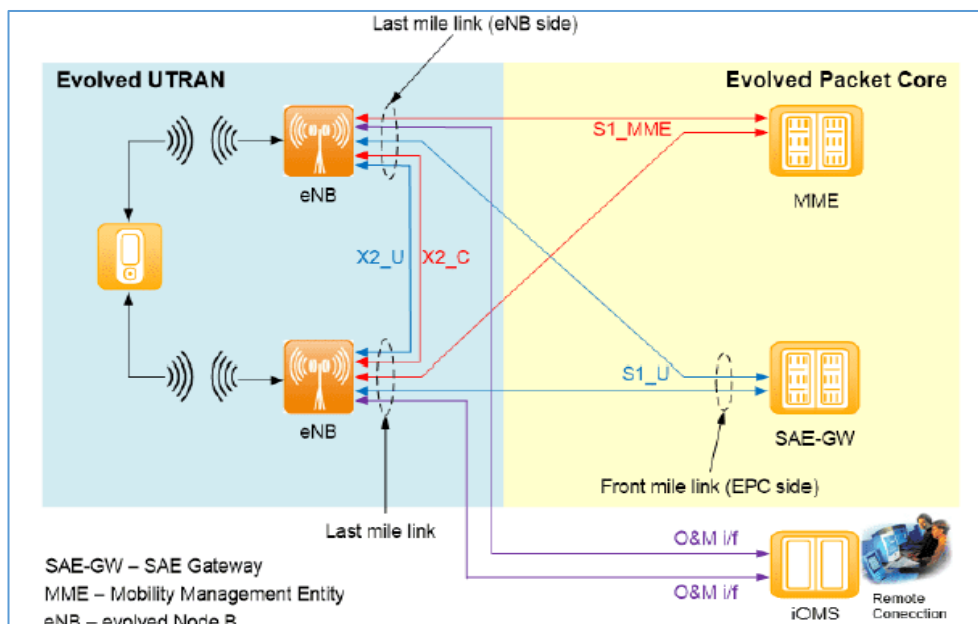


Figura 7: Arquitectura de la red de transmisión. Fuente: Telefónica del Perú (2020).

Direccionamiento IP y VLAN:

Para la solución LTE en Las Bambas se están usando 3 VLANs por cada servicio para la conexión WAN, y los servicios de Control/User/Management Plane serán llevados por cada interface de Transporte del eNodeB . La figura N° 8 muestra las interfaces VLAN por tipo de plano.

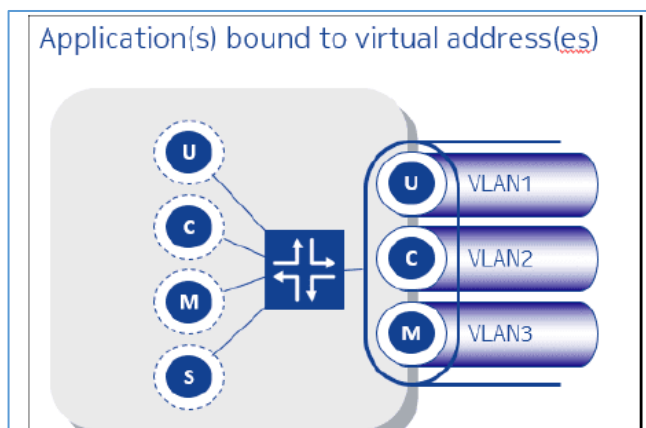


Figura 8: VLAN por Interface. Fuente: Telefónica del Perú (2020).

En la tabla N° 4 se muestran los requisitos de packet loss para cada QCI (Quality of Service Class Identifier), Este es un identificador especial que define la calidad de la comunicación de paquetes proporcionada por LTE. El rango de la clase es de 1 a 9.

TABLA 4: Calidad de servicio y Perdida de paquetes.

Example of service	QCI	Bearer type	Priority	Packet delay	Packet loss rate
VoIP call	1	GBR	2	100 ms	10^{-3}
Video call	2		4	150 ms	10^{-3}
Online gaming (real-time)	3		3	50 ms	10^{-3}
Video streaming	4		5	300 ms	10^{-6}
IMS signaling	5	Non-GBR	1	100 ms	10^{-6}
Video (buffered streaming), TCP-based services (e.g. www, e-mail, chat, ftp)	6		6	300 ms	10^{-6}
Voice, video, interactive gaming	7		7	100 ms	10^{-3}
Video (buffered streaming), TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing)	8		8	300 ms	10^{-6}
	9		9		

La definición de DSCP (Differentiated Services Code Point) es mapeado por tipo de QCI (Quality of Service Class Identifier) según la siguiente tabla. Estos valores pueden ser establecidos de acuerdo a los valores que sean manejados en el lado del Transporte y EPC, para este caso se está configurando con los parámetros por defecto. El valor 9 de QCI generalmente se usa para operadores predeterminado de UEs y suscriptores no privilegiados como este caso en la tabla N° 5 (Oguntinyinbo, 2013).

TABLA 5: DSCP y QCI.

LTE QCI	Service class	DSCP	P-bit	EXP bit for MPLS	DSCP marking	P-bit marking	Examples
1 (GBR)	EF	46	5	5-7	eNodeB (UL) PGW (DL)	eNodeB (UL)	VoIP call
2 (GBR)	EF	36	5	5-7	eNodeB (UL) PGW (DL)	eNodeB (UL)	Video call
3 (GBR)	EF	46	5	5-7	eNodeB (UL) PGW (DL)	eNodeB (UL)	Online gaming (real-time)
4 (GBR)	AF42	26	4	4	eNodeB (UL) PGW (DL)	eNodeB (UL)	Video streaming
5 (non-GBR)	AF41	48	4	4	eNodeB (UL) PGW (DL)	eNodeB (UL)	IMS signaling
6 (non-GBR)	AF42	18	4	4	eNodeB (UL) PGW (DL)	eNodeB (UL)	Web services (gold), chat, interactive services
7 (non-GBR)	AF22	20	2	2	eNodeB (UL) PGW (DL)	eNodeB (UL)	Interactive gaming
8 (non-GBR)	AF21	0	2	2	eNodeB (UL) PGW (DL)	eNodeB (UL)	ftp, p2p file sharing, non-interactive services
9 (non-GBR)	BE	0	0	0	eNodeB (UL) PGW (DL)	eNodeB (UL)	Best effort (web services)

Sincronización:

GPS/GLONASS será proveedor del Sincronismo para los eNodeB, lo cual garantiza una alta confiabilidad contando con la instalación de la antena GPS. En la figura N° 9, se observa el ciclo de sincronización entre el satélite y el cliente final.

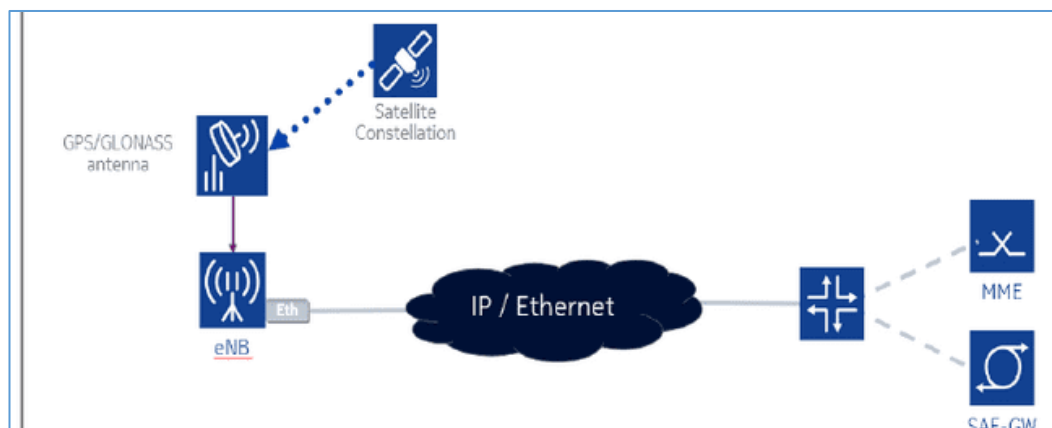


Figura 9: Sincronización por GPS. Fuente: Telefónica del Perú. (2021).

Rendimiento de transporte

El MTU (Unidad máxima de transferencia) de los paquetes User IP Payload es de 1500 bytes, como se muestra en la figura N° 10, donde se indican las etiquetas y costos que componen cada User IP.

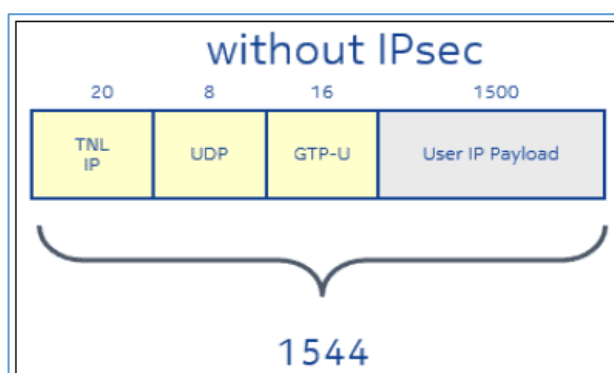


Figura 10: Trama bytes. Fuente: Telefónica del Perú (2020).

A ello se adicionan las cabeceras de la capa de transporte (GTP/UDP/IP, Opcion IPsec), excediendo el estándar de 1500 bytes. En la siguiente tabla N° 6 se muestran todas las cabeceras posibles que se adicionaron según las funcionalidades que se tengan dentro de la solución LTE:

Plan IP y VLAN

La Asignación del Plan IP y Vlan para los diferentes tipos de tráfico fue de la siguiente manera según la figura N° 11, donde se han considerado tres Vlan por cada interfaz.

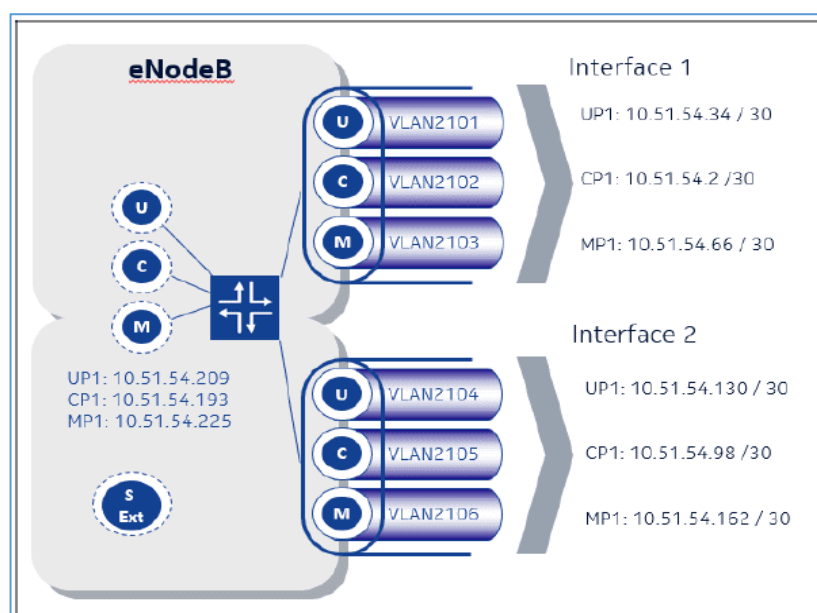


Figura 11: Asignación IP/VLAN. Fuente: Telefónica (2021).

Característica: Redireccionamiento rápido de IP

Esta característica, activo en el eNodeB, permite el manejo de la redundancia basado en el Protocolo L3 BFD entre las dos interfaces de Transporte Primario y Secundario. Tal como se muestra en la figura N° 12, el BFD está activo en la ruta primaria y luego de alguna caída en el Router o interfaces físicas, conmutará hacia el router secundario para que todo el tráfico sea llevado a través de esa segunda ruta.

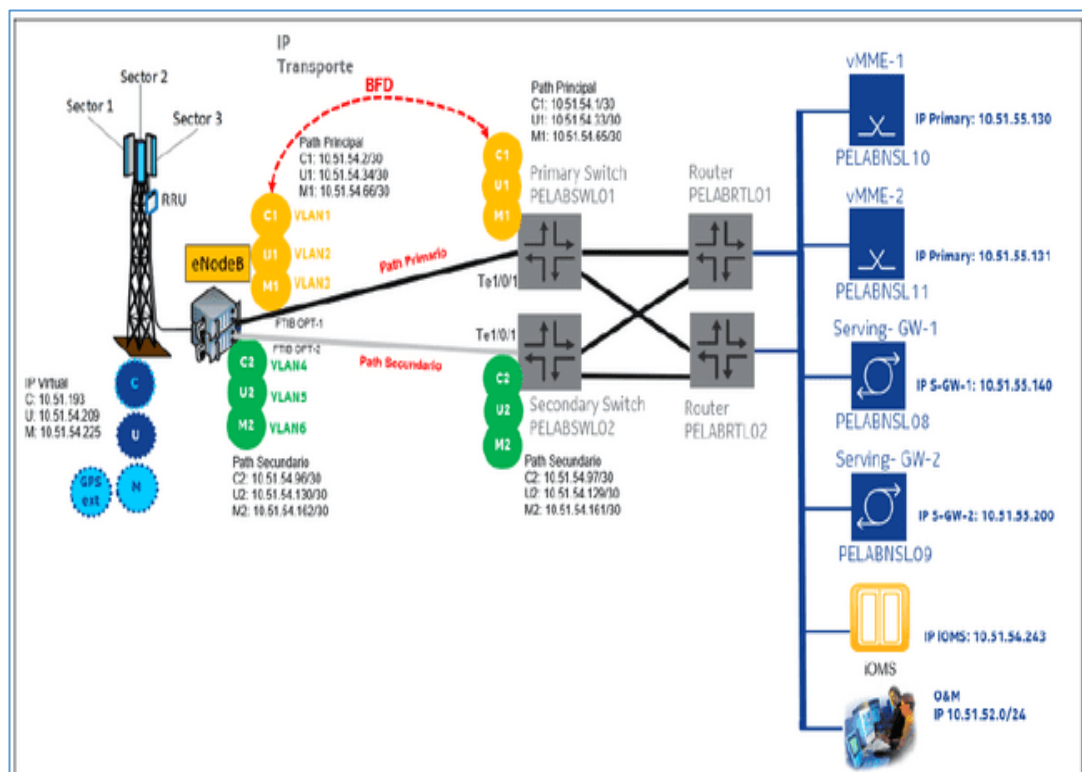


Figura 12: Topología Fast IP Rerouting LTE. Fuente: Telefónica del Perú (2021).

BFD

El Protocolo BFD (Bidirectional Forwarding Detection) ayuda a detectar fallas e interrupciones de servicios a través de flujos de paquetes entre el eNodeB y el lado remoto del Router. Para ello, dentro del eNodeB se configuran sesiones BFD en el Path Primario (en la interface del eNodeB y el Router Principal). En el (Anexo 2) se muestran los comandos XML.

Diseño de Red LTE

El siguiente diagrama ilustra el esquema de la red LTE para el sitio Las Bambas. Se usa el protocolo EIGRP en los ASR's, BGP en los vEPC's y enrutamiento estático en el HSS y la comunicación con los eNodeB, se observa que hay una redistribución gracias al SW1 de capa 3, observar la figura N° 13.

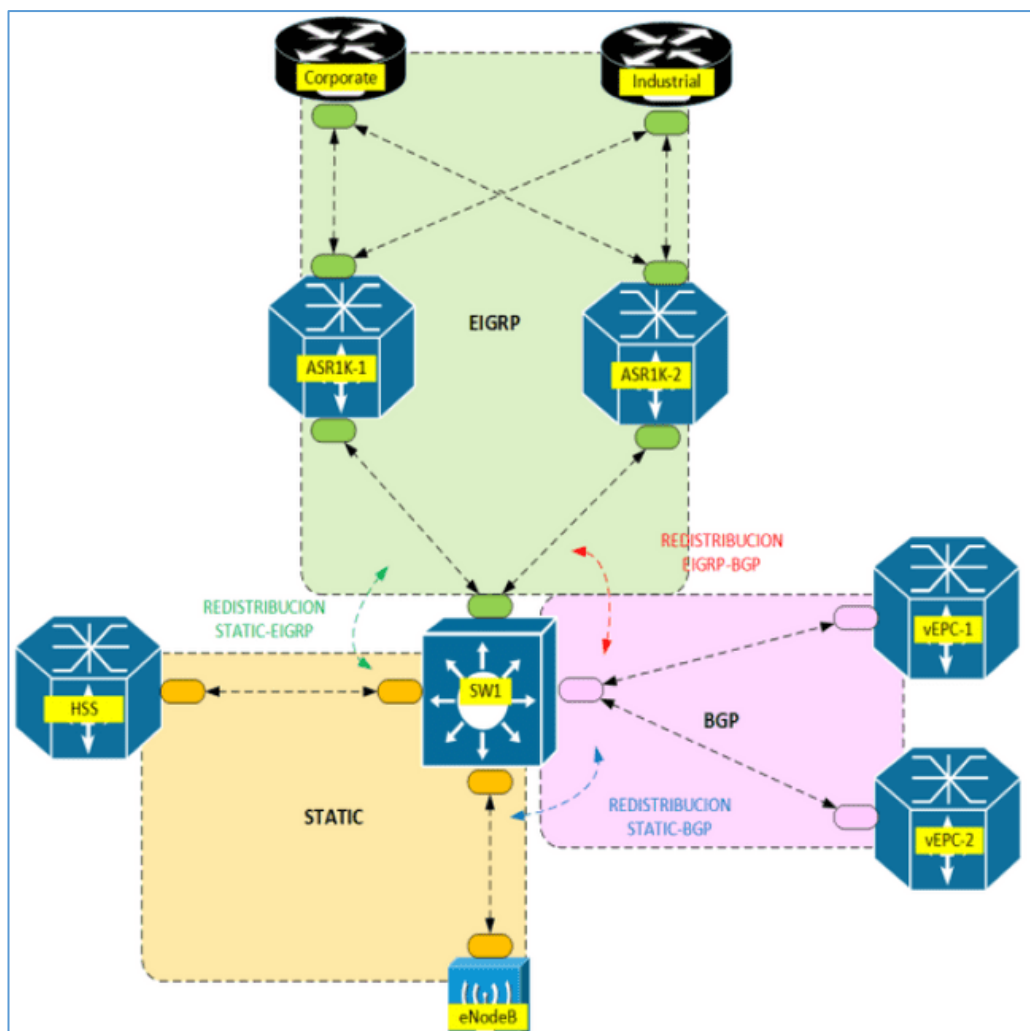


Figura 13: Diagrama de red LTE de Las Bambas. Fuente: Telefónica del Perú (2021).

Actualmente, hay 7 sites distribuidos por toda la mina, ver la figura N° 14. Donde se distribuye la cobertura del servicio de red y permite la conexión entre usuarios y nodos.



Figura 14: Ubicación de los Sites LTE de Las Bambas. Fuente: Telefónica del Perú (2020).

Modelo de Referencia

La figura N° 15 ilustra la interconexión de los diferentes componentes en un diagrama topológico de red, según lineamientos de diseño CPwE basado en estándares ISA. Donde se divide a la red en 4 niveles, siendo el nivel 1 y 2 asignados a los equipo de red y usuarios finales, el nivel 3 es para la infraestructura de comunicación donde se encuentran los switches core y servidores remotos, la zona desmilitarizada permite la conexión entre un dispositivo y una red externa y el nivel 4 y 5 perteneciente a los routers que tienen comunicación con el proveedor del servicio de red (Rockwell Automation, 2015).

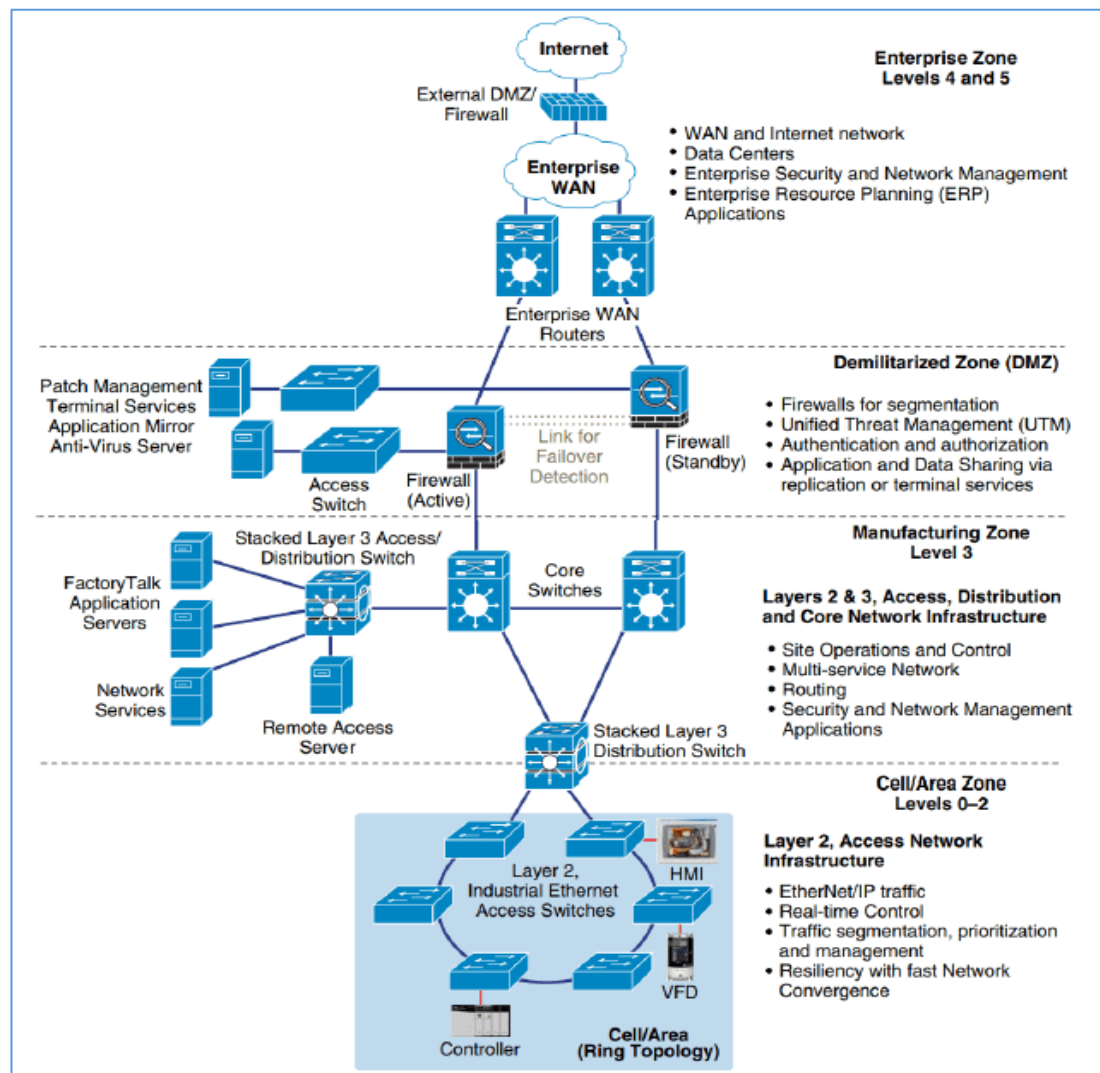


Figura 15: Modelo de referencia. Fuente: ISA (2019).

Protocolo de Enrutamiento

Se tomaron dos protocolos de enrutamiento dinámico a controlar la alta disponibilidad tráfico entre las redes LTE y las redes OT/IT de la mina: EIGRP y BGP.

Por un lado, EIGRP por ser el protocolo actualmente en uso en la red de Las Bambas. Por el otro lado, BGP por ser un excelente candidato para integrar diferentes dominios administrativos.

EIGRP es un protocolo intradominio, mientras que BGP es un protocolo interdominio. Bajo este aspecto, hay que considerar que la red LTE será administrada por personal de MMG y no de un proveedor de servicio. Como protocolo exterior, BGP presenta funcionalidades de control de políticas administrativas de enrutamiento mucho más ricas que cualquier protocolo interior.

Intrínsecamente y en su configuración predefinida, BGP tiene una reconvergencia mucho más lenta que EIGRP. Sin embargo, en algunos contextos y configuraciones específicas es posible equipararlos. Unido a todo lo dicho anteriormente, EIGRP presenta una simplicidad de gestión muy superior a BGP. Obviamente, la mayor capacidad de control administrativo implica automáticamente una mayor complejidad operativa.

En síntesis, se adoptó EIGRP como protocolo de enrutamiento dinámico para la interconexión de la red LTE con las redes IT/OT de la mina. Con el objetivo de reducir los tiempos de reconvergencia, se habilitó la funcionalidad BFD.

Segmentación

La red LTE presenta diferentes contextos dentro del vEPC. Dichos contextos mantienen separados los tráficos de las redes corporativa e industrial. Internamente al vEPC se asignaron diferentes APNs, interfaces, VLANs y VRFs. Esta segmentación se mantiene en el core LTE y en los routers de borde LTE. En caso de requerir segmentación adicional en la red industrial, se crearán las correspondientes instancias de VRF (por ejemplo: VRF#1 Geotech, VRF#2 LWS, VRF#3 Mine Fleet) (Rockwell Automation, 2011).

En línea con el modelo de referencia para redes industriales ISA95, la capa de acceso industrial corresponde a los niveles 0-2 y se conectan directamente el nivel 3, antes del firewall que conduce al nivel 3.5 (MDMZ), ver la figura N° 16.

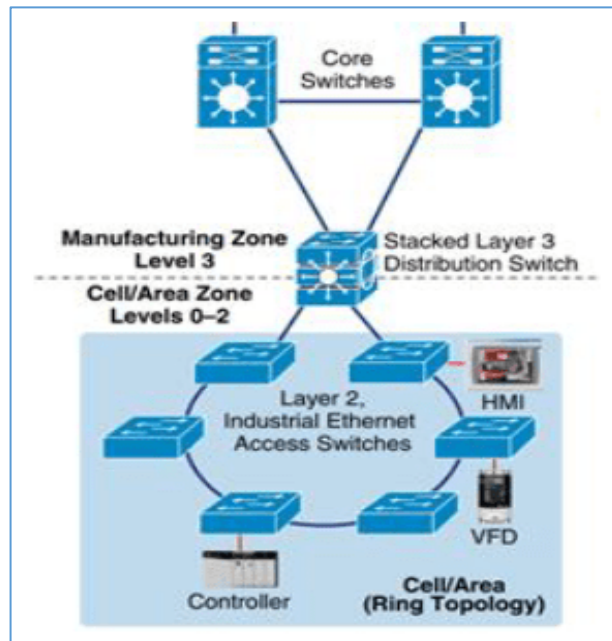


Figura 16: Modelo de referencia para redes industriales ISA95. Fuente: ISA (2019).

Por lo tanto, se asignó diferentes puertos físicos dentro de los ASR1001-X, cada uno de ellos dedicados a una red diferente (corporativa e industrial). En la figura N° 17 se observa que los puertos se conectan directamente a las respectivas funciones de Core corporativo e industrial.

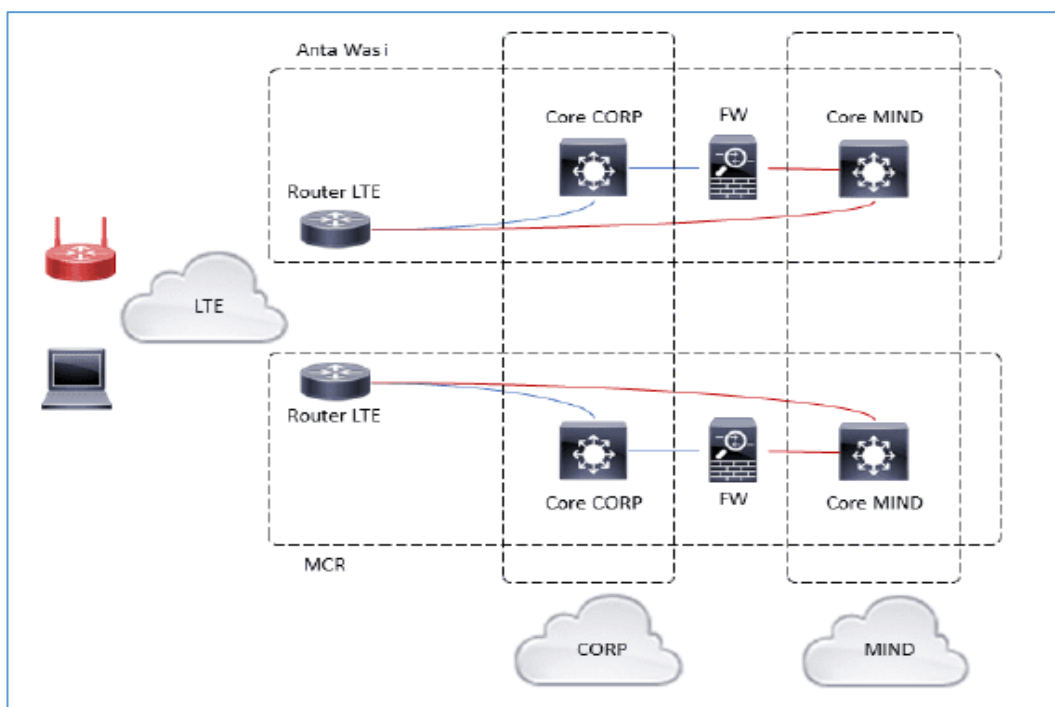


Figura 17: Asignación de puertos en ASR1001-X. Fuente: ADTS IT Consulting (2020).

Seguridad

Con el objetivo de mantener los diferentes flujos de tráfico controlados según las diferentes políticas de seguridad industriales se adoptaron diferentes estrategias.

En los casos de políticas completamente restrictivas (sin posibilidad de tráfico cruzado entre diferentes dominios), se crearon VRFs dedicadas para cada red/VLAN en el core industrial. De esta manera no hay posibilidad de comunicación alguna fuera de dicha instancia VRF, hasta la salida hacia el firewall, idealmente mediante un puerto físico dedicado. Todas las instancias de VRF presentes en la red LTE están conectadas directamente a las respectivas instancias dentro del core de red industrial.

En los casos de políticas parcialmente restrictivas (en donde una cantidad/tipo limitado de tráfico está autorizado a cruzar entre diferentes dominios), se crearon ACLs que reflejan dichas políticas en el core industrial. De esta manera, sólo el tráfico autorizado se intercambia entre diferentes redes/VLANs. En caso de implementar mecanismos de acceso seguros propios de la red LTE, el nivel de seguridad intrínseco de todo el tráfico industrial será elevado, volviendo innecesaria la introducción de un firewall que proteja la interconexión entre las redes LTE y el resto de la red industrial.

Plan de Acción

En esta parte se detalla el plan de acción para la interconexión de la red de acceso móvil en tecnología LTE con la red industrial del sitio Las Bambas. Así como también la configuración del FW, y del Diagrama de integración (Anexo 3).

Plan de acción para la integración de las redes MIND- LTE.

Se muestra el procedimiento realizado para la integración de las redes MIND-LTE siguiendo el Paso a Paso del presente plan. Prosiguiendo con la integración de la red MIND con la LTE será necesario realizar cambios a nivel de configuración en los siguientes equipos involucrados:

- PELABSWN01
 - o WS-C3850-48T
 - o WS-C3850-48T
- PELABSWN02
 - o WS-C3850-48T
 - o WS-C3850-48T

DIAGRAMA TOPOLOGICO PARA LA INTEGRACION MIND-LTE:

En la figura N°18 se puede apreciar la arquitectura que se utilizó para integrar la red MIND (Mining Industrial Network Devices) con los routers core ASR1K's.

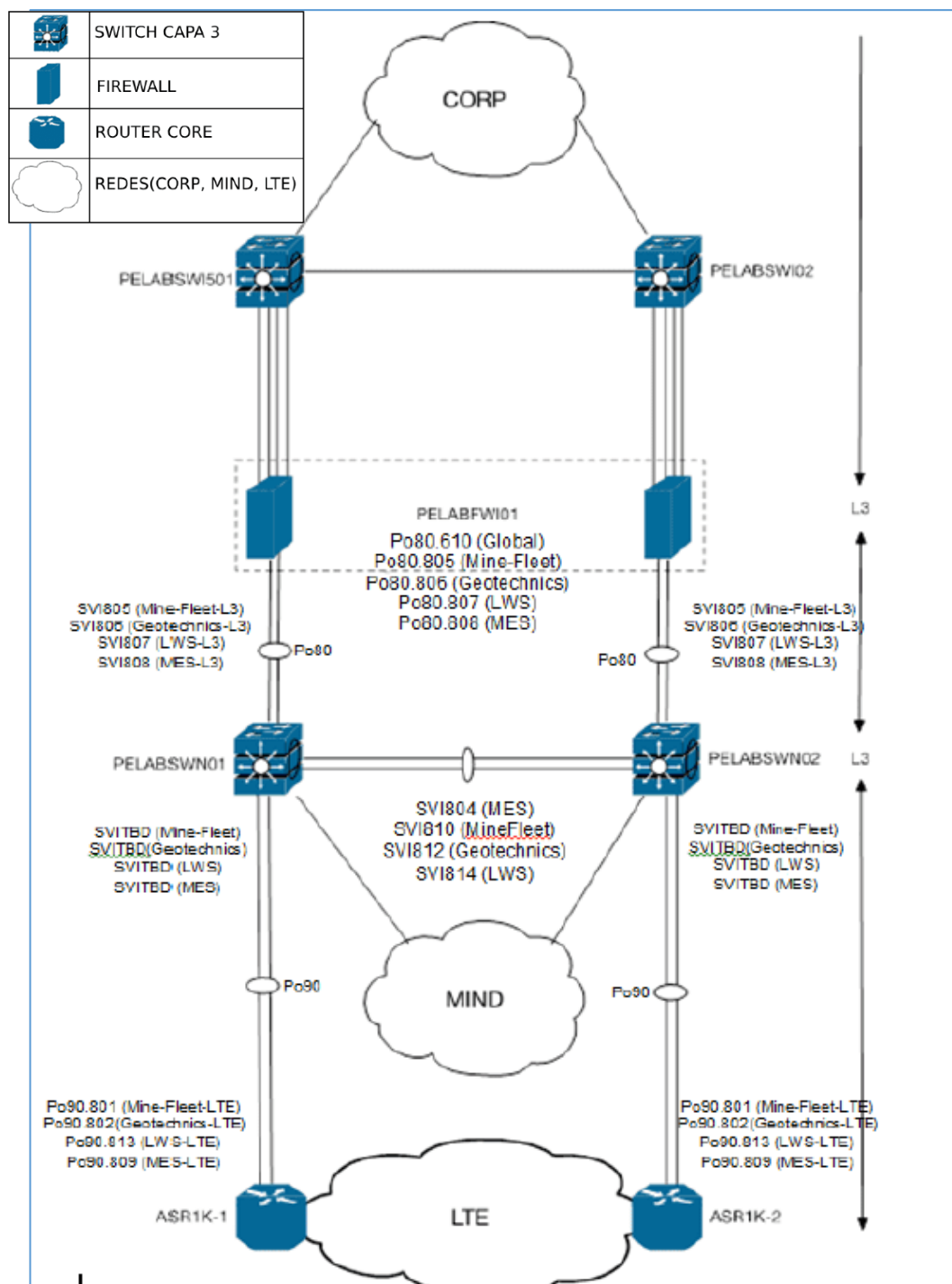


Figura 18: Diagrama topología red LTE. Fuente: Comtecsa (2019).

Puertos de Interconexión y Direccionamiento IP entre los Switches CORE y Firewall

En la tabla N° 8 se muestra el mapeo de puertos asignados para las conexiones entre los Switches CORE y los Firewall para la integración:

TABLA 8: Nombres de los Hosts y Puertos designados integración SW Core y Firewall.

Hostname	Puerto Físico	Hostname	Puerto Físico
PELABSWN01	G1/0/11	PELABFWI01 (A)	G0/4
PELABSWN01	G2/0/11	PELABFWI01 (A)	G0/5
PELABSWN02	G1/0/11	PELABFWI01 (B)	G0/4
PELABSWN02	G2/0/11	PELABFWI01 (B)	G0/5

En la figura N° 19 se presenta las conexiones entre los switches core con los Firewall para la integración MIND-LTE, para el establecimiento de políticas de red.

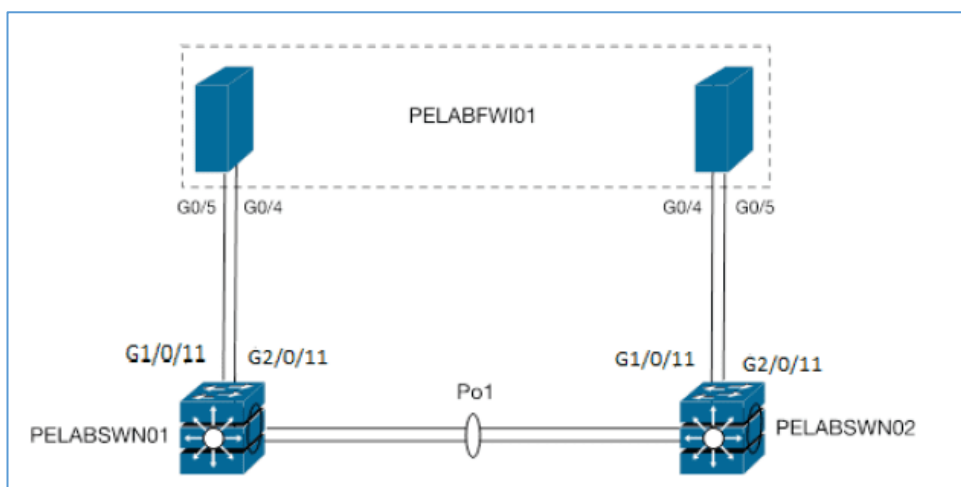


Figura 19: Conexiones entre Switches Core y Firewalls. Fuente: Comtecsa (2021).

Puertos y Direccionamiento IP para las Interconexiones e Integración entre los Switches CORE y Router ASR1K

Para la interconexión de los Switches CORE con los ASR1K serán necesarios 02 puertos de Fibra Optica GigaEthernet por cada Switch Core en la tabla N° 9 se observa los hostnames con sus respectivos puertos asignados.

TABLA 9: Nombres de los Hosts y Puertos designados integración SW Core y ASR1K.

Hostname	Puerto Físico	Hostname
PELABSWN01	G3/0/10	ASR1K-2
PELABSWN01	G4/0/10	ASR1K-2
PELABSWN02	G3/0/10	ASR1K-1
PELABSWN02	G4/0/10	ASR1K-1

La figura N° 20, muestra las nuevas conexiones para la integración: Implementado el protocolo EIGRP para la conexión entre los PELABSWN's y ASR1K's.

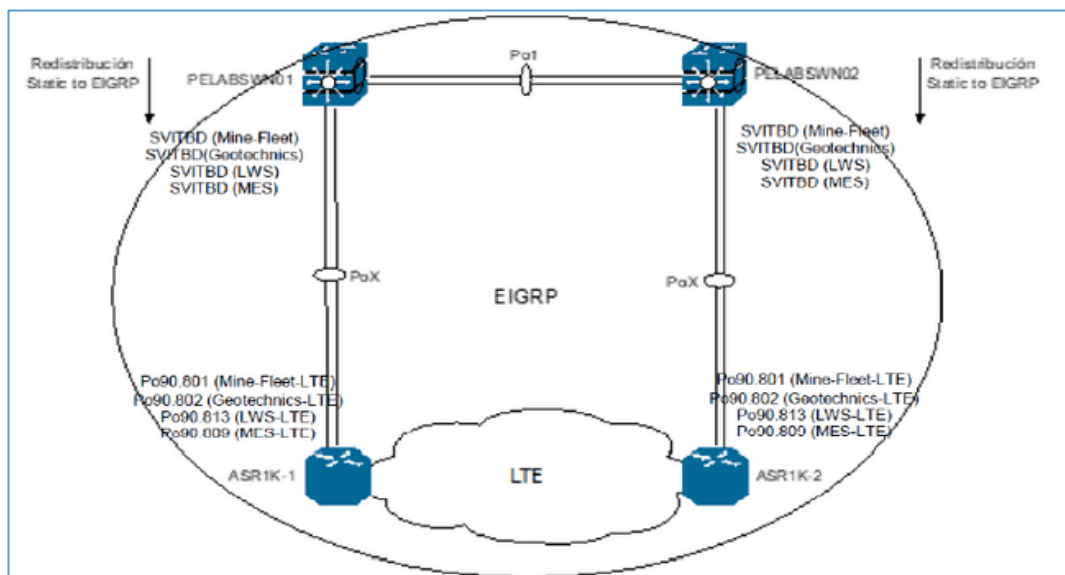


Figura 20: Conexiones entre Switches Core y ASR1K. Fuente: Comtecsa (2020).

Actualmente se utilizan los siguientes segmentos de red, ver tabla N° 10:

TABLA 10: Redes disponibles y segmentación de direcciones.

Descripción	Nombre asignado	Segmentación
Integración equipos de red de la flota minera.	Mine Fleet	VLAN 810 - 10.51.192.0/20
Integración equipos de GPS y monitoreo	MGMT	VLAN 610 - 10.51.178.0/23
Integración equipos de geotecnia	Geotechnics	VLAN 812 - 10.51.183.0/24
Integración sensores y antenas	LWS	VLAN 814 - 10.51.185.0/24
Integración de equipos de radioenlace	MES	VLAN 804 - 10.51.182.0/24

INTEGRACIÓN DE LA RED CORE LTE:

En la figura N° 21 , se muestra la configuración de los switches core de la red LTE y como se comunican con las redes corporate e industrial. El site de Chalcobamba se comunica mediante radioenlaces hacia una IDU, los seis sites restantes mediante enlace físico a los switches core y estos hacia los ASR1. En el (Anexo 4) se muestra el procedimiento de configuración en los switches core industriales para su integración con la red lte.

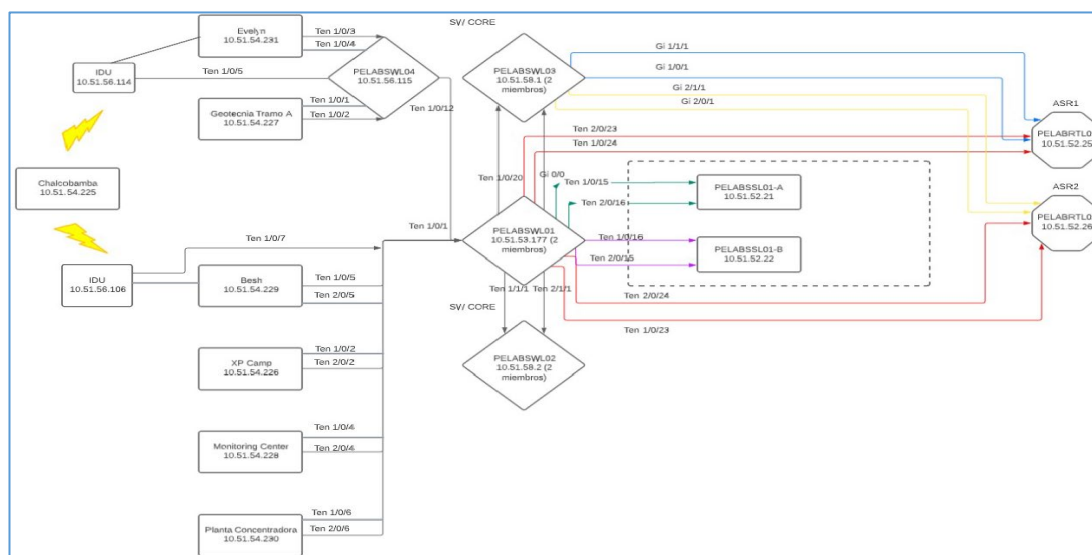


Figura 21: Diagrama de la topología de red core LTE. Fuente: Comtecsa (2022).

CONEXIÓN ENTRE SITES Y SWITCHES

Los Sites se comunican con los switches core mediante fibra óptica , el site Chalcobamba se comunica mediante radio enlaces a las IDU's y estas mediante fibra óptica se comunican a los switches PELABSWL04 y PELABSWL01, a continuación, se vera la tabla descriptiva N°11 de los sites y los puertos utilizados para su comunicación:

TABLA 11: Nombres de los Hosts, IP's y Puertos designados integración SW Core y Sites.

HOSTNAME	IP	PUERTO FISICO	SWITCH CONECTADO
Chalcobamba	10.51.54.225	Ten 1/0/5 , Ten 1/0/7	PELABSWL04/ PELABSWL01
Evelyn	10.51.54.231	Ten 1/0/3, Ten 1/0/4	PELABSWL04
Geotecnia Tramo A	10.51.54.227	Ten 1/0/1, Ten 1/0/2	PELABSWL04
Besh	10.51.54.229	Ten 1/0/5, Ten 2/0/5	PELABSWL01
XP Camp	10.51.54.226	Ten 1/0/2, Ten 2/0/2	PELABSWL01
Monitoring Center	10.51.54.228	Ten 1/0/4, Ten 2/0/4	PELABSWL01
Planta Concentradora	10.51.54.230	Ten 1/0/6, Ten 2/0/6	PELABSWL01

CONEXIÓN ENTRE SWITCHES CORE

Los switches core se comunican entre ellos mediante fibra óptica (PELABSWL01, PELABSWL02, PELABSWL03 y PELABSWL04), a continuación, se vera la tabla descriptiva N° 12 de los switches y los puertos utilizados para su comunicación:

TABLA 12: Nombres de los Hosts, IP's y Puertos designados comunicación entre SW Core.

HOSTNAME	IP	PUERTO FISICO	SWITCH CONECTADO
PELABSWL01	10.51.53.177	Ten 1/0/5 , Gi 0/0 Ten 1/1/1, Ten 2/1/1 Ten 1/0/12	PELABSWL03 PELABSWL02 PELABSWL04
PELABSWL02	10.51.58.2	Ten 1/1/3, Ten 2/1/4	PELABSWL01
PELABSWL03	10.51.58.1	Ten 1/0/1, Gi 0/1	PELABSWL01
PELABSWL04	10.51.56.115	Ten 1/0/12	PELABSWL01

CONEXIÓN ENTRE ROUTERS ASR1K Y SWITCHES CORE

Los switches core se comunican entre ellos mediante fibra óptica (PELABSWL01, PELABSWL02, PELABSWL03 y PELABSWL04), también los switches core PELABSWL01, PELABSWL02, PELABSWL03 se comunican

con los routers ASR1K mediante fibra óptica, a continuación, se vera la tabla descriptiva N°13 de los switches y los puertos utilizados para su comunicación:

TABLA 13: Nombres de los Hosts, IP's y Puertos designados integración SW Core y Routers ASR1K.

HOSTNAME	IP	PUERTO FISICO	SWITCH CONECTADO
PELABSWL01	10.51.53.177	Ten 2/0/23 , Ten 1/0/24 Ten 2/0/24, Ten 1/0/23	PELABRTL01 PELABRTL02
PELABSWL03	10.51.58.1	Gi 1/1/1, Gi 1/0/1 Gi 2/1/1, Gi 2/0/1	PELABRTL01 PELABRTL02

3.5.4 Implementación de red LTE en la flota de mina

La implementación de la red en la flota comprendió las siguientes fases:

- Pruebas de conectividad con los periféricos
- Comprobación de operatividad de equipo en la flota
- Conexión remota con las antenas de LTE en el NOC
- Instalación y configuración de Estaciones Base BTS

Estas fases se aprecian en el (Anexo 5).

3.6 Resultados

Análisis de las configuraciones y equipos de la red lte.

Se realizaron análisis a las configuraciones de los equipos de red para evidenciar una mejora en el servicio de red y la disponibilidad de la flota, como el número de incidencias en un periodo de transición entre las dos redes mesh y lte, tipos de problemas más recurrentes en la flota y nivel de criticidad de las incidencias.

La figura N° 22: Porcentajes de incidencias por tecnologías, son resultados del análisis de incidencias ocurridas durante el periodo de junio a diciembre del 2021; se evidencia que los nuevos equipos de red LTE causaron un menor porcentaje de incidencias durante el periodo de migración.



Figura 22: Porcentaje de incidencias por tecnología. Fuente: Comtecsa (2022).

La figura N° 23: Incidencias por nivel de criticidad, durante junio a diciembre del 2021 el porcentaje de incidencias de criticidad media fueron del 71% en su mayoría debido a la indisponibilidad de equipos por migración a LTE.

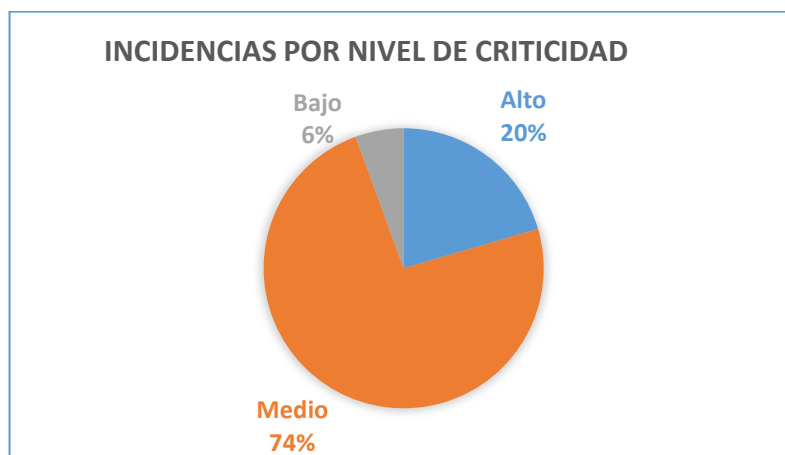


Figura 23: Incidencias por nivel de criticidad. Fuente: Comtecsa (2022).

La figura N° 24: Criticidad según tipo de equipo, se puede observar que debió a la migración de equipos los más afectados fueron los camiones durante el periodo junio a diciembre del 2021.

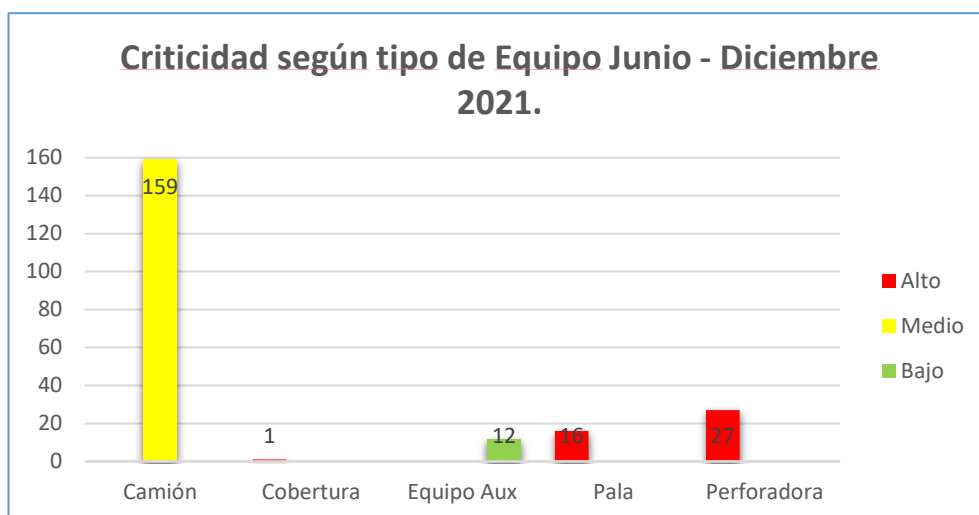


Figura 24: Criticidad de incidencias según tipo de equipo. Fuente: Comtecsa (2022).

La figura N° 25: Evolución de Incidencias en la flota, se puede observar una disminución considerable de incidencias de red en la flota durante los meses de junio a mayo del 2022 aumentando la productividad de la flota y teniendo una disponibilidad mayor.



Figura 25: Evolución de incidencias en la flota. Fuente: Comtecsa (2022).

En la figura N° 26: Evolución de Incidencias en la flota por categoría, se nota que los problemas más comunes en la flota son por problemas del aplicativo y no de la red , también se evidencia el decrecimiento de incidencias desde el mes de septiembre hasta diciembre del 2021.

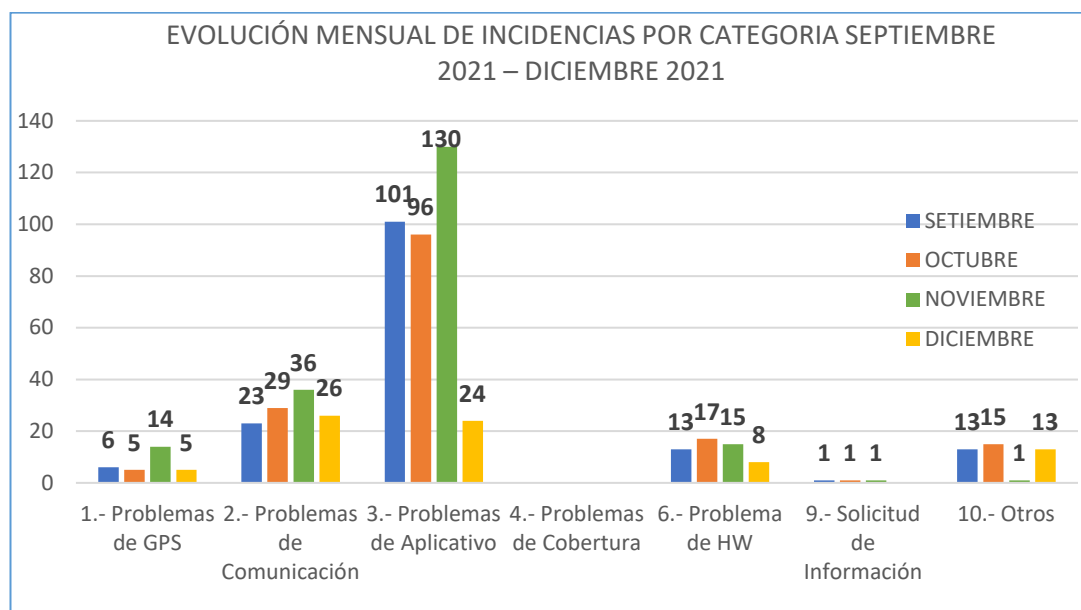


Figura 26: Evolución de incidencias en la flota por categoría. Fuente: Comtecsa (2022).

En la figura N° 27: se resumen las soluciones dadas a los incidentes en la flota, por problemas de red, en su mayoría por problemas del equipo en la unidad o por problemas en su aplicación y de menor manera por cobertura en la red de la mina.

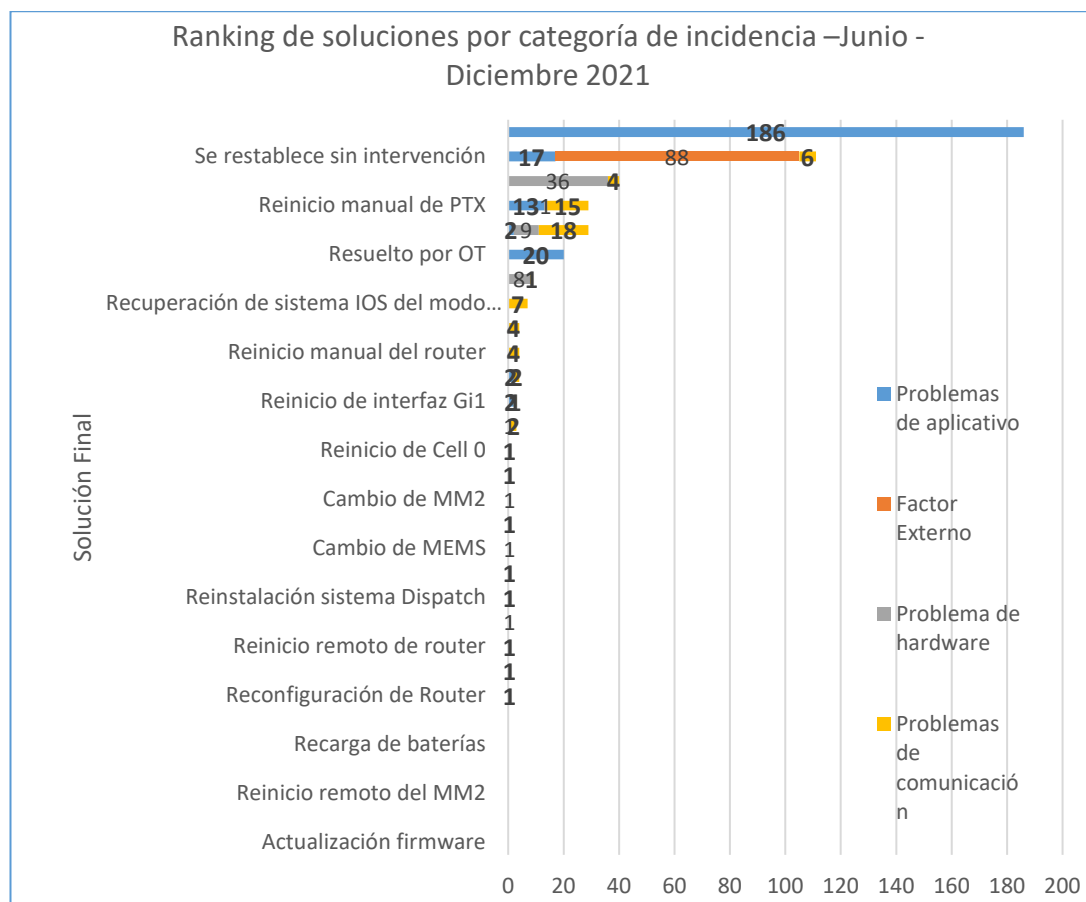


Figura 27: Ranking de soluciones aplicados. Fuente: Comtecsa (2022).

La Tabla N°14: Muestra el aumento de porcentaje en los KPI's durante los meses de julio – noviembre 2021 en los siete nodos, mostrando todos los indicadores por encima del mínimo (se detalla en la Tabla 15) desde noviembre. A continuación, se detallan los indicadores usados.

En la gestión de la red se utilizan los siguientes indicadores:

- E-UTRAN CELL AVAILABILITY (Availability): Mide el porcentaje de tiempo para evaluar la disponibilidad del servicio y el rendimiento de la red (ETSI, 2017).
- RRC CONNECTION SUCCESS RATE (Accessibility): Mide el porcentaje de conexión RRC entre UE's (Equipo usuario) y Nodos, que

es el enlace lógico que permite el intercambio de control y datos de usuario (O.R Abolade,2021).

- E-UTRAN SETUP SUCCESS RATIO (Accessibility): Mide la tasa de satisfacción de conexiones realizadas, solicitadas por el UE y por el MME (Mobility Management Entity) (ETSI, 2017).
- E-UTRAN DROP RATIO, RAN VIEW (Retainability): Muestra el porcentaje de E-RAB (servicio de transferencia de paquetes) que se cayeron ya sea por un problema en el eNB, MME u otra causa (ETSI, 2008).

TABLA 14: KPI's. Fuente: Comtecsa (2022).

KPI	INDICADOR	Mes	MÍNIMO (%)	eNB 101	eNB 111	eNB 121	eNB 131	eNB 141	eNB 151	eNB 171	PROMEDIO
AVAILABILITY	E-UTRAN CELL AVAILABILITY	Nov-21	≥99.9%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
		Oct-21		100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	98.00%	100.00%	99.71%
		Set-21		100.00%	99.00%	100.00%	100.00%	95.00%	93.00%	100.00%	98.14%
		Ago-21		100.00%	96.00%	100.00%	100.00%	92.00%	91.00%	100.00%	97.00%
		Jul-21		100.00%	94.58%	99.98%	100.00%	90.00%	87.98%	99.79%	96.05%
ACCESSIBILITY	RRC CONNECTION SUCCESS RATE	Nov-21	≥98.0%	100.00%	99.00%	100.00%	99.00%	100.00%	100.00%	100.00%	99.71%
		Oct-21		100.00%	97.00%	100.00%	98.00%	100.00%	100.00%	99.00%	99.14%
		Set-21		100.00%	96.00%	100.00%	99.00%	100.00%	100.00%	99.00%	99.14%
		Ago-21		100.00%	100.00%	100.00%	96.00%	100.00%	100.00%	100.00%	99.43%
		Jul-21		100.00%	94.58%	99.98%	90.00%	100.00%	99.98%	99.79%	97.76%
ACCESSIBILITY	E-UTRAN SETUP SUCCESS RATIO	Nov-21	≥98.0%	100.00%	100.00%	100.00%	96.00%	100.00%	100.00%	99.00%	99.29%
		Oct-21		100.00%	100.00%	100.00%	95.00%	99.00%	100.00%	98.00%	98.86%
		Set-21		100.00%	100.00%	100.00%	95.00%	99.00%	99.00%	98.00%	98.71%
		Ago-21		100.00%	100.00%	100.00%	93.00%	100.00%	100.00%	96.00%	98.43%
		Jul-21		100.00%	100.00%	100.00%	91.00%	100.00%	99.99%	96.00%	98.14%
RETAINABILITY	E-UTRAN DROP RATIO, RAN VIEW	Nov-21	≥98.0%	99.00%	100.00%	100.00%	96.00%	98.00%	97.00%	98.00%	98.29%
		Oct-21		99.00%	99.00%	100.00%	91.00%	89.00%	97.00%	91.00%	95.14%
		Set-21		100.00%	99.00%	100.00%	86.00%	91.00%	98.00%	87.00%	94.43%
		Ago-21		100.00%	100.00%	100.00%	85.00%	86.00%	90.00%	85.00%	92.29%
		Jul-21		99.69%	99.99%	99.99%	73.00%	77.00%	78.00%	83.00%	87.24%

CAPITULO IV: CONCLUSIONES

4.1 Justificación

El presente trabajo se llevó a cabo con el objetivo de mejorar la disponibilidad y el monitoreo en tiempo real de los equipos de red en la minera Las Bambas, además de reducir la ejecución de procedimientos diarios que ponían en riesgo el bienestar del personal.

La implementación de la nueva arquitectura de red permite un mejor monitoreo en los equipos de red y la identificación de incidencias en la flota, con lo cual se hubo una mejora en la disponibilidad en los equipos de red y aplicación de soluciones efectivas para mejorar la disponibilidad de la flota por medio de actualizaciones de software o parches de mejoras.

4.2 Metodología aplicada

Con la nueva red LTE se propuso mejorar la disponibilidad de los equipos de la flota pesada, reducir la cantidad de tickets e incidencias atendidas y disminuir los procedimientos y mantenimientos que se requerían en la antigua red MESH.

4.2.1 Evaluación económica

En la Tabla N° 15 se presenta el presupuesto del proyecto de implementación de la nueva red LTE, en el que cabe hacer precisiones.

- El costo de las licencias para las herramientas de monitoreo fue proporcionado por los proveedores (Nagios, Challenge Networks, Modular Mining).
- El plan de acción de la arquitectura de red fue ofrecido por TdP y Nokia.
- El costo del mantenimiento de los nodos LTE y el monitoreo del servicio 24x7 fue estimado por el proveedor Comtecsa (comunicación personal, Junio 2021),
- El costo de los equipos de red (routers y switches) fueron proporcionados por el proveedor Cisco (comunicación personal, Enero 2021),
- El costo de soporte externo para la infraestructura de la red LTE se obtuvo de los proveedores (TdP, Nokia, Italtel) (comunicación personal, Enero 2021),
- El costo de herramientas, cables auxiliares y fibra óptica fueron estimados por la empresa Comtecsa, Enero 2021.

TABLA 15: Presupuesto del proyecto.

Item	Marca	Descripción	Costo	Cantidad	Total
Mantenimiento		Mantenimiento mensual a los siete nodos LTE	\$ 8,087.50	7	\$ 56,612.50
Licencia	Nagios	Licencia de uso herramienta de monitoreo Nagios XI	\$ 1,500.00	1	\$ 1,500.00
Licencia	Challenge Networks	Licencia de uso herramienta de monitoreo LTE Network Analytics	\$ 2,000.00	1	\$ 2,000.00
Licencia	Modular Mining	Licencia de uso herramienta de monitoreo Intellimine	\$ 4,400.00	1	\$ 4,400.00
Soporte	Nokia	Soporte RAN Nokia	\$ 9,000.00	1	\$ 9,000.00
Soporte	TdP	Soporte LTE TdP	\$ 5,000.00	1	\$ 5,000.00
Soporte	Italtel	Soporte CORE Italtel	\$ 4,000.00	1	\$ 4,000.00
Instalación		Instalación de equipos de red en unidades de la flota	\$ 100.00	780	\$ 78,000.00
Elaboración	TdP, Nokia	Elaboración plan de acción arquitectura de red LTE	\$ 80,000.00	1	\$ 80,000.00
Monitoreo		Monitoreo 24x7	\$ 9,000.00	1	\$ 9,000.00
Router	Cisco	Router: IR829GW-LTE-GA-EK9	\$ 3,655.48	50	\$ 182,774.00
Router	Cisco	Router: IR809G-LTE-NA-K9	\$ 2,206.65	35	\$ 77,232.75
Switch	Cisco	Switch: ML1600 - Legacy	\$ 500.00	5	\$ 2,500.00
Switch	Cisco	Switch: WS-C3850	\$ 7,300.00	10	\$ 73,000.00
MDVR	Intelbras	MDVR-5106	\$ 280.00	150	\$ 42,000.00
Camara	TP Link	Tapo C200	\$ 35.00	150	\$ 5,250.00
Equipo		Cables auxiliares, Fibra óptica, herramientas	\$ 85,000.00	1	\$ 85,000.00
Total					\$ 717,269.25

El presupuesto anual de la contratista MMG para gestionar el proyecto de implementación de la nueva red LTE y migración de equipos de red fue aproximadamente \$ 2,150,000.00

La tabla N°16 corresponde al presupuesto estimados anual para mantener el servicio, por el equipo de gerencia de costos y presupuestos TI de Las Bambas. Se consideran 120 equipos MDVR y cámaras instalados y una reserva para 30 de una futura compra, total de 150 por cada ítem.

TABLA 16: Presupuesto del proyecto anual.

Item	Descripcion	Costo	Duracion (Meses)	Total
Mantenimiento	Mantenimiento mensual a los siete nodos LTE	\$ 56,612.50	12	\$ 679,350.00
Licencia	Licencia de uso herramienta de monitoreo Nagios XI	\$ 1,500.00	12	\$ 18,000.00
Licencia	Licencia de uso herramienta de monitoreo LTE Network Analytics	\$ 2,000.00	12	\$ 24,000.00
Licencia	Licencia de uso herramienta de monitoreo Intellimine	\$ 4,400.00	12	\$ 52,800.00
Soporte	Soporte RAN Nokia	\$ 9,000.00	12	\$ 108,000.00
Soporte	Soporte LTE TdP	\$ 5,000.00	12	\$ 60,000.00
Soporte	Soporte CORE Italtel	\$ 4,000.00	12	\$ 48,000.00
Monitoreo	Monitoreo 24x7	\$ 9,000.00	12	\$ 108,000.00
			Total	\$1,098,150.00

El costo de la implementación de este proyecto es \$717,269.25 equivalente al 33.3613% del total de la inversión del proyecto y el costo de mantenimiento del servicio durante un año es de \$1,098,150.00 equivalente al 51.07674% del total de la inversión del proyecto.

4.2.2 Evaluación técnica

En el (Anexo 6), se presenta la infraestructura instalada la topología RAN y CORE de la minera Las Bambas, la comunicación entre sites y los switches (Underground Mining Working Group, 2019). La infraestructura instalada en la RAN comprende de modulo FLEXI – FSMF, un módulo MW Nokia, cuatro bancos de baterías y un módulo rectificador – ELTEK, como se muestra en la figura N° 28.

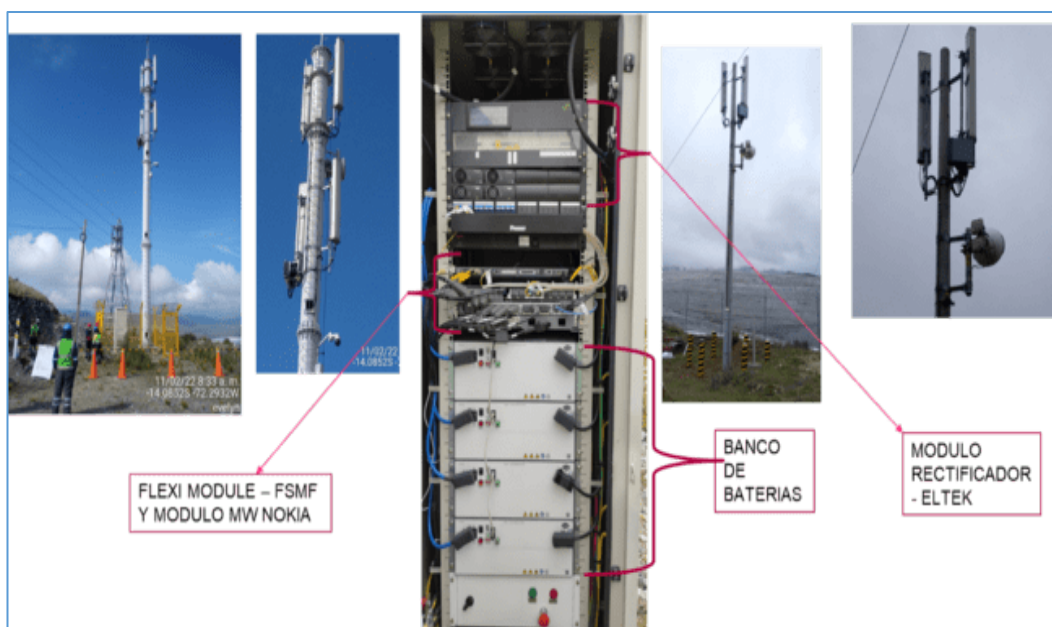


Figura 28: Infraestructura instalada RAN. Fuente: Comtecsa (2020).

En la figura N° 29 se muestra el diagrama de disposición de los equipos de red, donde se puede observar los bancos de baterías, el tablero PDP y rectificador.

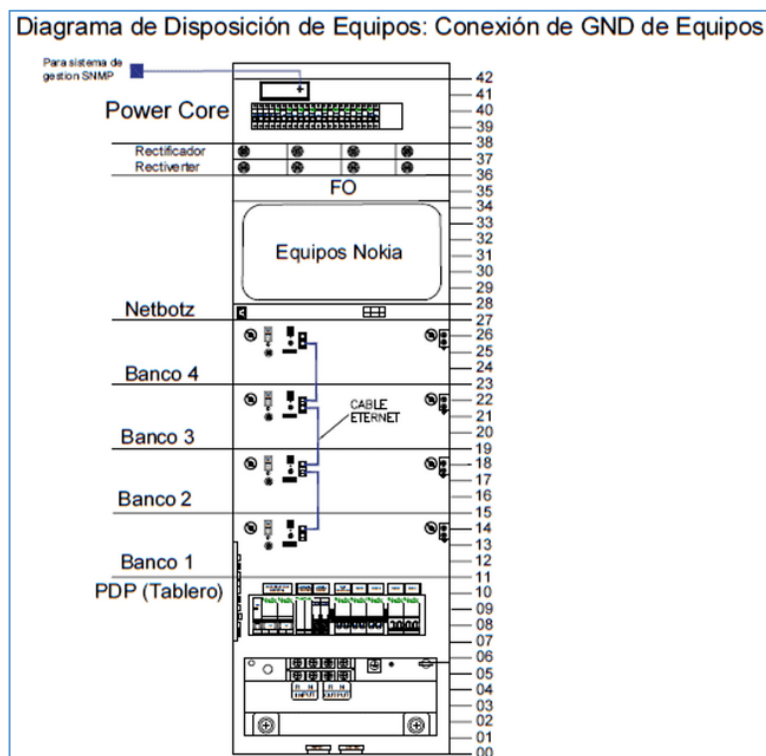


Figura 29: Diagrama de hardware RAN- RU. Fuente: Comtecsa (2020).

Para el monitoreo de la disponibilidad en los equipos de la flota se usan herramientas de registro y monitoreo como Titan Master de NetNumber e ISE Manager de Cisco que permiten registrar SIM Cards y asignarles una IP para el monitoreo del equipo. CN LTE Network es una herramienta de Challenge Network que actúa como repositorio de datos y nos muestra las gráficas de desempeño de los equipos de red y servidores, estos datos son dados por los nodos LTE y los routers que están en las unidades de flota, como se muestra en la figura N° 30.

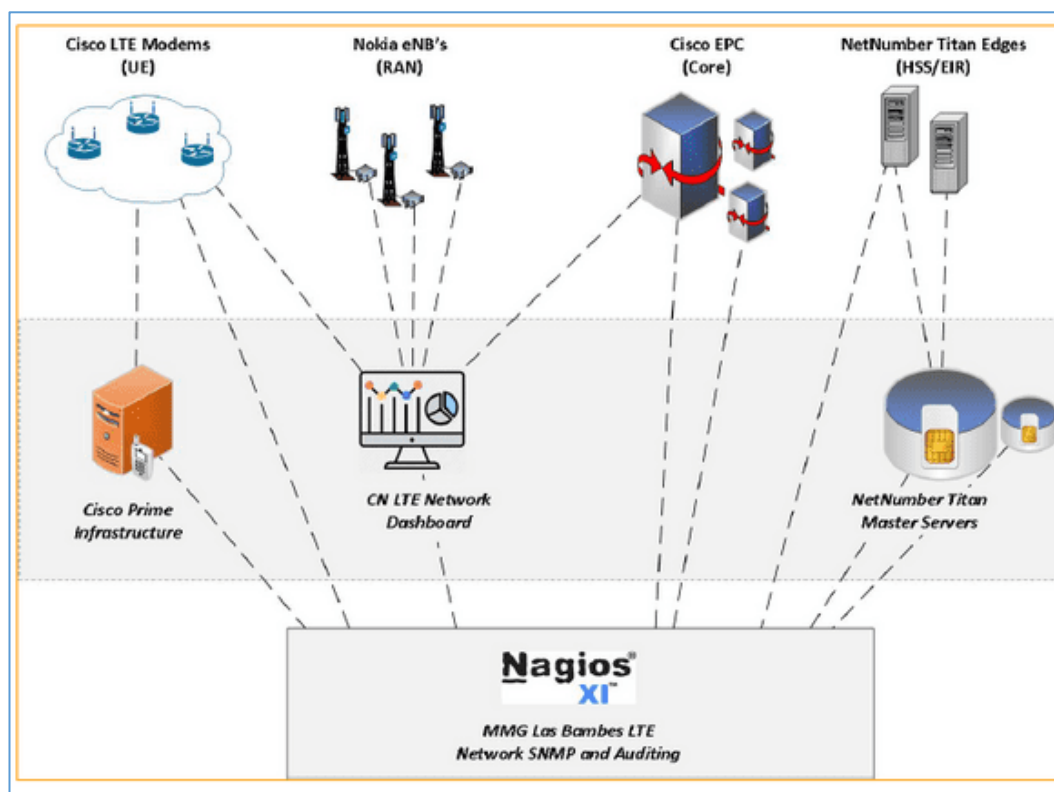


Figura 30: Infraestructura instalada software. Fuente: Comtecsa (2020).

Los datos de las herramientas antes mencionadas confluyen en la herramienta de monitoreo Nagios XI, donde se puede observar en tiempo real los estados de los equipos de red, así como su tráfico y disponibilidad. Para la migración de equipos ver el (Anexo 7). En la siguiente imagen, se observa los equipos de red instalados en las unidades de flota para el monitoreo, los routers se comunican por radioenlace a los eNB's. Se asigna una SIM Card con la IP del router y se le acoplan periféricos como el MDVR CCTV para el monitoreo remoto, la pantalla PTX Dispatch para que el operario pueda observar las asignaciones y estados de la unidad y el MEMS para localización GPS.

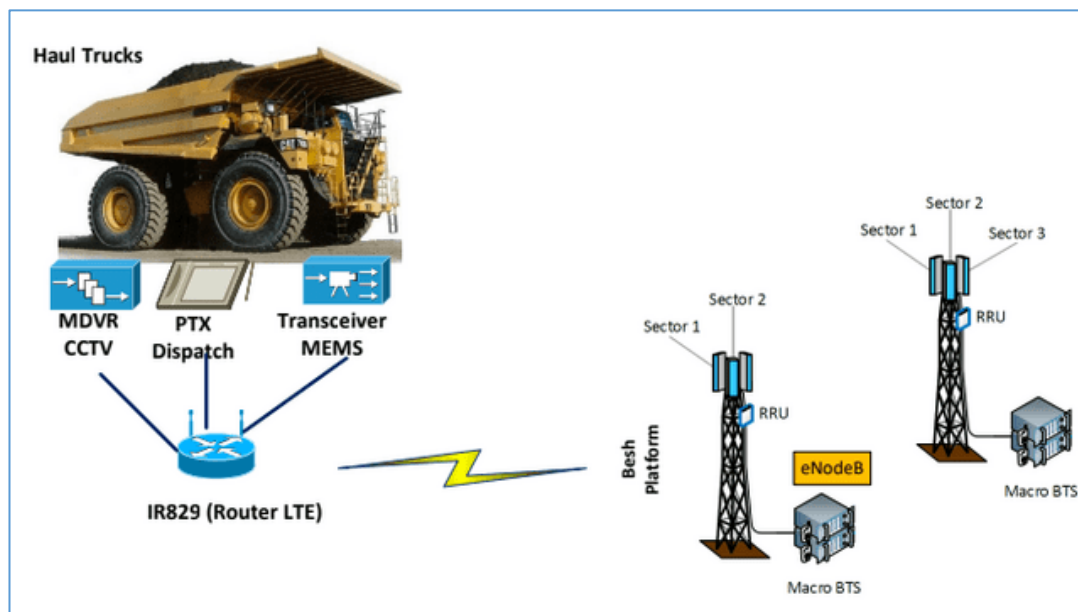


Figura 31: Equipos instalados en las unidades de flota. Fuente: Comtecsa (2020).

El router LTE se comunica en su recorrido a los sites LTE de acuerdo con la cobertura de cada site LTE, los datos recolectados por los sites se observan en las herramientas de monitoreo. Desde la implementación de la nueva red LTE se observó que los tickets de incidencias se redujeron alrededor de un 50% en agosto del 2021 y continuó disminuyendo hasta llegar a 176 tickets en enero 2022, apenas 38% de los tickets de julio de 2021, como se observa en la figura N° 32.

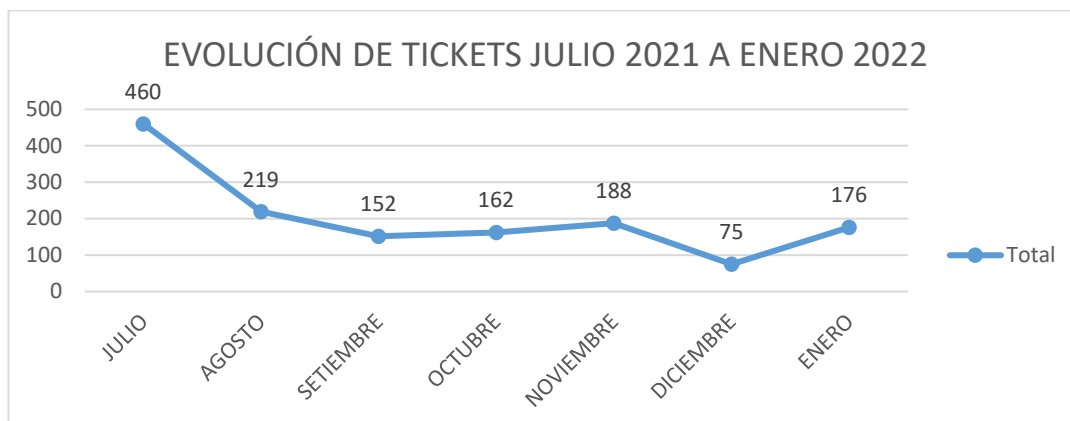


Figura 32: Numero de tickets atendidos por mes. Fuente: Comtecsa (2022).

Se puede observar en la figura N° 33, que desde se finalizó con los trabajos de migración e implementación de la red LTE la disponibilidad de los nodos fue creciendo hasta llegar al 100% en la mayoría de los nodos y manteniéndose estable.

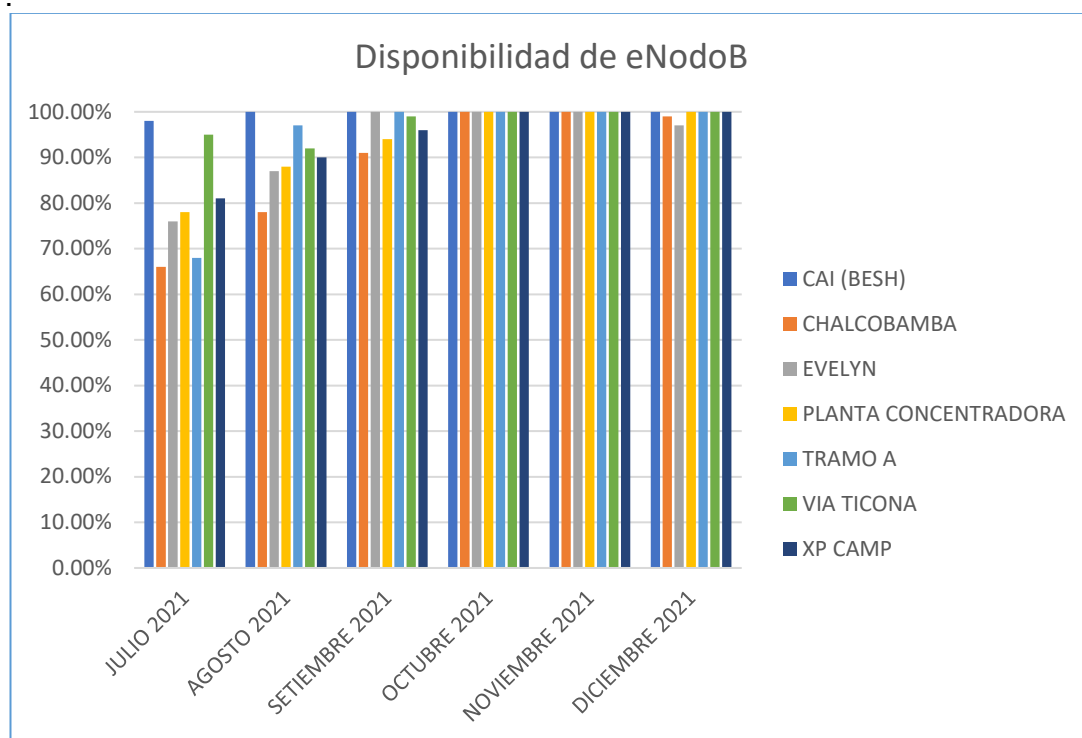


Figura 33: Disponibilidad de eNodeB por mes. Fuente: Comtecsa (2022).

4.3 Conclusiones

- La implementación de la nueva arquitectura de red LTE permitió mejorar la disponibilidad y el monitoreo de los equipos de red y la aplicación de soluciones efectivas en la minera Las Bambas, aumentaron los porcentajes mensuales de conexión, superando el 80% de disponibilidad en los nodos y se redujo la cantidad de incidencias en los equipos de red en un 20% disminuyendo los estados de inoperatividad en las unidades.
- La mejora en la identificación de las incidencias en la flota, impactó favorablemente en la realización de los trabajos de reparaciones, reduciendo la cantidad de tickets e incidencias atendidas y disminuir los trabajos de mantenimiento, frecuentes en la antigua red MESH.
- La elección del protocolo de interconexión EIGRP como protocolo de enrutamiento dinámico para la interconexión de la red LTE con los dispositivos de la mina mostro mejoras de tiempos de reconexión entre los equipos de red y los nodos, como se observa en la tabla de los indicadores clave de rendimiento (KPI's) y el porcentaje de conexión, RRC Connection success rate, se incrementó.
- La Implementación de procedimientos de configuración, operación y mantenimiento. garantiza el buen funcionamiento de los equipos inalámbricos de la red.
- Se han reducido los errores de configuración de los equipos de red mediante pruebas de conectividad, operatividad y simulaciones. Como se evidencio en el apartado de pruebas de conectividad con los periféricos, migración de equipos de red y detección de fallas en equipos de comunicación.

CAPITULO V: RECOMENDACIONES

- Es conveniente hacer un análisis de los estados de operatividad de las unidades de flotas, para verificar, si hay relación con la migración hacia la nueva red LTE o actualizaciones implementadas.
- Se recomienda verificar la plataforma y versión de las pantallas de las unidades de flota, para reducir el número de incidencias de comunicación, debido a que las actualizaciones o parches aplicados en el software de las pantallas, puede alterar la configuración aplicada en los equipos de red.
- Es conveniente optimizar la detección de incidencias, mediante un buen uso de las herramientas de monitoreo y de las plataformas existentes, como filtrar incidencias o la creación de dashboards para obtener mejores resultados.

CAPITULO VI: BIBLIOGRAFIA

Abolade, R., Okandeji, A., Onaifo, F. , Oyedeji, A. (2021) *A performance evaluation of 4g mobile network*. Research Gate.

Agyapong, J., Tchao, T., Gadze, D. (2018) *Performance Evaluation of a Deployed 4G LTE Network*. Research Gate.

Cisco (2019) *Wi-Fi 6 and Private LTE/5G Technology and Business Models in Industrial IoT*. Cloud Managed.

ETSI (2017) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements*. 3GPP TS 36.214 version 14.3.0 Release 14.

ETSI (2008) *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management*. 3GPP TS 36.133 version 8.2.0 Release 8.

Hytera (2021) *Comunicaciones críticas convergentes para minería*. Hytera

IGF (2021) *Impact of new mining technologies on local procurement in the Democratic Republic of the Congo*. ISSD.

Jang, H., Topal, E. (2020) *Transformation of the Australian mining industry and future prospects*. Research Gate.

Las Bambas (2019) *Sustainability report 2019*. MMG.

Nokia (2019) *Industrial-grade private wireless for Industry 4.0 applications*. GSMA.

Oguntoyinbo, J. (2013) *The Future of LTE: The Femtocells perspective*. [Tesis maestría, Universidad Aalto]. Core. <https://core.ac.uk/download/pdf/80710971.pdf>

Rockwell Automation (2015) *Implementación de servicios de identidad dentro de una arquitectura Ethernet convergente en la planta*. Rockwell automation.

Rockwell Automation (2011) *Converged Plantwide Ethernet (CPwE) Design and Implementation Guide*. Rockwell automation.

Smith, S., Darwhekar, I., Blakley, J. (2022) *Segmenting Latency in a Private 4G LTE Network*. Research Gate.

Underground Mining Working Group (2019) *Underground mine communications infrastructure guidelines*. GMGGroup.

CAPITULO VII: ANEXOS

ANEXO 1:

Configuración de la capa 2 - Layer 2 Tunneling Protocol: Permite la interconexión entre Capa 2 y Capa 3, se configuran los routers de capa 2 y 3 con la siguiente jerarquía de accesos, por parte de Cisco y Comtecsa.

```
[edit access]
address-pool pool-name {
    address address-or-prefix;
    address-range low <lower-limit> high <upper-limit>;
}
profile profile-name {
    authentication-order [ authentication-methods ];
    client client-name {
        chap-secret;
        l2tp {
            interface-id;
            maximum-sessions-per-tunnel number;
            ppp-authentication (chap | pap);
            shared-secret;
        }
        pap-password pap-password;
        framed-ip-address ip-address;
        framed-pool framed-pool;
        interface-id interface-id;
        primary-dns primary-dns;
        primary-wins;
```

ANEXO 2:

Comandos XML interface eNodeB: Configuración de protocolo BFD en los nodos, para implementar la tecnología de reconocimiento de errores en los routers, realizada por Cisco y Nokia.

```
<managedObject class="BFD" distName="MRBTS-60013/LNBTS-
60013/FTM-1/IPNO-1/BFD-1" operation="create" version="FL16A">
  <p name="bfdActivation">true</p>
  <p name="bfdAdminUp">true</p>
  <p name="bfdDestAddress">10.51.54.1</p>
  <p name="bfdDetectMult">3</p>
  <p name="bfdGrp"/>
  <p name="bfdSourceIpAddr">10.51.54.2</p>
  <p name="bfdSourceUdpPort">3784</p>
  <p name="bfdType">singleHopBFD</p>
  <p name="desMinTxInt">500</p>
  <p name="reqMinRxInt">500</p>
</managedObject>

<managedObject class="BFD" distName="MRBTS-60013/LNBTS-
60013/FTM-1/IPNO-1/BFD-2" operation="create" version="FL16A">
  <p name="bfdActivation">true</p>
  <p name="bfdAdminUp">true</p>
  <p name="bfdDestAddress">10.51.54.33</p>
  <p name="bfdDetectMult">3</p>
  <p name="bfdGrp"/>
  <p name="bfdSourceIpAddr">10.51.54.34</p>
  <p name="bfdSourceUdpPort">3784</p>
  <p name="bfdType">singleHopBFD</p>
  <p name="desMinTxInt">500</p>
  <p name="reqMinRxInt">500</p>
</managedObject>
```

ANEXO 3:

Plan de acción integración Firewall: **Implementación realizada en conjunto con Cisco, Nokia y Comtecsa. En primer lugar, se verifica la existencia y se tomaron nuevos resguardos de las configuraciones de los dispositivos involucrados:**

Se ha extraído la startup-config y la running-config de los SWs Core de la red Industrial. Esto se deberá realizar previo a los trabajos de Integración.

Se verificó la disponibilidad de nivel de licenciamiento IP Services en el Core de la red Industrial

Se verifica el nivel de licenciamiento de los SWs Core PELABSWN01 y PELABSWN02

Se verificó la habilitación del enrutamiento del routing en el Core de la red Industrial.

Con el comando **Show running-configuration** se verifica que no esté habilitado el **ip routing**, para tal efecto ingresar el comando **ip routing** en la configuración global

Se creó instancias de enrutamiento VRF para cada una de las redes en ámbito industrial.

Se crean las VRF solicitadas:

```
(config)# ip vrf Mine-Fleet    // Se necesita crear las VRF: Mine-Fleet,
Geotechnics y LWS
```

```
(config-vrf)#rd X:1          // X: Sistema Autónomo (EIGRP)
```

Se creó interfaces capa 3 (SVI) por cada una de las redes deseadas en ámbito industrial.

Se crean las Vlan necesarias en el Core, se incluyen las Vlans dentro de las interfaces troncales, así como en el Port channel.

Nota: Deben haberse definido antes las interfaces troncales y su encapsulamiento, si no es así, aplicar los comandos:

```
(config-if)# switchport mode trunk
(config-if)# switchport trunk encapsulation dot1q
```

Se configuró la HSRP entre los dispositivos de Core de AntaWasi y MCR para todas las redes.

Por ser HSRP un protocolo de balanceo de carga estático, se debe realizar un análisis de tráfico previo para seleccionar las VLANs que irán (mientras no se presenten fallos) por el SWN01 y cuales irán por el SWN02.

Se creó un proceso de routing EIGRP en el Core de la red industrial y se asoció las redes correspondientes. Se utilizó la segmentación mediante address-family para asignar las diferentes VRFs. De esta manera se obtuvieron tablas de enrutamiento independientes por red, además de la tabla global. Se publicó el protocolo solamente en las interfaces estrictamente necesarias, pertenecientes a la red industrial.

Para las comunicaciones se usa el protocolo EIGRP en la red Corporate e Industrial, ver la figura N° 34.

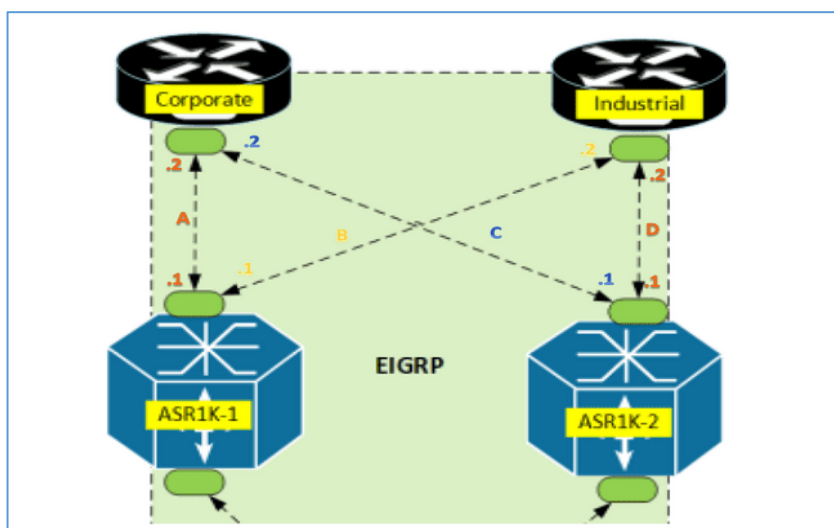


Figura 34: Comunicación ASR1K y red Corporate e Industrial. Fuente: TdP (2019).

ANEXO 4:

Procedimiento de configuración en los switches core industriales para su integración con la red lte, por parte de Comteca:

Configuraciones:

- Switch Core PELABSWN02 con funciones de capa 3.
- Habilitación del puerto 80 y mejora de seguridad con el Firewall (PELABFW01-A).
- Habilitación de protocolo HSRP (previene fallos de red cuando hay varios routers instalados) entre ambos Switches Core.
- Habilitación de VLAN y VRF's (permite segmentar los servicios y equipos para un mejor control de los equipos) para la integración con la LTE.
- Switch Core PELABSWN01 con funciones de capa 3(capa de red).
- Habilitación del puerto 80 con el Firewall (PELABFW01-B) .
- Habilitación de protocolo HSRP(previene fallos de red cuando hay varios routers instalados) entre ambos Switches Core.
- Habilitación de VLAN y VRF's (permite segmentar los servicios y equipos para un mejor control de los equipos) para la integración con la LTE.
- Habilitación del puerto 90 para la interconexión con el Router LTE ASR1k-1.
- Habilitación de EIGRP(protocolo de enrutamiento) para el enrutamiento entre las redes MIND-LTE.
- Habilitación de VLAN y VRF's (permite segmentar los servicios y equipos para un mejor control de los equipos) para la integración con la red MIND-LTE.

ANEXO 5:

Pruebas de conectividad con los periféricos: En la red LTE se dispone de dos tipos de Router cisco: IR829GW-LTE-LA-NK9 e IR809G-LTE-LA-K9, cada uno de estos dispone de configuraciones distintas para operar, ambas realizan el mismo tipo de routing a través de la red.

Los dispositivos IR829 son usados para la implementación en camiones, Palas, Perforadoras y Cisternas de agua, mientras que los dispositivos IR809 son implementados en los equipos auxiliares: Tractor a ruedas, Auxiliar Dozer, Motoniveladora, manipulador de cables y estaciones (Geotecnia, SEM y LWS). Estos router son actualizados en el laboratorio de COMTECSA a una versión de IOS estable (15.6-3 M8) y versiones de firmwares actualizados.

Una vez el router se encuentra configurado y la simcard aprovisionada, se realizan pruebas de conectividad y troubleshooting con los periféricos, realizando la simulación de un PTX, MM2 u otro periférico con una laptop, comprobando conexión con el pool de ip asignado, de igual manera se comprueba la conexión por SSH con el router y desde servidor LTE a los periféricos. Esto se hace desde el servidor LTE a través de la herramienta SecureCRT y ping continuo, para reducir las problemas de compatibilidad y configuración en los equipos de red de la flota:

Comprobación de operatividad de equipo en la flota

Una vez que el equipo encargado ha realizado la instalación en el camión, Pala, Perforadora u otro equipo, se confirma el buen funcionamiento verificando conexión remota con el router y sus periféricos desde el servidor LTE, de la misma manera se verifica funcionamiento del Gps con la herramienta Dispatch como se muestra en la figura N° 35, la conectividad de la red y a que red está conectada)

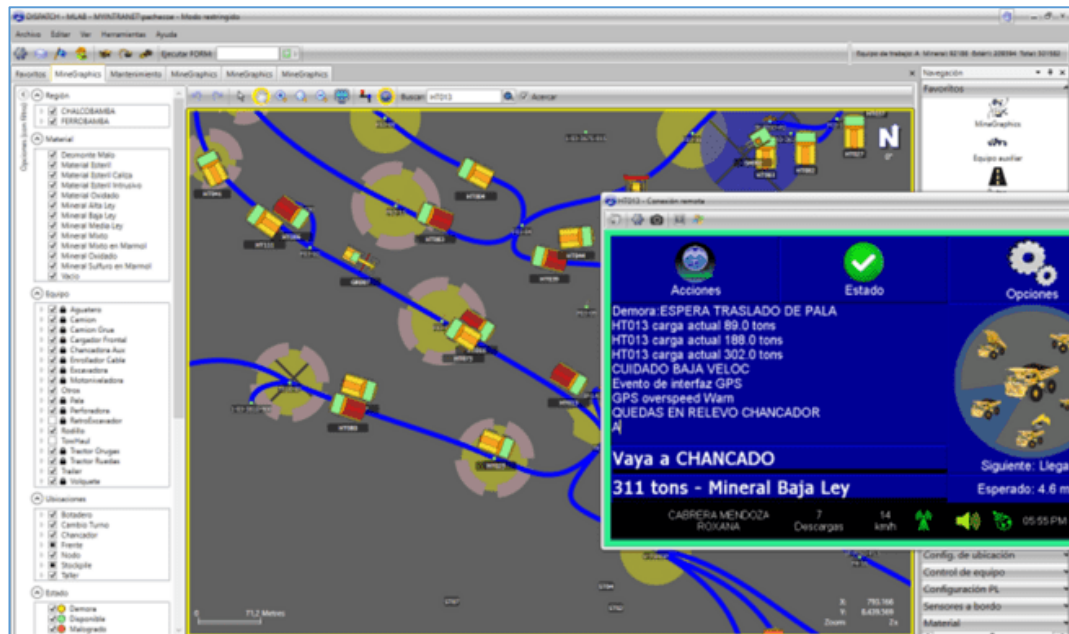


Figura 35: Comprobación de operatividad de equipo en flota. Fuente: Comtecsa (2022).

Asignación del equipo implementado al monitoreo

Una vez que se verifica la implementación exitosa, se asigna a “Nagios XI” (Software de monitoreo en tiempo real de equipos de red) el dispositivo para su monitoreo diario como se muestra en la siguiente figura, donde se aprecia a todos los equipos con conectividad.

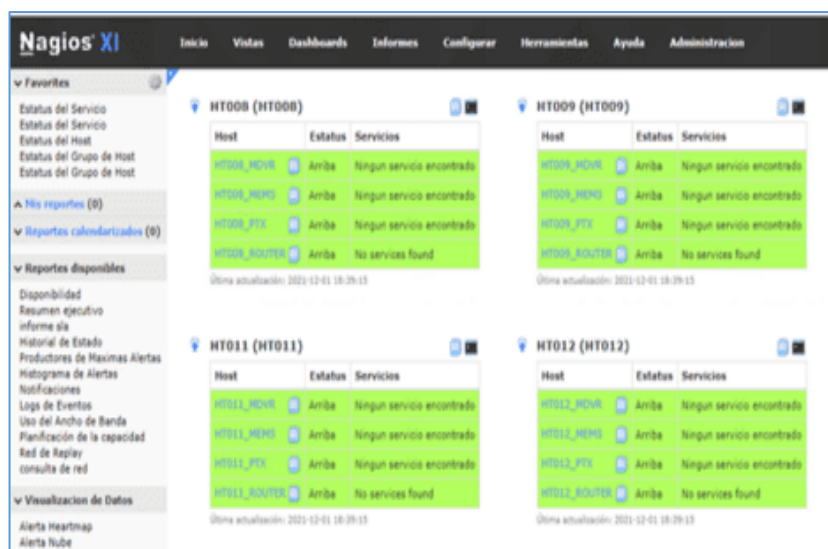


Figura 36: Equipos asignados a la herramienta de monitoreo NagiosXI.

Fuente: Comtecsa (2022).

Conexión remota con las antenas de LTE en el NOC

Instalación y configuración de la VPN: Se ingresa a la carpeta LTE y se instaló el software mediante el archivo dado por el fabricante, Una vez realizada la instalación se configuro con la siguiente IP: 181.65.244.218. Con esta configuración se pudo estar en la misma red de los equipos de LTE. En la siguiente figura se muestra la interfaz de instalación de Forticlient, programa de Fortinet (empresa de seguridad en redes).

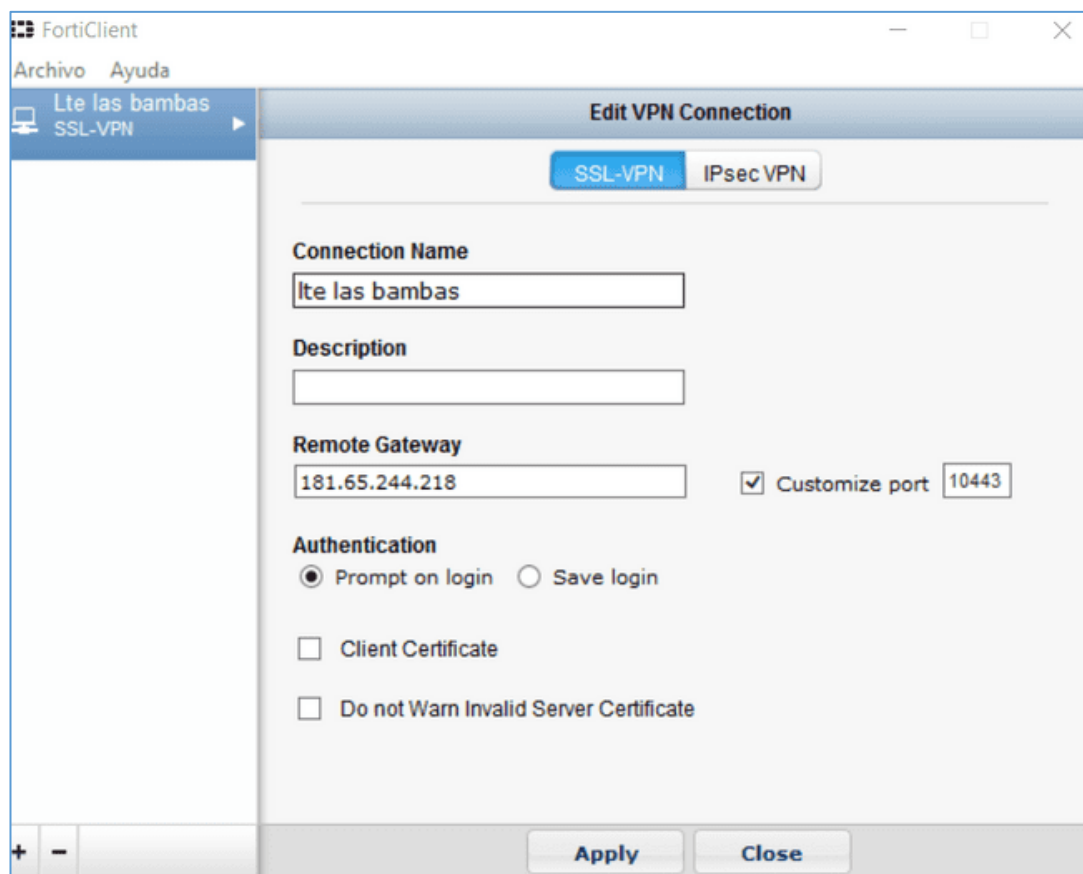


Figura 37: Configuración del VPN. Fuente: Comtecsa (2021).

Realizada la configuración, el aplicativo solicita las credenciales. Si las credenciales son aceptadas se mostrará la siguiente ventana donde se muestra el estado de la conexión. En la barra de tareas también se ve el estado de la conexión en el icono del FortiClient. Finalmente, se procede a instalar el software BTS Site Manager dado por Nokia. Al terminar la instalación aparecerá el siguiente cuadro en donde se deben colocar la dirección IP del equipo a monitorear y las credenciales de acceso al BTS.

Anexo 6:

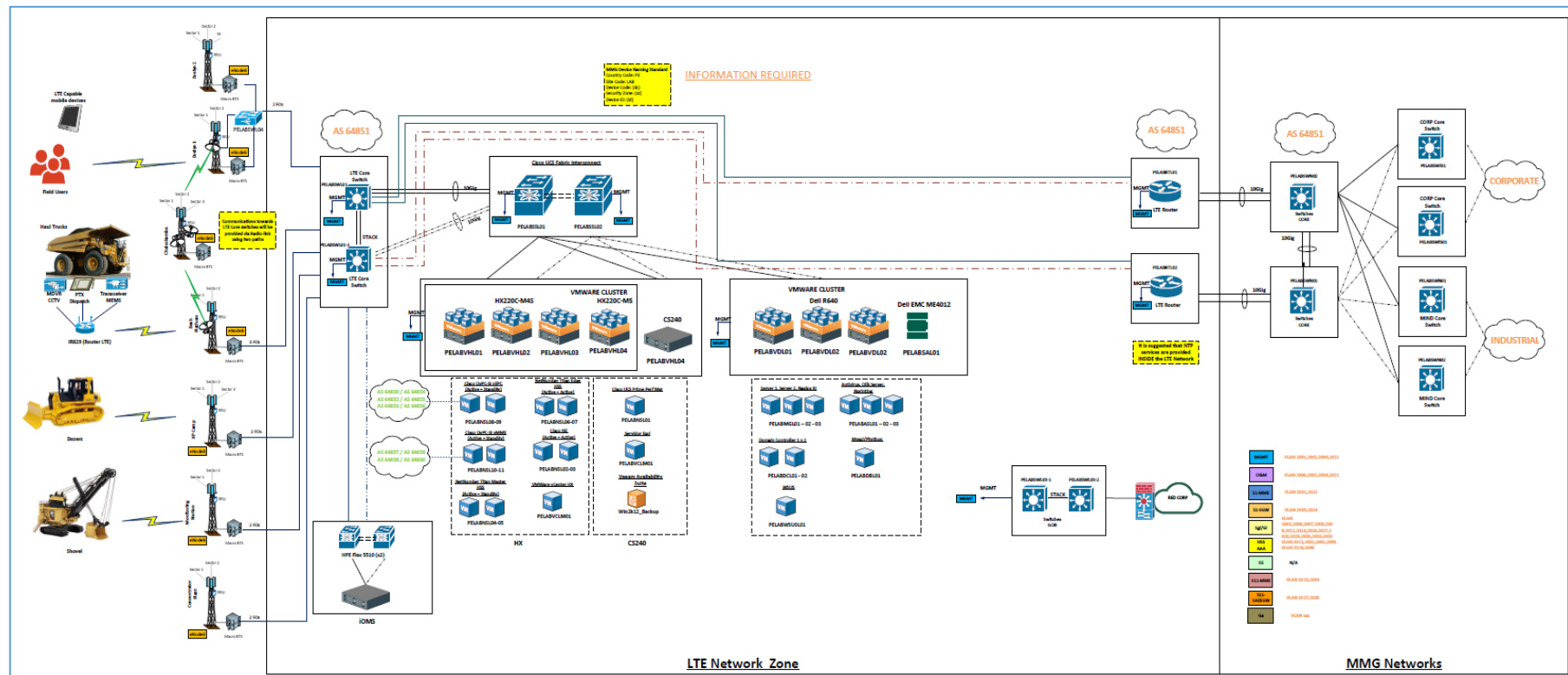


Figura 38: Topología RAN y CORE. Fuente: MMG (2020).

Anexo 7:

Migración de equipo de red: Se realizó la Migración de servicios y aplicaciones críticas de la operación hacia la Red LTE para mitigar errores de compatibilidad en equipos de red, como se muestra en la figura N° 39.

Se migraron los siguientes equipos:

- Flota de mina (Minefleet): 131 equipos
- Sub-estaciones móviles de energía (SEM's): 6 SEM .
- Estaciones de monitoreo geotécnico (GEOTECH): 27 equipos.
- Sistema Easyfuel: 5 cisternas.
- Sistemas de tormentas LWS: 5 equipo.

Con el objetivo de garantizar la continuidad operativa de la mina y minimizar los obstáculos en la productividad.



Figura 39: Migración de equipos a la nueva red LTE. Fuente: Comtecsa (2022).