

MINERÍA · OPERACIONES AUTÓNOMAS · CONECTIVIDAD

La Red Fija el Techo de la Mina Autónoma

Por qué la conectividad —no los camiones ni el software— es la restricción que limita la autonomía a escala: las tres redes que en realidad estás construyendo, y qué decisiones te dejan varado en tres años

AUDIENCIA

Líderes de TI/OT,
innovación y
automatización minera

FOCO

Conectividad resiliente
para minería autónoma

REGIÓN

LATAM

Contenido

01	La Decisión Que Pone Techo a la Autonomía	3
02	Qué Significa “La Red” de Verdad en un Rajo	4
03	La Red Que Funcionó Hasta Que Se Encendió la Telemetría	5
04	Tres Redes, No Una	7
05	Para la Capa de Acceso, Construye Sobre lo Que tu OEM Validó — Malla Primero, 5G en Ascenso	9
06	El Backbone Es un Cañón de Ancho de Banda	10
07	La Tercera Red: Redundancia, o Dejas la Producción a la Suerte	12
08	Cuando la Geografía Deja de Importar	13
09	La Pregunta Que Hacer Antes de Firmar	14
10	La Asimetría de Esperar	15
11	Apuestas Que Envejecen Mal	16
12	Qué Verificar en tu Propia Operación	17
13	Ideas Clave	19
14	Fuentes	20

01

LA DECISIÓN QUE PONE TECHO A LA AUTONOMÍA

El camión autónomo no es la decisión que determina si tu mina se vuelve autónoma. Tampoco lo es el software de gestión de flota. La decisión que fija el techo es la red de comunicaciones, y la mayoría de las operaciones mineras la elige para el caso de uso que tienen enfrente hoy, lo que las condena a rehacerla dentro de tres años. En NTT DATA acompañamos a operaciones mineras precisamente en esta decisión —diseñar la red para la mina que la autonomía exigirá, no para el piloto que se firma— y el patrón que vemos repetirse es el que esta pieza desarma.

Seamos precisos con la afirmación, porque es fácil sobrevenderla. La red, por sí sola, no vuelve autónoma a una mina: los camiones, la capa de gestión de flota, las personas y la disciplina operacional también tienen que estar bien. Lo que hace la red es fijar el *techo*: es la restricción vinculante que decide, en silencio, hasta dónde puede escalar todo lo demás. Un programa de autonomía brillante sobre una red subdimensionada se estanca en una fracción de su diseño. La red rara vez se lleva el crédito cuando la autonomía funciona, y casi siempre es lo que la limita cuando no.

Ese techo incomoda al hablarlo, porque la red es la partida que nadie pelea. El sistema de acarreo autónomo, o AHS¹, tiene comité directivo. El software de despacho y gestión de flota tiene prueba de concepto y comparación de proveedores. La red tiene un mapa de cobertura, un precio por kilómetro cuadrado y una firma. Se la trata como plomería. Plomería es exactamente lo que no es.

La autonomía es un problema de control en tiempo real distribuido a lo largo de un rajo que se mueve. Cada máquina autónoma es un nodo que debe ser visto, comandado y corregido de forma continua. Cada sensor que alimenta un enclavamiento de seguridad, cada cámara que permite a un operador remoto tomar el control, cada canal de voz que conecta a una persona en el rajo con una persona en una sala de control, viaja sobre la misma infraestructura física. Los camiones y el software se compran de un catálogo. La red es lo que decide cuántos de ellos puedes correr a la vez, desde qué distancia, y si la operación entera sobrevive el día en que se corta una sola fibra.

¹AHS — Autonomous Haulage System (sistema de acarreo autónomo).

IDEA CLAVE — La red no es lo que vuelve autónoma a una mina; es la restricción vinculante que fija el techo de hasta dónde puede escalar la autonomía. Elegirla para el caso de uso de hoy te deja varado mañana.

Esta pieza sostiene una sola cosa, y vuelve a ella en cada sección: la red es la restricción vinculante de la autonomía a escala, y son **tres** redes, no una. Un lector podría reducir esto a “compra más ancho de banda” o “compra 5G privado”. Ese no es el argumento. El argumento es arquitectónico. Se trata de qué capas estás comprometiendo: si tu capa de acceso coincide con lo que tu proveedor de autonomía realmente validó, si tu backbone tiene un camino de migración a transporte óptico antes de que llegue la densidad de sensores de mañana, y si ese backbone tiene un segundo camino de regreso, independiente, para el día en que el primero falle. El ancho de banda es un número. Esto es una decisión sobre la forma —y la supervivencia— de la operación.

Las minas que se equivocan en esto no lo hacen por comprar equipos baratos. Se equivocan porque dimensionaron la red al piloto y firmaron antes de que alguien preguntara qué necesitaría la mina cuando la autonomía dejara de ser un piloto.

02

QUÉ SIGNIFICA “LA RED” DE VERDAD EN UN RAJO

Empecemos por el sustrato, porque “la red” es una abstracción que esconde el verdadero problema de ingeniería.

Imagina una operación de cobre a rajo abierto. El piso del rajo cae varios cientos de metros bajo la corona. Los bancos descienden en terrazas, y las frentes de trabajo se mueven en cada turno a medida que avanza el plan minero. Las rampas de acarreo zigzaguean por las paredes. No hay geometría fija: el lugar donde necesitabas cobertura el mes pasado ya está extraído, y el lugar donde la necesitarás el mes que viene todavía no existe. El polvo, las tronaduras, el material particulado diésel y el acero por todas partes degradan la propagación de radiofrecuencia. La línea de vista es un lujo que el terreno revoca constantemente.

Sobre esa superficie se te pide instalar una red de grado control. No una red para que alguien revise el correo cerca del taller. Una red que transporta comando y control relevante para la seguridad de máquinas que pesan cientos de toneladas y se mueven sin una persona en la cabina. Cuando un camión autónomo pierde su enlace, no se desliza por inercia. Entra en estado seguro y se detiene. Un camión que se detiene en el lugar equivocado detiene a los camiones detrás, y un ciclo de acarreo frenado se mide en toneladas por hora de producción perdida. La cobertura no es una métrica de conveniencia. Es una métrica de disponibilidad, y la disponibilidad es producción.

Ahora agrega la segunda realidad que la compra suele pasar por alto. Las máquinas en el rajo son solo la primera mitad del sistema. La otra mitad es todo lo que el rajo envía a otra parte:

a una sala de control, cada vez más a un centro de operaciones remoto, o ROC², que puede estar en una ciudad regional a decenas o cientos de kilómetros. Video de alta definición para que un operador remoto supervise e intervenga. Flujos de sensores que alimentan analítica e inferencia de IA. Voz. Telemetría para los historiadores y los planificadores. La red del rajo lo recolecta todo. Algo más tiene que sacarlo.

Y después agrega la realidad que la compra ignora por completo, hasta el día en que no puede: ese "algo más" es un solo camino, y los caminos se cortan. La fibra se quema en un incendio, la secciona una excavadora, o la roban por el metal. Cuando el camino de regreso cae, cada máquina autónoma en el rajo queda ciega ante las personas que la supervisan, a la vez. La tercera pregunta —qué pasa cuando el backbone falla— es la que nadie hace al firmar y todos hacen a las 2 de la mañana.

IDEA CLAVE — Son tres redes, no una: la red de acceso en el rajo, el backbone hacia el centro de operaciones remoto, y un camino redundante e independiente para ese backbone. La mayoría construye la primera, subdimensiona la segunda y olvida la tercera.

Sostén esas tres en mente, porque todo el argumento de esta pieza vive en cómo difieren. La primera es la red que las máquinas tocan. La segunda es la red por la que viajan los datos una vez que las máquinas terminaron con ellos. La tercera es la red que existe para el día en que la segunda muere. Tienen físicas distintas, proveedores distintos y modos de falla distintos, y casi nunca las compra la misma persona con el mismo horizonte a la vista.

03

LA RED QUE FUNCIONÓ HASTA QUE SE ENCENDIÓ LA TELEMETRÍA

En una operación de cobre del norte de Chile que acompañamos, vimos esta secuencia de cerca. Los detalles a continuación están combinados y anonimizados, pero el patrón es uno que hemos visto repetirse, y que los líderes de conectividad de la región reconocerán de inmediato.

La operación corría acarreo autónomo a escala —una flota completa, bastante más de cincuenta camiones, con una capa de gestión de flota y una malla inalámbrica auto-reparable a lo largo de los bancos activos. Funcionaba. La malla sostenía los enlaces de las máquinas a través de los zigzags, y se cumplían las metas de disponibilidad. El punto que importa es lo que el acarreo autónomo realmente necesita mover: posición, despacho, comandos de gestión de tráfico, telemetría básica de salud. Unos pocos cientos de kilobits por máquina

²ROC — Remote Operations Center (centro de operaciones remoto).

—liviano, a ráfagas, poco exigente. La red había sido dimensionada y cotizada exactamente para eso, más un salto corto a una sala de control al borde del rajo. Se desempeñó precisamente como se especificó, y el caso de negocio cerró.

Entonces la operación buscó el siguiente nivel de valor, y dos cosas cambiaron a la vez. Primero, la sala de control se movió —de una cabina al borde del rajo a un centro de operaciones remoto en la ciudad regional, a unos 120 kilómetros, donde era más seguro, más fácil de dotar de personal y más barato mantener especialistas. Segundo, y decisivo, los datos cambiaron de carácter. Se encendieron telemetría en tiempo real y video en vivo de alta definición en las máquinas que más generan —los equipos de perforación sobre todo, cuyos datos de penetración, firmas de vibración y múltiples cámaras corren continuos, a alta tasa, e implacables. Ya no eran unos pocos cientos de kilobits de comandos por máquina. Era tráfico multimedia sostenido, agregado y sensible a la latencia, apuntado al centro remoto en la ciudad.

La malla del rajo absorbió todo. Agrega máquinas, agrega nodos, y la capa de acceso escaló como fue diseñada. La mitad que no había sido diseñada era el camino de salida.

Salió a la luz, como suelen salir estas cosas, en medio de un turno de noche. Un martes de fines de marzo de 2024, alrededor de las 2 de la mañana, final del verano del hemisferio sur, la temporada de polvo aún sin romperse. La carga completa de telemetría y video estaba en vivo por primera vez. En el centro remoto, el video de supervisión empezó a entrecortarse. Se cayeron cuadros. La latencia del enlace trepó y dio picos. Cuando un operador remoto intentó tomar control manual de una máquina marcada por un obstáculo, la toma de control llegó demasiado tarde —pasó el umbral que el caso de seguridad tolera—, y el sistema hizo lo que está diseñado para hacer. Estranguló. Las máquinas entraron suavemente en estados seguros. La producción de ese turno se concilió a la mañana siguiente contra un número que nadie quería presentar.

La malla de acceso del rajo no era el problema. Tenía capacidad de sobra. El problema era el backbone hacia la ciudad: un enlace heredado de microondas que había sido perfectamente adecuado para comandos y una sala de control cercana. Comandos y posición caben en una fracción de su capacidad. Telemetría en tiempo real y video de perforación, agregados a través de la operación entera y transportados los 120 kilómetros hasta la ciudad, le pidieron de golpe muchas veces más de lo que ese enlace jamás había llevado, sostenido y sin pausa³. El enlace no podía con eso. Y este es el punto que el VP necesita oír: no había configuración, ni ajuste, ni proveedor que lo arreglara sin reconstruirlo. El techo era físico.

Lo resumimos en su momento sin rodeos, y lo repetimos aquí porque captura el patrón entero: la red corría los camiones bien —se cayó el día en que se encendieron la telemetría en tiempo real y el video en vivo en los equipos de perforación.

La remediación no fue un ejercicio de ajuste. Fue una reingeniería del backbone: fibra donde se pudo zanjar, y una capa de transporte diseñada para video e inferencia agregados en lugar de para comandos —una partida de capital de varios años que nunca había aparecido en el caso de negocio original de autonomía. La red fue elegida correctamente para el caso de uso del día en que se compró; estaba equivocada para la operación en la que tenía que convertirse.

³En concreto: el enlace de microondas heredado movía unos pocos cientos de megabits; la carga agregada de telemetría en tiempo real y video pedía bastante más de un gigabit por segundo sostenido, con bajo jitter, las 24 horas —un salto de orden de magnitud que ningún ajuste cubre.

IDEA CLAVE — El backbone corre la autonomía básica sin problema y se cae el día en que enciendes telemetría en tiempo real y video de las perforadoras: esos son los datos que no caben.

Ese es el momento de reconocimiento sobre el que está construida esta pieza. La falla no fue incompetencia. Cada decisión individual era defendible en su momento. La falla fue un problema de horizonte, y un problema de horizonte disfrazado de decisión de compra es el más caro de todos, porque parece terminado el día en que lo firmas.

04

TRES REDES, NO UNA

El patrón se generaliza, y nombrarlo con precisión es el primer paso práctico.

Toda mina conectada que persigue la autonomía está construyendo tres redes distintas, incluso cuando cree que construye una. Las dos primeras son capas funcionales; la tercera es lo que mantiene viva a la segunda.

La primera es la **red de acceso en el rajo**. Es la capa que las máquinas, las personas y los sensores realmente tocan. Su trabajo es cobertura móvil de grado control sobre un terreno que cambia en cada turno, con comportamiento auto-reparable a medida que los nodos se mueven y los enlaces se rompen y se reforman. Su física es la física de la radiofrecuencia: propagación, interferencia, traspaso, latencia en el borde. Su restricción dominante es la cobertura confiable en movimiento. Esta es la "última milla" de la mina —solo que aquí la última milla es móvil, y se mueve en cada turno.

La segunda es el **backbone hacia el centro de operaciones remoto**. Es la capa que transporta la salida agregada del rajo hacia donde viven las personas y el cómputo. Su trabajo es mover flujos grandes, sostenidos y de bajo jitter a distancia: video de alta definición de muchas máquinas a la vez, tráfico de inferencia de IA, voz, telemetría, consolidados y apuntados al ROC. Su física es la física del transporte: capacidad, latencia a distancia, jitter. Su restricción dominante es el throughput agregado a latencia acotada.

La tercera es el **camino redundante del backbone**: un segundo camino de regreso, físicamente independiente, para que un solo corte en el transporte primario no saque del aire a toda la operación. Su trabajo no es capacidad ni cobertura —es supervivencia. Su física es la física de la *diversidad*: dos caminos que no comparten poste, ni corredor vial, ni ducto, e idealmente ni medio, de modo que lo que mate al primero no pueda matar al segundo. Su restricción dominante es la independencia. Esta red no hace nada en un buen día. Es la única que importa en el peor.

Figura 1 · El modelo de tres redes: una capa de acceso en el rajo (máquinas autónomas, personas, sensores) alimentando un punto de agregación; una capa de transporte de backbone que lleva video, inferencia y voz consolidados al centro de operaciones remoto; y

un segundo camino redundante, físicamente diverso, que protege ese backbone. La mayoría de las compras especifica la capa de acceso por completo, subdimensiona el backbone y omite del todo el tercer camino.

La razón por la que esta distinción importa es que las tres capas fallan de maneras opuestas y en calendarios opuestos. La capa de acceso se degrada de forma grácil y visible: una brecha de cobertura en un banco nuevo es obvia, y el arreglo es otro nodo. El backbone falla de forma invisible y luego catastrófica en capacidad: transporta comandos y telemetría básica bien, y luego se satura en el momento en que se encienden telemetría en tiempo real y video en vivo, sin arreglo incremental disponible. Y el backbone falla *totalmente* ante un solo evento físico —un incendio, un corte, un robo— a menos que un segundo camino ya esté en el suelo y ya esté cargando nada más que disponibilidad para intervenir.

Los criterios de compra empeoran todo esto. Las preguntas estándar que se le hacen a una red minera son cobertura y costo: cuánto del rajo alcanza, y cuánto cuesta por kilómetro cuadrado. Ambas preguntas interrogan la capa de acceso. Ninguna interroga si el backbone podrá transportar telemetría en tiempo real y video dentro de tres años, y ninguna pregunta qué le pasa a la operación cuando el backbone se secciona. Los criterios optimizan la única capa fácil de arreglar e ignoran las dos imposibles de arreglar barato una vez que chocaste el muro.

IDEA CLAVE — No todo techo de autonomía es la red. A veces el cuello está en el planificador de flota, o es una brecha organizacional disfrazada de red. Antes de gastar, una pregunta lo separa: cuando la autonomía se estanca, ¿el backbone está saturado o al treinta por ciento?

Antes de seguir, una salvedad honesta sobre este modelo. No todo estancamiento de la autonomía es un techo de red. A veces el planificador de gestión de flota es el cuello de botella y el enlace está apenas utilizado. A veces el problema es una brecha organizacional o de competencias disfrazada de red. Hay una prueba de una sola pregunta que separa la restricción real de las que se le parecen: cuando la autonomía se estanca, ¿el enlace del backbone está saturado, o está al treinta por ciento? Si está saturado, tienes el problema estructural del que trata esta pieza. Si está ocioso, tu techo está en otra parte, y rehacer la red no lo va a mover. Diagnostica antes de gastar.

05

PARA LA CAPA DE ACCESO, CONSTRUYE SOBRE LO QUE TU OEM VALIDÓ — MALLA PRIMERO, 5G EN ASCENSO

La elección de la red de acceso es el único lugar en toda esta decisión donde no tienes que apoyarte en opiniones, en el posicionamiento de un proveedor, ni en tu propio benchmarking. Los fabricantes de equipos de autonomía, u OEM⁴, ya hicieron la validación, y la publicaron.

Esto importa porque la red de acceso no es una compra genérica de conectividad. Es un sistema de seguridad de grado control del que la flota autónoma depende para comando, corrección y comportamiento de detención segura. El OEM que construye las máquinas autónomas tiene un interés directo en qué tecnología inalámbrica transporta ese tráfico de control, y los serios han certificado proveedores específicos contra sus plataformas de autonomía. La señal a leer no es el folleto de un proveedor. Es a qué proveedor le puso su nombre el fabricante de tu máquina.

El registro es específico:

Tabla 1 Tabla 1 · Lo que los OEM de autonomía realmente validaron. Komatsu certificó Rajant Kinetic Mesh para FrontRunner AHS (2022) y corre FrontRunner sobre LTE privado dedicado desde 2019; Caterpillar completó la validación in-house del inalámbrico Rajant para Cat MineStar Command for Hauling (2023), con la validación en producción en faena como siguiente paso anunciado; Epiroc construyó capacidad de conectividad adquiriendo Radlink, y Rajant está validado para las perforadoras autónomas de Epiroc, incluyendo Los Bronces en Chile. Fuentes en el bloque de Fuentes.

OEM DE AUTONOMÍA	PLATAFORMA DE AUTONOMÍA	CONECTIVIDAD VALIDADA
Komatsu	FrontRunner AHS	Rajant Kinetic Mesh (certificado 2022); LTE / 5G privado (Nokia/Sedna) como camino cualificado
Caterpillar	Cat MineStar Command for Hauling	Rajant Kinetic Mesh, validado por Caterpillar (2023)
Epiroc	Acarreo y perforación autónomos agnósticos	Radlink (adquirido); Rajant validado para perforadoras autónomas

Lee esa tabla con cuidado, porque tiene una trampa. Rajant, Radlink y RADWIN son tres empresas distintas. Los nombres riman; los roles no. Rajant es el proveedor de malla certificado por Komatsu y validado por Caterpillar para acarreo autónomo. Radlink es la capacidad de conectividad que Epiroc adquirió para soportar su autonomía agnóstica. RADWIN es

⁴OEM — Original Equipment Manufacturer (fabricante de equipo original).

una empresa aparte que ofrece banda ancha inalámbrica punto-a-multipunto, o PtMP⁵. Confundirlas es el tipo de error que termina en un documento de compra, e importa porque la validación del OEM se adhiere a proveedores específicos, no a la categoría.

Y aquí entra el 5G —honestamente, como jugador de primera línea, no como nota al pie. El celular privado ya no es el futuro de la capa de acceso; está llegando ahora. Komatsu corre FrontRunner AHS sobre LTE privado dedicado desde una cualificación de un año en 2019, y en 2025 un despliegue de FrontRunner de Komatsu en Nevada Gold Mines se convirtió en el primer despliegue de producción de FrontRunner AHS en EE.UU., soportado por una red 5G privada hecha a medida (Sedna y Nokia). Newmont, tras un piloto de 5G privado con Ericsson en su operación Cadia, dio luz verde al 5G privado en todos sus sitios Tier-1 a nivel global —un despliegue que abarca operaciones desde Australia y Papúa Nueva Guinea hasta México, Surinam y Ghana. Los estándares hacen creíble la dirección: la última generación de 5G industrial ya apunta a tiempos de respuesta y a una confiabilidad lo bastante exigentes como para que una máquina pesada acepte órdenes de control sobre celular sin margen para el titubeo⁶. Lo que esto significa para la operación es concreto: el 5G privado deja de ser solo conectividad general y empieza a calificar para el tráfico de control que antes solo la malla certificada podía cargar.

Plantea el estado con precisión, porque un especialista lo hará. Hoy, la malla sigue siendo la red de control *predominantemente validada* para acarreo autónomo crítico para la seguridad, y el 5G privado es la alternativa *en ascenso y cada vez más cualificada* —ya en producción para algunas plataformas, co-desplegado para conectividad general, video e IIoT en otras. Esto no es “el 5G reemplazó a la malla”. Es “el conjunto validado se está ampliando de malla a malla-y-celular-privado, y la operación inteligente sigue ambos”. La mirada de integración es la correcta: la autonomía a escala es un matrimonio de tecnologías —malla certificada donde el tráfico de control lo exige, LTE/5G privado donde la capacidad y la densidad de dispositivos lo exigen— y la capa de acceso cada vez corre ambas.

Así que la regla de la capa de acceso es estrecha y firme. Para el inalámbrico de grado control del que dependen tus máquinas autónomas, parte de la lista validada de tu OEM de autonomía —malla hoy, y el camino de celular privado que tu OEM haya cualificado— y trata las desviaciones como riesgos que debes justificar, no como defaults que puedes asumir. La validación es la ingeniería más cara que nunca tendrás que pagar. Úsala.

06

EL BACKBONE ES UN CAÑÓN DE ANCHO DE BANDA

Si la capa de acceso es un problema resuelto con respuesta publicada, el backbone es el no resuelto, y es donde realmente se fija el techo de la autonomía.

⁵PtMP — Punto-a-Multipunto (topología inalámbrica de banda ancha en la que un hub sirve a muchos extremos).

⁶URLLC — Ultra-Reliable Low-Latency Communication, el conjunto de funciones 3GPP (desde el Release 16) que apunta a ~1 ms de latencia de plano de usuario con confiabilidad de hasta “seis nueves”; su integración con redes sensibles al tiempo (TSN) es el camino que permite al 5G acoplarse al control industrial determinista.

Piensa en el backbone como un cañón. El rajo agrega todo lo que la operación autónoma produce y lo dispara hacia el centro de operaciones remoto: video de alta definición de decenas de máquinas en simultáneo, el tráfico de inferencia de analítica y visión por computador, voz de todos los conectados a la operación, y telemetría encima. Esto no es la telemetría modesta y a ráfagas de un mundo SCADA⁷, donde un sensor reporta un valor cada pocos segundos. Esto es tráfico multimedia sostenido, de alto volumen y sensible a la latencia, muchos flujos a la vez, todos apuntados en la misma dirección al mismo tiempo.

La aritmética es implacable, y conviene traducirla a la única unidad que importa en un comité: una sola máquina bajo supervisión remota carga varias cámaras, y a fidelidad alta una sola máquina demanda más subida sostenida que la que una operación entera consumía en la era de los comandos⁸. Multiplica eso por los equipos de perforación y una flota de acarreo de muchas decenas de máquinas, suma cámaras fijas, analítica e inferencia, y el backbone pasa de transportar un goteo a transportar un torrente, sin pausa, las 24 horas. La autonomía básica pide una fracción de eso. Esa es exactamente la trampa: un backbone dimensionado para comandos parece suficiente justo hasta el día en que se encienden la telemetría y el video, y entonces no lo es por un orden de magnitud.

Figura 2 · El cañón de ancho de banda: decenas de flujos de video de alta definición, inferencia y voz se agregan en el rajo y se disparan por el backbone hacia el centro de operaciones remoto. El techo de throughput-sostenido-a-latencia-acotada del backbone, no la malla de acceso, es lo que limita hasta dónde puede escalar la autonomía.

Por esto la urgencia de actuar ahora es real y no retórica. La densidad de sensores y la fidelidad de video están ambas subiendo, y suben más rápido de lo que la telemetría jamás subió. Cámaras de mayor resolución, más cámaras por máquina, más máquinas bajo supervisión remota, percepción a bordo más rica alimentando inferencia centralizada. Cada una de esas tendencias carga el backbone, no la malla de acceso. La operación que dimensiona su transporte para la telemetría de hoy lo está dimensionando contra la única variable garantizada de crecer.

A cargas sostenidas de gigabit-y-subiendo sobre decenas o cientos de kilómetros, con límites duros de latencia y jitter porque un operador remoto debe poder tomar el control a tiempo, el backhaul heredado de microondas se queda sin espacio. La respuesta honesta de ingeniería es el transporte óptico: fibra y, donde el futuro se construye deliberadamente, fotónica. El techo de las operaciones autónomas no se fija en el último salto inalámbrico al camión. Se fija en el camino de salida del rajo.

⁷SCADA — Supervisory Control and Data Acquisition (supervisión, control y adquisición de datos).

⁸A fidelidad de grado broadcast, una sola máquina puede demandar del orden de veinte a treinta megabits por segundo de subida sostenida solo para video, antes de telemetría e inferencia. La autonomía básica —comandos y posición— pide unos pocos cientos de kilobits por máquina.

07

LA TERCERA RED: REDUNDANCIA, O DEJAS LA PRODUCCIÓN A LA SUERTE

Un backbone dimensionado para el cañón de ancho de banda resuelve la capacidad. No hace nada por la supervivencia. Un solo camino de fibra que carga un gigabit de video de supervisión sigue siendo un solo camino de fibra —y un solo camino es un único punto de falla para toda la operación autónoma. Esta es la red que la compra omite, y es la que los ingenieros de conectividad con experiencia tratan como no negociable: el backbone necesita un segundo camino de regreso, independiente. La capa de acceso no. La asimetría es el punto entero.

¿Por qué el backbone y no la última milla? Por el radio de impacto. Una brecha de cobertura en un banco afecta a una máquina en una frente; agregas un nodo y sigues. Un backbone seccionado afecta al cien por ciento de todo a la vez: control de supervisión de AHS, SCADA, video, voz, seguimiento de personal, planificación —todo, en simultáneo, para la operación entera, por todo el tiempo que tome la reparación. El backbone es el único punto a través del cual la mina entera le habla a las personas que la operan. Concentración de riesgo es concentración de consecuencia. Endureces lo que falla más fuerte.

Y los backbones en minería fallan de maneras que no son raras ni exóticas. Fallan por fuego: buena parte de la fibra de larga distancia va tendida aérea sobre líneas de postes, y la fibra aérea en un corredor de incendio no se degrada por calor, se destruye —los recubrimientos poliméricos y la chaqueta que mantienen unido un cable fallan a temperaturas que un frente de llama de incendio forestal supera muchas veces. En febrero de 2024, los incendios de la región de Valparaíso en Chile dejaron 226 antenas de comunicaciones fuera de servicio solo en esa región (según la SUBTEL), entre daño directo del fuego y cortes de energía; los operadores aún restablecían el servicio días después. Fallan por robo: el cable se roba por su metal, y las cuadrillas que pelan cobre rutinariamente seccionan la fibra que va agrupada al lado —un patrón de ataque que ha subido lo suficiente como para que la industria ahora lo registre como una categoría propia. Y fallan, lo más común de todo, por el golpe burdo de una excavadora a través de un tendido enterrado. Fuego, robo y la retroexcavadora: tres formas de perder el camino de regreso, ninguna de las cuales un caño más grueso previene.

IDEA CLAVE — El backbone necesita redundancia; la última milla no. Un solo corte de backbone ciega a la operación entera a la vez, y la fibra aérea está expuesta a incendio, robo de cable y excavadora. Sin un segundo camino físicamente diverso, corres la producción a la suerte.

La redundancia que funciona tiene una regla, y es implacable: **los dos caminos no deben compartir destino**. Dos fibras en la misma zanja, en la misma línea de postes, o por el mismo corredor vial no son redundancia —son un solo camino que cuesta el doble, porque el incendio o la excavadora que toma una toma ambas. La diversidad real significa una ruta geográficamente separada e, idealmente, un medio distinto, de modo que el evento que mate al primario no pueda alcanzar al secundario. Aquí la integración tecnológica se vuelve concreta: el backbone primario es fibra óptica; el camino redundante puede ser una segunda ruta de fibra diversa, un enlace de microondas licenciado por otra geografía, un salto de 5G privado o inalámbrico fijo, o —cada vez más viable en los Andes y el Atacama remotos donde no llega ninguna ruta terrestre— un enlace satelital de órbita baja, o LEO⁹. Los servicios LEO hoy entregan latencia de ida y vuelta en las decenas bajas de milisegundos y cientos de megabits por terminal —ancho de banda amplio para mantener video de supervisión, SCADA y tráfico de gestión visibles y bajo control seguro durante una caída del primario, aunque no sea el camino para control de sub-diez milisegundos. En Chile y Perú, los operadores ya empaquetan conectividad LEO exactamente para este rol de operaciones remotas.

Bien ingenierizado, el cambio a respaldo es invisible para la operación. El tráfico salta al camino sobreviviente más rápido de lo que un operador remoto alcanza a notar —más rápido que el margen de latencia que una toma de control ya tolera¹⁰— de modo que un corte de backbone se vuelve un evento registrado en vez de un turno detenido. El punto no es que nada se rompa nunca. El punto es que cuando el camino primario se quema, se corta o se roba, la operación autónoma sigue hablando con su centro remoto por el segundo camino, y la producción no se va a oscuras mientras una cuadrilla de reparación maneja doscientos kilómetros de desierto para encontrar el corte.

08

CUANDO LA GEOGRAFÍA DEJA DE IMPORTAR

La fibra óptica sube el techo del backbone. La fotónica cambia para qué sirve el backbone. La distinción merece una sección, porque replantea toda la decisión de “cuánto ancho de banda aprovisiono” a “dónde tiene que estar la operación de verdad”.

⁹LEO — Low Earth Orbit (órbita terrestre baja), la clase de constelaciones satelitales (p. ej. Starlink) con latencia de decenas bajas de milisegundos, apta para tráfico de supervisión y gestión.

¹⁰En topologías de anillo, los esquemas de conmutación de protección mueven el tráfico al camino sobreviviente en bastante menos de una décima de segundo —por debajo del presupuesto de latencia que una toma de control de supervisión ya tolera.

La iniciativa IOWN de NTT se construye en torno a una All-Photonics Network, o APN¹¹: una arquitectura que empuja la fotónica de punta a punta en lugar de convertir entre dominios óptico y electrónico en cada salto. Las metas publicadas a 2030 son deliberadamente agresivas: 100 veces la eficiencia energética, 125 veces la capacidad de transmisión, y un doscientosavo de la latencia de punta a punta de la infraestructura actual. Plantea el estado epistémico con claridad, porque el especialista lo hará: estas son metas a 2030, una dirección de avance con números puestos, no mediciones que puedas hacer en un rajo hoy. Lo que no es una meta es la disponibilidad. La All-Photonics Network es comercial desde marzo de 2023 a través de NTT East y West. La dirección es real, y ya embarcó.

Lo que la hace relevante para una mina es la latencia, no la capacidad de titular. Cuando la latencia de punta a punta colapsa hacia los límites físicos, la pregunta de dónde residen físicamente el dato y la inferencia deja de importar. El cómputo remoto empieza a comportarse como si fuera local. Eso no es un eslogan; se está demostrando. En un ensayo de IOWN APN, video de un robot de inspección controlado remotamente fue transmitido unos 700 kilómetros, de Okayama a Tokio, dentro de 500 milisegundos de latencia. Trátalo como lo que es: una demostración, una señal direccional de lo que el transporte fotónico hace factible, no un nivel de servicio de producción garantizado para tu enlace específico. La dirección que señala es lo que la hace digna de actuar.

Para una mina, el cómputo libre de geografía no es una abstracción. Significa que el centro de operaciones remoto no tiene que estar cerca del rajo, y la inferencia tampoco. Puedes ubicar las cargas de IA donde el cómputo sea más barato, donde la energía sea más verde, donde la gobernanza sea más limpia, o donde ya viven tus especialistas, y aun así supervisar máquinas en el rajo como si el cómputo estuviera en el borde. El backbone deja de ser un costo que minimizas y se vuelve una opción que ejerces: la operación decide dónde vive su inteligencia, en vez de que se lo dicte la velocidad de la luz sobre cobre.

Aquí también el reclamo adyacente queda limpiamente separado. Un backbone construido para el cañón de ancho de banda es necesario, y la fibra resuelve el problema de capacidad. Un camino redundante resuelve el problema de supervivencia. El transporte fotónico resuelve un tercer problema, distinto: vuelve la *ubicación* del cómputo una elección en vez de una restricción. El primero evita que la autonomía se estanque. El segundo evita que se quede a oscuras. El tercero decide cuán barato y cuán bien puedes correr la inteligencia detrás de ella durante la próxima década.

09

LA PREGUNTA QUE HACER ANTES DE FIRMAR

Todo lo anterior se reduce a un solo diagnóstico que el lector puede correr antes de comprometerse a cualquier compra de red. Es deliberadamente incómodo, porque la versión cómoda de la pregunta es la que deja varadas a las operaciones en tres años.

¹¹APN — All-Photonics Network, la arquitectura de fotónica de punta a punta en el núcleo de la iniciativa IOWN de NTT.

PREGUNTA DE DIAGNÓSTICO *¿Dimensionamos el backbone para la densidad de sensores y video de mañana, a autonomía de plena densidad, con la sala de control en la ciudad —y le damos un segundo camino físicamente diverso— o lo dimensionamos para la telemetría de hoy, sobre un solo camino, con la sala de control del piloto cruzando el rajo?*

La razón por la que esta pregunta es decisiva es causal, y vale la pena nombrar el tipo de falla con precisión, porque el diagnóstico determina la cura. La reconstrucción a tres años no es, en el fondo, una falla de conocimiento que mejor información disuelva. Es estructural, arraigada en los incentivos de cómo se compran las redes mineras. El capital se justifica por caso de uso. El piloto justifica una red tamaño piloto. La cobertura y el costo son los criterios porque son los criterios que el proceso de compra sabe evaluar. El horizonte es corto porque el caso de negocio que libera el dinero es corto. Esos incentivos no cambian porque alguien lea un whitepaper.

Pero la falla es estructural solo hasta el momento de la decisión. En el momento de firmar, es completamente corregible, porque el comprador puede replantear los criterios antes de que el contrato cierre. Después de firmar, la física estructural toma el control y la reconstrucción se vuelve inevitable. Esa es la asimetría que el diagnóstico expone: una pregunta que no cuesta nada hacer hoy previene un programa de capital que cuesta años ejecutar mañana. La ventana en la que el problema es barato de arreglar es la ventana antes de la firma.

Así que las preguntas para llevarle al integrador el lunes no son “¿esta red cubre el rajo?”. Por supuesto que cubre el rajo; eso es lo mínimo. Las preguntas son el diagnóstico de arriba, y los seguimientos que lo hacen concreto: muéstrame la subida agregada sostenida que este diseño soporta a autonomía de plena densidad; muéstrame el camino de migración a transporte óptico y fotónico; y muéstrame el segundo camino de regreso, físicamente diverso, y cuán rápido toma el relevo cuando el primero se corta. Si esas respuestas no están en la propuesta, la propuesta está dimensionada para hoy, sobre un solo camino.

10

LA ASIMETRÍA DE ESPERAR

Trata la decisión como la apuesta asimétrica que es, porque planteada correctamente la elección se responde sola.

El costo de construir para mañana ahora es un premio incremental sobre una red que vas a comprar de todos modos: transporte diseñado para tráfico multimedia agregado en vez de telemetría, una capa de acceso tomada de la lista validada de tu OEM de malla y celular privado, un segundo camino físicamente diverso para el backbone, y una ruta de migración

contratada a 5G privado y a un backbone fotónico. Es una partida más grande en un plan de capital que ya estás aprobando. Está acotada, se conoce al firmar, y se gasta una vez.

El costo de construir para hoy y reconstruir después es ilimitado en las formas que importan. Es el programa de capital de varios años en el que entró la operación del norte de Chile: un backbone reingenierizado bajo presión de producción, después de chocar el muro, después de que un turno de noche ya se concilió contra un número que nadie quería presentar. Es el programa de autonomía estancado en una fracción de su flota diseñada mientras se reconstruye el camino de salida del rajo. Es el turno perdido por un solo corte de fibra que un segundo camino habría vuelto un no-evento. Es la opción estratégica que nunca llegaste a ejercer, porque la operación que no puede escalar la autonomía sobre la red que tiene es la operación que mira a un competidor escalar sobre la red que construyó.

IDEA CLAVE — Construir el backbone para mañana (capacidad, redundancia y un camino de migración) es un premio acotado que se gasta una vez; reconstruirlo después es un programa de varios años gastado bajo presión de producción.

La asimetría es el argumento entero para actuar ahora en vez de después. Un premio pagado una vez, al firmar, contra una reconstrucción pagada en años, bajo presión, con la producción en juego. La mina que trata la red como plomería paga la segunda factura. La mina que la trata como la decisión de infraestructura que pone techo a la autonomía paga la primera, y se queda con sus opciones.

11

APUESTAS QUE ENVEJECEN MAL

Refuerza el argumento por negación. Hay cuatro apuestas de conectividad que parecen prudentes al firmar y envejecen hacia la obsolescencia, y son mecanismos distintos, no variaciones de uno.

La primera es **la apuesta cerrada: lock-in monovendor**. Comprometer toda la red, acceso y backbone, al stack propietario de un solo proveedor se siente como simplicidad y un solo cuello que apretar. Envejece mal porque la autonomía es multivendor por naturaleza. Tu OEM de acarreo, tu OEM de perforación y tu capa de analítica no se van a estandarizar todos sobre la hoja de ruta de un solo proveedor de conectividad, y el día en que necesites integrar equipos que el proveedor no anticipó, el lock-in que simplificó la compra se vuelve la restricción que pone techo a la operación. El mecanismo es dependencia: externalizaste tu techo a la estrategia de producto de otro.

La segunda es **la apuesta prestada: depender solo de espectro no licenciado**. Las bandas no licenciadas son gratis, disponibles y perfectamente útiles hasta que el rajo se llena. A

medida que sube la densidad de máquinas y más sistemas compiten por el mismo aire, la interferencia no es una posibilidad sino una trayectoria, y no la controlas porque no eres dueño del espectro. El mecanismo es contención: construiste autonomía de grado control sobre un recurso que se vuelve menos confiable justo a medida que lo usas más. Una red de autonomía sería planifica espectro licenciado o privado, incluido 5G privado, antes de que las bandas no licenciadas se saturen.

La tercera es **la apuesta de un solo camino: un backbone sin ruta diversa**. Una sola ruta de transporte de regreso, por gruesa que sea, está a un incendio, un robo y una excavadora de dejar la operación entera a oscuras. El mecanismo es concentración: enrutaste toda la conexión de la mina con su gente a través de una sola cosa física que el desierto, el clima y los ladrones de metal están activamente tratando de romper. La redundancia no es chapa de oro; es la diferencia entre un evento registrado y un turno detenido.

La cuarta es **la apuesta corta: dimensionar para hoy sin camino hacia adelante**. Dimensionar la red a la telemetría de hoy en vez de a la densidad de sensores y video de mañana es una cara; no tener camino de migración a 5G privado ni a un backbone fotónico es la otra. Son el mismo mecanismo: un horizonte de planificación más corto que la vida del activo. Una red sin camino de migración es una red con una fecha de vencimiento que no escribiste.

Nota que ninguna de estas cuatro es un error de tecnología. Cada una es un error de horizonte con disfraz de tecnología. La apuesta cerrada cambia flexibilidad futura por simplicidad presente. La apuesta prestada cambia confiabilidad futura por costo presente. La apuesta de un solo camino cambia supervivencia por una factura más chica. La apuesta corta cambia la vida completa del activo por el caso de negocio del piloto. Evita las cuatro, y has evitado la reconstrucción.

12

QUÉ VERIFICAR EN TU PROPIA OPERACIÓN

Esto es una compuerta, no un resumen. Antes de firmar cualquier decisión de red atada a la autonomía, corre estas seis verificaciones. Cada una tiene un resultado binario, y cualquier falla única significa que el diseño está dimensionado para hoy.

1. **Proyecta la demanda.** Calcula la subida agregada sostenida pico a plena autonomía planificada: máquinas por fidelidad de video por flujos por máquina, más perforadoras, cámaras fijas, inferencia y voz. Usa el plan de flota a tres años, no el piloto. *Confirmado si el número está escrito. No confirmado si nadie lo tiene.*
2. **Mide el techo.** Compara esa demanda contra la capacidad sostenida real del backbone hacia el centro de operaciones remoto, a la latencia y jitter que tu caso de seguridad requiere. *Confirmado si el margen es al menos el doble de la demanda proyectada. No confirmado si está por debajo.*
3. **Revisa la lista de acceso.** Confirma que el proveedor de acceso de grado control aparece en la lista validada de tu OEM de autonomía —malla o el camino de celular privado cualificado por el OEM— y que no confundiste Rajant, Radlink y RADWIN.

Confirmado si el proveedor está validado para tu plataforma. No confirmado si la elección se apoya en un mapa de cobertura genérico.

4. **Prueba el espectro.** Confirma que el diseño no depende solo de espectro no licenciado a plena densidad de máquinas, y que existe un camino licenciado o de 5G privado. *Confirmado si un camino licenciado está contratado o planificado. No confirmado si toda la apuesta es a bandas no licenciadas.*
5. **Prueba el segundo camino.** Confirma que el backbone tiene un camino redundante físicamente diverso —ruta distinta, idealmente medio distinto, sin compartir poste, ducto ni corredor con el primario— con un tiempo de conmutación definido y probado. *Confirmado si el camino diverso y su conmutación están documentados y probados. No confirmado si "redundancia" son dos fibras en una zanja, o una garantía verbal.*
6. **Encuentra el camino hacia adelante.** Confirma que el contrato contiene un camino explícito de migración a 5G privado y a un backbone óptico y fotónico. *Confirmado si está por escrito. No confirmado si es una garantía verbal.*

Corre esas seis el lunes en la mañana. Si cada respuesta vuelve confirmada, estás comprando la mina autónoma. Si aunque sea una vuelve no confirmada, estás comprando el piloto, y estás comprando la reconstrucción que le sigue.

■ *La mina autónoma no se compra de a un camión por vez. Se compra de a una red por vez —y sobre más de un camino— y la red que te permitiste ignorar hoy es la que pagarás por reconstruir en tres años.*

13

IDEAS CLAVE

Las afirmaciones centrales de este paper, cada una capaz de sostenerse por sí sola —una ayuda de memoria de un bloque por idea.

1 La red no es lo que vuelve autónoma a una mina; es la restricción vinculante que fija el techo de hasta dónde puede escalar la autonomía. Elegirla para el caso de uso de hoy te deja varado mañana.

2 Son tres redes, no una: la red de acceso en el rajo, el backbone al centro de operaciones remoto, y un camino redundante físicamente diverso para ese backbone. La mayoría construye la primera, subdimensiona la segunda y olvida la tercera.

3 El backbone transporta lo básico de la autonomía —posicionamiento, despacho, comandos— sin problema. Se cae el día en que enciendes telemetría en tiempo real y vídeo en vivo de los equipos de perforación: esos son los datos que no caben.

4 La red de acceso correcta es la que tu OEM de autonomía ya validó: Komatsu certificó la malla Rajant, Caterpillar validó Rajant, Epiroc adquirió Radlink y validó Rajant para sus perforadoras. Y cuidado: Rajant, Radlink y RADWIN son tres empresas distintas; confundirlas es un error de compra.

5 El backbone necesita redundancia; la última milla no. Un solo corte ciega a la operación entera a la vez, y la fibra aérea está expuesta a incendio, robo de cable y excavadora. Sin un segundo camino físicamente diverso —sin compartir ruta ni medio— corres la producción a la suerte.

6 La All-Photonics Network de IOWN de NTT apunta a 100x eficiencia energética, 125x capacidad y 1/200 de latencia hacia 2030, y es comercial desde marzo de 2023.

7 Construir el backbone para mañana —capacidad, redundancia y un camino de migración— es un premio acotado que se gasta una vez; reconstruirlo después es un programa de varios años gastado bajo presión de producción.

14

FUENTES

Las afirmaciones de este paper que descansan en evidencia pública y verificable, con sus fuentes. Las cifras de desempeño de proveedores se etiquetan como claims del proveedor; las cifras de NTT IOWN son metas a 2030 salvo donde se indica disponibilidad comercial.

- Rajant Kinetic Mesh certificado para Komatsu FrontRunner AHS (2022) — International Mining; Canadian Mining Journal.
- Komatsu FrontRunner AHS sobre LTE privado dedicado (2019) — Komatsu Newsroom.
- Caterpillar valida el inalámbrico Rajant para Cat MineStar Command for Hauling (2023) — Comunicado de Caterpillar; International Mining.
- Rajant validado para perforación de superficie autónoma de Epiroc, incl. Los Bronces (Chile) (2022) — GlobeNewswire.
- Komatsu FrontRunner AHS sobre 5G privado (Sedna y Nokia) en Nevada Gold Mines —primer despliegue de producción en EE.UU. (2025) — International Mining; Comunicado de Barrick.
- Newmont da luz verde al 5G privado de Ericsson en sus sitios globales tras el piloto en Cadia (2024) — RCR Wireless.
- 3GPP Release 16 URLLC e integración TSN (2020) — Ericsson Technology Review: 5G NR evolution. La latencia de ~1 ms en el plano de usuario y la confiabilidad de “seis nueves” (99,9999 %) son las metas de diseño URLLC de 3GPP (3GPP TS 22.261 / TR 38.913), no cifras del artículo de Ericsson.
- Soluciones de minería RADWIN —posicionamiento del proveedor, PtMP de clase fibra (claim del proveedor) — RADWIN.
- Impacto de los incendios de la región de Valparaíso, Chile, en la infraestructura de comunicaciones (SUBTEL: 226 antenas fuera de servicio en la Región de Valparaíso, mezcla de daño de fuego y cortes de energía) (feb 2024) — Reporte de situación SUBTEL; Emol.
- Ataques a infraestructura de comunicaciones / tendencia de robo de cable e impacto económico — NCTA Vandalism 2025 Report (PDF).
- Satélite LEO (Starlink) para conectividad de negocios remotos en Chile y Perú — Alianza Entel-Starlink.
- NTT IOWN All-Photonics Network —arquitectura y funciones APN — NTT IOWN APN; metas a 2030 (100x eficiencia energética, 125x capacidad, 1/200 latencia) — NTT DATA: qué hace impresionante a IOWN; ensayo de IOWN APN — ~700 km Okayama→Tokio, video de robot de inspección dentro de 500 ms (ene 2025) — Comunicado NTT DATA.

Para más sobre este tema, contacta a: **Rodrigo Pinto**, Director TMT - Network - IOWN, NTT DATA · rodrigo.pinto.padilla@emeal.nttdata.com.