

PERUMIN- 35 CONVENCION MINERA
Del 26 al 30 de septiembre de 2022
FORO DE TECNOLOGÍA, INNOVACIÓN Y SOSTENIBILIDAD

IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE LOS PRIMEROS CAMIONES AUTÓNOMOS EN EL PERÚ

CATEGORÍA: Investigación y Tecnología Minera

AUTORES: Luis Huamán Ortiz¹, Luis Herrera Gutiérrez²

¹ Especialista Senior de Aplicación y Mejora Continua de Ferreyros S.A., Arequipa (Perú)- luis.huaman@ferreyros.com.pe.

² Jefe de Soporte de Tecnología Minera de Ferreyros S.A., Arequipa (Perú) - luis.herrerag@ferreyros.com.pe.

Resumen

La minería peruana se distingue por sus estándares de clase mundial: la innovación es parte de su ADN. En ese contexto, Ferreyros y Caterpillar toman el encargo de participar en el proyecto cuprífero Quellaveco, de Anglo American, con una flota íntegramente autónoma de camiones mineros, los primeros en la historia del país. La búsqueda de la mejora de la seguridad, el incremento de la productividad y la optimización de la utilización de los equipos de acarreo son impulsores clave de la adopción de autonomía.

Ferreyros conformó un equipo de trabajo con alta capacidad y potencial para el desarrollo del proyecto, convocando a ingenieros y técnicos peruanos; cada etapa del proyecto contó con el acompañamiento permanente de Caterpillar, bajo cuya tecnología opera hoy la flota de camiones autónomos más grande del mundo, con más de 500 unidades en diversas minas a nivel global.

La solución autónoma incorporada en el proyecto Quellaveco incorporó tres pilares. El primero es la tecnología proporcionada por el sistema Cat MineStar y su módulo Command for Hauling, que hace posible la operación autónoma de los camiones. El segundo es la definición y optimización de procesos en sus diferentes etapas, donde la determinación de roles y responsabilidades para el desarrollo de procesos internos; la planificación y las estrategias para la disponibilidad de componentes en mina fueron factores fundamentales. Como tercer pilar, la eficiente gestión de las personas permitió compartir importante información y experiencias entre las diferentes áreas técnicas que intervinieron durante la implementación.

La conversión; la instalación; el precomisionado; la calibración y el comisionado; y las pruebas de aceptación de usuario en el ambiente operativo son las cinco etapas del proceso de implementación de la flota de 27 camiones Cat 794 AC en Quellaveco, a los cuales se sumó hace un trimestre el requerimiento de un camión adicional, que hoy se encuentra en proceso de entrega. Cabe precisar que cada unidad Cat 794 AC cuenta con una capacidad de carga de 320 toneladas.

Primero, Ferreyros habilitó, mediante un proceso de conversión, los primeros cuatro camiones de la flota al estado de "Command Ready", a través de la instalación de un *kit* de conversión que incluye diversos componentes y sistemas que permiten dejar

preparado el camión para su próxima activación en modo autónomo. Estos trabajos demandan de un alto conocimiento técnico de las funcionalidades del camión y de sus principales sistemas.

En una siguiente etapa se abordó la instalación del *kit* de full autonomía -compuesto por sofisticados sistemas de control, percepción y posicionamiento-, en la flota total de 27 camiones (24 camiones en estado "Command Ready", sumados a los cuatro iniciales). Cabe señalar que el tiempo promedio de instalación de los camiones disminuyó en 58% respecto al requerido en las primeras instalaciones.

Con el precomisionado, estos camiones recibieron la programación del software de los módulos de control electrónico (ECM), compatibilizándose con la lógica de los camiones autónomos. El tiempo de precomisionado se redujo en 50% al final de esta etapa respecto del utilizado al inicio del proceso.

Luego, la etapa de calibración y comisionado incluyó diversas calibraciones: la GAMS, o calibración del GNSS e inercia del camión; la del "Planning Checkout", o calibración de los frenos y la dirección; y la calibración de la percepción, focalizada en regular el sensor LiDAR. Se registró una reducción del 60% en el tiempo inicialmente utilizado para éstas calibraciones.

Al concluir esta etapa, Ferreyros y su representada Caterpillar consiguieron camiones 100% autónomos, totalmente calibrados y comisionados, listos para pasar las pruebas de aceptación de usuario en el ambiente operativo de la mina, que fueron definidas entre Caterpillar y el cliente minero y superadas con éxito en su totalidad. Concluidas todas las etapas anteriores, Ferreyros puso a disposición de Quellaveco los primeros camiones autónomos en la minería peruana.

A partir de la experiencia en este hito en la minería peruana, surgen algunas importantes conclusiones y aproximaciones sobre el impacto del proyecto de implementación. La formación de equipos multidisciplinarios, la optimización de procesos internos, la fluidez en la comunicación entre el cliente minero, el distribuidor y la fábrica, así como la disponibilidad de infraestructura adecuada son algunos de los factores de mayor relevancia en las eficiencias alcanzadas en las etapas de implementación. Asimismo, el desarrollo de estrategias de entrenamiento y los esfuerzos puestos en integrar y compartir información valiosa fue clave para la sostenibilidad de la gestión del conocimiento;

destaca, además, que la adopción de la autonomía en la minería peruana ha impulsado la constitución de un *hub* de talento experto en la materia. Cabe mencionar que el logro de la primera implementación exitosa de autonomía potencia las capacidades de Ferreyros para asumir nuevos retos de implementaciones y desarrollo de iniciativas tecnológicas. Finalmente, el compromiso del cliente minero, del fabricante y del distribuidor con el éxito de una implementación de esta envergadura y trascendencia fue un factor decisivo en cada una de las etapas.

1. Introducción: Minería autónoma, un hito en el Perú

La minería autónoma en el Perú es hoy una realidad. Ferreyros, con el soporte de Caterpillar, ha implementado y puesto en marcha los primeros camiones autónomos en la historia de la minería nacional, en un circuito de acarreo 100% autónomo, precedido por experiencias globales que demuestran la trascendental contribución de la autonomía a la seguridad, la productividad y la utilización de estos importantes equipos de producción.

La tecnología de autonomía, bajo el paraguas del sistema Cat MineStar Command for Hauling, integra capacidades inteligentes y de amplio alcance para la operación automatizada en el proceso de acarreo minero en equipos no tripulados, incluyendo la gestión de las flotas, la identificación de su salud, la precisión en las labores de movimiento de tierra y la gestión de la seguridad.

La adopción de una operación minera autónoma está permitiendo transitar hacia el siguiente escalón en la búsqueda de la mejora de la seguridad, el incremento de la productividad y la optimización de la utilización de los equipos de acarreo. Pero, por encima de todo, ha abierto un espacio para la utilización de sistemas que no solo incluyen procesos y tecnología, sino equipos de trabajo y una gestión del cambio que asegure altos estándares de seguridad para las personas y para las flotas de maquinaria.

La implementación peruana de la autonomía está respaldada por la experiencia de Caterpillar a nivel global, que desde hace casi 30 años viene invirtiendo en el desarrollo de la autonomía³, y una posterior y constante apuesta por esta tendencia. La adopción de su tecnología de autonomía Cat MineStar Command for Hauling permite que, a inicios del año 2022, más de

500 camiones mineros operen autónomamente a nivel global, la flota autónoma más grande del mundo. A la fecha, estos han transportado de forma autónoma y segura más de 4,000 millones de toneladas y recorrido más de 145 millones de kilómetros.

La adopción local de la autonomía impulsa el desarrollo de un *hub* para la atracción de talentos que posiciona al Perú a la vanguardia tecnológica de los países mineros más desarrollados en el mundo. Cabe resaltar que, a nivel mundial, la autonomía ha propiciado el desarrollo de nuevas posiciones técnicas en roles operativos, de mantenimiento y de procesos diversos en mina⁴.

A ello se suma el posicionamiento del Perú en el sector minero de clase mundial, especialmente en el cuprífero, con altos estándares de operación y una constante innovación. El país es el segundo productor de cobre del mundo, y el tercer lugar en cuanto a reservas de ese metal, de acuerdo con la encuesta mundial del U.S. Geological Survey (USGS), lo que lo consolida como un importante destino de inversiones mineras. Asimismo, el cobre es el principal producto peruano exportado al acumular una participación de casi 30% en el total de exportaciones, según cifras del Ministerio de Energía y Minas.

2. Objetivo

El objetivo del presente trabajo es mostrar, a partir de la experiencia de Ferreyros, cómo se ha conducido de manera exitosa y pionera en el Perú el proceso de adopción de autonomía en camiones mineros en nuestro país, con la solución tecnológica de Caterpillar, Cat MineStar Command for Hauling, en una operación minera de clase mundial como el proyecto cuprífero Quellaveco. La flota autónoma está compuesta por cerca de 30 camiones Cat 794 AC, cada uno con capacidad de carga de 320 toneladas.

Se explora, en este sentido, la ejecución de los procesos de conversión, instalación del *kit* de autonomía, precomisionado, calibración y comisionado, y pruebas de aceptación de usuario de la autonomía en camiones Caterpillar, de la mano de un equipo de trabajo multidisciplinario, con el fin de hacer posible la operación autónoma de los camiones de forma eficiente, productiva y segura en mina, en interacción con otras unidades autónomas de la misma flota y con equipos tripulados.

3. El equipo humano, clave en el éxito del proceso

³ Caterpillar (2022).

⁴ Ferreyros (2022).

Implementar el primer proyecto que utiliza camiones autónomos en el Perú ha demandado el compromiso conjunto del distribuidor Ferreyros, de la mano de su marca representada Caterpillar como fabricante de la flota de camiones y de la tecnología de autonomía, y de su cliente Anglo American, que desarrolla Quellaveco, uno de los cinco yacimientos de cobre más grandes del mundo, ubicado en Moquegua, al sur del Perú.

Al margen del carácter técnico del documento, es necesario remarcar como factor decisivo la disposición total de todas las partes para garantizar el éxito de la implementación de este proyecto de envergadura, facilitando las capacidades humanas y técnicas que hicieron posible el óptimo funcionamiento de la tecnología Cat MineStar Command for Hauling, que permite la utilización de los camiones mineros en el ciclo de producción sin operador a bordo.

Ferreyros conformó un equipo de trabajo con alta capacidad y potencial para el desarrollo del proyecto, convocando a ingenieros y técnicos peruanos; ello incluyó especialistas o expertos en su área, con aportes diferenciados en función de su experiencia y sus objetivos. Se desarrollaron programas específicos en la empresa para el desarrollo de estos cuadros, promoviendo la sostenibilidad de la gestión del conocimiento. Cada etapa del proyecto contó con el acompañamiento permanente de Caterpillar, cuyos expertos compartieron su amplia experiencia en la implementación de operaciones autónomas a nivel mundial. El entrenamiento, el intercambio de conocimientos y experiencias y la socialización de esta nueva tecnología en todas las áreas involucradas, tanto en el equipo del distribuidor como en el personal a cargo del proyecto minero, fue fundamental para conseguir un sólido alineamiento a esta nueva forma de trabajo. Asimismo, se sumaron aportes como el del SIM School, iniciativa global de Caterpillar presente en los grandes países mineros, que utiliza herramientas de simulación para la capacitación en materia de autonomía.

En páginas posteriores, se describirá en mayor profundidad diversas dimensiones del desarrollo de este equipo humano.

4. Pilares de la autonomía

Tres pilares respaldan la solución autónoma incorporada en el proyecto emprendido por Ferreyros para Anglo American en Quellaveco: la tecnología, la

definición y optimización de procesos, así como la gestión de las personas.

4.1. Tecnología

La **tecnología** proporcionada por el sistema Cat MineStar Command for Hauling hace posible la operación autónoma de los camiones –al asignarse a cada uno de ellos una determinada carga y su destino–, y logra que los camiones tomen sus propias decisiones, como controlar su velocidad de acuerdo con las condiciones del entorno o detenerse. En tiempo real, estas decisiones se comparten con las otras unidades de la flota autónoma para garantizar un recorrido seguro.

Para la aplicación de esta tecnología, se instaló y habilitó un hardware de última generación sobre los camiones mineros Cat 794 AC, consistente principalmente en módulos de control electrónicos (ECM, por sus siglas en inglés), sistemas integrados que controlan las diversas funciones de los sistemas eléctricos que incorporan las máquinas. Estos módulos, conectados a sensores, permiten detectar objetos y escanear el ambiente de trabajo. Asimismo, se instalaron receptores de sistema global de navegación por satélite (GNSS, por sus siglas en inglés) de alta precisión, vinculados a través de una red de comunicación Ethernet IP y de comunicación CAN (Controller Area Network). Este hardware permite una interacción eficiente entre todos los componentes electrónicos del camión autónomo, cada uno de los cuales reporta en tiempo real a un servidor central de aplicación de gestión de flota, MineStar Fleet Command, cuyo funcionamiento se sustenta en una red inalámbrica. Esta última fue instalada para dar soporte a la comunicación eficiente entre cada camión autónomo y el mencionado servidor de aplicación, cumpliendo con ciertas características de latencia, relación señal– ruido (Signal to Noise Ratio, SNR), ancho de banda, entre otras.

El servidor de aplicación cuenta con el sistema MineStar Fleet Command instalado y configurado correctamente, garantizando que la realidad operacional de la mina Quellaveco, sea llevada a una realidad digital dentro del sistema a la cual se le denomina “Modelo de mina”.

4.2. Definición y optimización de procesos

El segundo pilar para el éxito en la implementación y puesta en marcha de los camiones autónomos es

la **definición y optimización de procesos** en sus diferentes etapas. El punto de partida fue la determinación de roles y responsabilidades para el desarrollo de procesos internos que hicieran viable la implementación, integrando equipos múltiples de Ferreyros, con operaciones en mina o en otras locaciones de la empresa a nivel nacional.

La planificación fue fundamental: por ejemplo, se adoptó la estrategia de optimizar el inventariado de las partes del hardware por instalar, realizándolo en los mismos almacenes de Ferreyros de forma anticipada a la llegada a la mina, lo que facilitó el inventario y permitió generar un sistema rápido y práctico para los técnicos en mina una vez que las partes eran recibidas.

Adicionalmente, se desplegaron estrategias para la protección de componentes críticos de autonomía y su disponibilidad en el stock en la mina, ya que de presentarse algún evento inesperado a nivel operacional o en su funcionamiento mientras se implementaban los camiones autónomos, podría extenderse el tiempo de entrega del equipo comprometido. Estos componentes fueron identificados en conjunto con información proporcionada por Caterpillar, así como con las experiencias compartidas por otros distribuidores.

4.3. Gestión de las personas

Como tercer pilar, la eficiente **gestión de las personas** impulsó el intercambio de información clave y experiencias entre las diferentes áreas técnicas durante la implementación de los camiones autónomos, lo que contribuyó a la generación de *standard jobs* para la etapa de mantenimiento, con el fin de prevenir incidencias en el funcionamiento de los componentes.

Se puso gran énfasis en el entrenamiento del personal de ingeniería especializada y técnico, tanto a nivel teórico como práctico, gracias a la aplicación de la metodología "On the Job", que desarrolla sus habilidades en el mismo campo de acción bajo la supervisión de un especialista *senior*. Asimismo, fue posible acceder al entrenamiento con Caterpillar usando tecnología de realidad virtual de calibraciones del camión. De esta forma, es posible aprender rápidamente aspectos de alto grado de dificultad, ya que los participantes aprenden ejecutando las tareas en el mismo lugar de trabajo y bajo la mirada de un experto.

Como resultado, se desarrollaron mejoras en el proceso de precomisionado, calibración y comisionado de los equipos autónomos, ya que se identificaron tareas que podían ser ejecutadas en paralelo, tales como la optimización de los recursos de energizado del equipo (extensión de la duración de las baterías del camión); la desconexión de sistemas no directamente relacionados con los componentes de autonomía, lo que permitió acelerar el proceso de instalación de software en los módulos de control electrónico (flasheo), entre otras, con la consiguiente reducción de los tiempos de ejecución de tales procesos.

Complementariamente, otro resultado positivo obtenido fue la sistematización de documentación técnica con un nivel de detalle profundo, que consolida la suma de la información teórica con la experiencia de las primeras ejecuciones y las buenas prácticas para que el personal especialista y técnico que se iba sumando al equipo pudiera reducir de forma ágil su curva de aprendizaje.

Es importante resaltar la incorporación del perfil del colaborador técnico de Ferreyros vinculado a la autonomía en el programa de desarrollo técnico de la empresa, Service Pro, que desde hace muchos años despliega, de forma pionera en el país, para promover la formación integral de sus

colaboradores, la certificación de sus habilidades y su línea de carrera. El programa Service Pro ha incorporado habilidades de manejo de tecnología que el personal técnico debió asimilar con el fin de convertirse en la primera línea de atención ante posibles eventos durante la implementación y en la etapa de soporte a la autonomía.

De igual forma, cabe remarcar la puesta en marcha del primer programa de entrenamiento para ingenieros especialistas en mina y la organización central, lo que permitió complementar los conocimientos adquiridos en el proceso de implementación, así como preparar a nuevos especialistas para afrontar los desafíos en autonomía.

Cabe notar que se combinó positivamente dentro del equipo de trabajo personal de mucha experiencia y liderazgo, y colaboradores jóvenes con nuevas ideas y formas de desarrollar tareas.

5. Implementación de los camiones autónomos

Para un mejor entendimiento del presente proceso, es conveniente reafirmar que la tecnología Cat MineStar Command for Hauling permite que los camiones mineros tripulados o estándar Caterpillar logren la autonomía en la operación. Desde este punto de partida, se describe las diversas etapas del proceso de implementación de la primera flota de camiones autónomos en el país, en Quellaveco, del modelo Cat 794 AC, de tracción eléctrica, una potencia de 3,500 hp y una capacidad de carga de 320 toneladas.

Figura 1: Componentes del sistema del camión autónomo Cat



Fuente: Ferreyros, elaboración propia

5.1. Conversión

Los camiones Caterpillar destinados a la autonomía están dotados de componentes y sistemas que les dan el estado de “Command Ready”, es decir, listos de fábrica para adoptar el sistema de autonomía Cat Command. Sin embargo, un primer paso fue habilitar los primeros cuatro camiones de la flota a esta condición, a través de la instalación de las piezas y tecnologías antes mencionadas.

Se realizó, por ejemplo, el reemplazo del *hood* o cubierta del radiador por uno nuevo que soporte la estructura del GNSS; y la instalación de nuevos cilindros de dirección que incluyen sensores en su interior, de tal manera que permitan que el camión autónomo identifique la dirección exacta en que se realizará su desplazamiento. Estos trabajos demandan de un alto conocimiento técnico del funcionamiento del camión y de sus principales

sistemas, tales como el hidráulico, eléctrico y mecánico, además de la ejecución de trabajos de soldadura en toda la superestructura del camión. Esta labor se realizó en el Centro de Reparación de Componentes (CRC) La Joya de Ferreyros, certificado por Caterpillar como taller de clase mundial.

Asimismo, una de las responsabilidades principales de esta etapa fue fortalecer la capacidad del equipo técnico encargado de la implementación para aplicar los procedimientos “Build Books” generados por fábrica, que contribuyeron a un exitoso proceso de conversión.

Gracias a una excelente sinergia entre el fabricante y el distribuidor, esta etapa de conversión permitió un óptimo proceso de retroalimentación y obtención de eficiencias, que dio como resultado una reducción de 37.5% en el tiempo de conversión de los camiones a “Command Ready”, comparándose con el plazo que demandó el primer camión versus el cuarto.

5.2. Instalación del kit de full autonomía

De la flota total de 27 camiones Caterpillar en Quellaveco, 24 unidades llegaron al Perú en el estado “Command Ready”, configurado desde fábrica. En este gran conjunto de camiones, así como en las cuatro unidades descritas en el paso anterior, se realizó la instalación del *kit* de full autonomía. Esta etapa de la implementación consistió en la instalación de los componentes, en su mayoría electrónicos, que conforman el sistema de autonomía Caterpillar, tales como:

- Gabinete de autonomía, que lleva los módulos de control electrónico (ECM) que reúnen toda la lógica (algoritmos, patrones de comunicación) para el funcionamiento del camión autónomo.
- Un sensor LiDAR, dispositivo que escanea mediante haces de luz la topografía del ambiente por donde transita el camión, capturando una densidad de datos mayor a medio millón de datapoints por segundo, de tal forma que puede detectar cualquier elemento físico (objetos, equipos e incluso personas y animales) a 300 metros y con una visión en 3D, convirtiéndose en los “ojos” del camión autónomo.

- Un sensor IMU, para detectar la inercia del camión y así saber si él se encuentra inclinado y en qué ángulo.
- Receptores y antenas GNSS, con una precisión de un centímetro, aproximadamente, para saber la ubicación exacta del camión.
- Algunos componentes adicionales, como las luces de modo de operación y sistemas de comunicación de red inalámbrica.

Es importante resaltar que el tiempo promedio de instalación en los camiones se redujo en más de 58% respecto al requerido en las primeras instalaciones. Aspectos como contar con un inventario detallado de todas las partes y separarlas por sistema se convirtieron en buenas prácticas que contribuyeron a este resultado. Adicionalmente, todas las lecciones aprendidas en esta etapa fueron comunicadas a fábrica.

Uno de los aspectos que aportó en gran medida al éxito de esta etapa fue el registro previo, en fotografías y videos, de todo el proceso de la conversión realizado en las instalaciones de Ferreyros, que permitió una comprensión integral de las características y funcionalidades de los camiones. Este material también dará origen a valiosa información para futuras implementaciones de camiones autónomos en Perú. Asimismo, marca los lineamientos para la instalación de sistemas terceros adicionales que interactúan con la autonomía.

5.3. Precomisionado

Tras la instalación del *kit* de full autonomía en los camiones, se produce la etapa de **precomisionado**. En ella, se instala y configura el software de los módulos de control electrónico (ECM) del camión estándar, a nivel de motor, frenos, chasis, dirección, el sistema de gestión de información vital de la máquina (VIMS) y la interfaz Advisor, para hacerlos compatibles con los componentes de autonomía instalados; esta programación es denominada como “Flasheo de ECM”. A continuación, se configuran los ECM propios del sistema de autonomía (AutoECM1 y AutoECM2), que son el corazón de la lógica de los camiones autónomos, y se establece la comunicación del camión base con el sistema de autonomía.

La etapa de precomisionado evidenció, además, la comunicación directa y el estrecho soporte de fábrica respecto a los trabajos eléctricos,

electrónicos y de red, gracias a la recopilación y almacenamiento de datos para recurrir a ellos en caso de que se replicaran eventos similares durante posteriores procesos en otros camiones autónomos.

En el mismo sentido, Ferreyros desarrolló una reingeniería de procesos para asegurar la carga permanente de las baterías en cada camión, lo que generó que el tiempo de precomisionado pudiera reducirse en un 50% al final de esta etapa respecto del utilizado al inicio del proceso.

5.4. Calibración y comisionado

En esta importante etapa de implementación, una de las más desafiantes del proyecto, se desarrollaron diversas actividades de calibración de los camiones autónomos. Se trata de la calibración GAMS, o calibración del GNSS e inercia del camión; la del "Planning Checkout", o calibración de los frenos y la dirección; y la calibración de la percepción, focalizada en regular el sensor LiDAR.

La herramienta de calibración Operator Control Station (OCS), o estación de control del operador, es un software de Caterpillar diseñado para este proceso. Para ejecutar las calibraciones, solo se requiere de un operador de camión, un ingeniero o técnico especializado en calibraciones y una laptop como medio de conexión.

- La calibración GAMS tiene por finalidad verificar que el GNSS y la inercia del camión operen correctamente, de tal forma que pueda detectarse la ubicación e inclinación exacta del camión dentro del sistema Cat MineStar Fleet Command.

Para ello, el operador maniobra el camión durante aproximadamente un minuto y se desplaza en varias direcciones, mientras que el sistema compara las dos señales de los receptores GNSS versus la información del sensor IMU o sensor inercial.

La habilidad técnica desarrollada en el equipo de trabajo permitió alinear rápidamente los

receptores GNSS y el sensor IMU, dando como resultado mejores ajustes y una adecuada nivelación de los camiones.

- La calibración "Planning Checkout" consiste en probar el camión por primera vez en modo autónomo durante 15 minutos, periodo en el que la intervención del operador es necesaria solo por motivos de seguridad, ya que durante toda la prueba el camión se desplaza autónomamente, poniéndose a prueba la dirección y los frenos en un circuito especialmente diseñado en el Pad de Calibración. Es en ese espacio donde el camión desarrolla altas velocidades que alcanzan los 50 Km/h y se prueban los frenos. El 100% de estas calibraciones fue exitosa.

- La calibración de la percepción se enfocó en ajustar el sensor LiDAR y en alinearlos con tres radares de detección de objetos, que están instalados sobre el búmer del camión. Para ello se hizo uso de un componente llamado "Calibration Pole", una estructura metálica de tres metros de altura aproximadamente con prismas apuntando en las direcciones Norte, Sur, Este y Oeste, instalado en el centro del Pad de Calibración.

Durante el proceso, el operador maneja el camión apuntando al "Calibration Pole" en las cuatro direcciones, mientras que el especialista verifica con el sistema OCS la correcta alineación del sensor LiDAR con respecto a los radares de detección de objetos. La posición exacta del "Calibration Pole" es ingresada como referencia para el camión autónomo; el operador debe tener la habilidad necesaria para manejar con una velocidad que no supere los 10 km/h, de cara a obtener una correcta lectura y verificación del sistema.

El alineamiento de los radares de detección de objetos respecto del LiDAR fue un aspecto clave para desarrollar un proceso de calibración exitoso de los radares.

Figura 2: Calibración de la percepción- Ajuste del LiDAR



Fuente: Ferreyros

Una vez que se han obtenido resultados satisfactorios en la calibración, es necesario verificarla mediante la prueba de verificación de la percepción, mediante la cual se prueba el camión en modo completamente autónomo, cargado con más de 320 toneladas y desplazándose a una velocidad de 50 km/h en línea recta. El camión debe tener la capacidad de detectar un obstáculo que se coloca en medio de la vía que llega al Pad de Calibración. Al igual que en las anteriores calibraciones, un operador y un especialista trabajan de manera conjunta con el sistema OCS para verificar que el camión se detenga al detectar el obstáculo y frene según los parámetros de diseño establecidos.

Cabe resaltar la importancia del despliegue de la infraestructura adecuada en la mina, como es el caso del acondicionamiento del Pad de Calibración antes mencionado, dedicado a la calibración y posterior prueba de los camiones autónomos.

Para el éxito de estas calibraciones fue necesario el compromiso y la disponibilidad de recursos de la empresa minera que, sumados a los mecanismos de retroalimentación

generados durante las pruebas, dieron lugar a una reducción del 60% en el tiempo inicialmente utilizado para las calibraciones.

Al concluir esta etapa, se consiguieron camiones 100% autónomos, totalmente calibrados y comisionados, y listos para pasar las pruebas de aceptación de usuario en el ambiente operativo de la mina, de acuerdo con las definiciones de Caterpillar y el cliente minero.

5.5. Pruebas de aceptación de usuario

La última etapa de la implementación, con el soporte técnico de Ferreyros, está compuesta por las **pruebas de aceptación de usuario** (UAT, por sus siglas en inglés), definidas por Caterpillar y el cliente minero.

Una de las principales UAT definidas para este proyecto fue la interacción entre un camión autónomo con una camioneta tripulada, acondicionada con el sistema "Site Awareness", el cual se describirá líneas abajo. En esta prueba, un camión operó de modo totalmente autónomo en un circuito circular dentro del Pad de Calibración, al cual ingresó

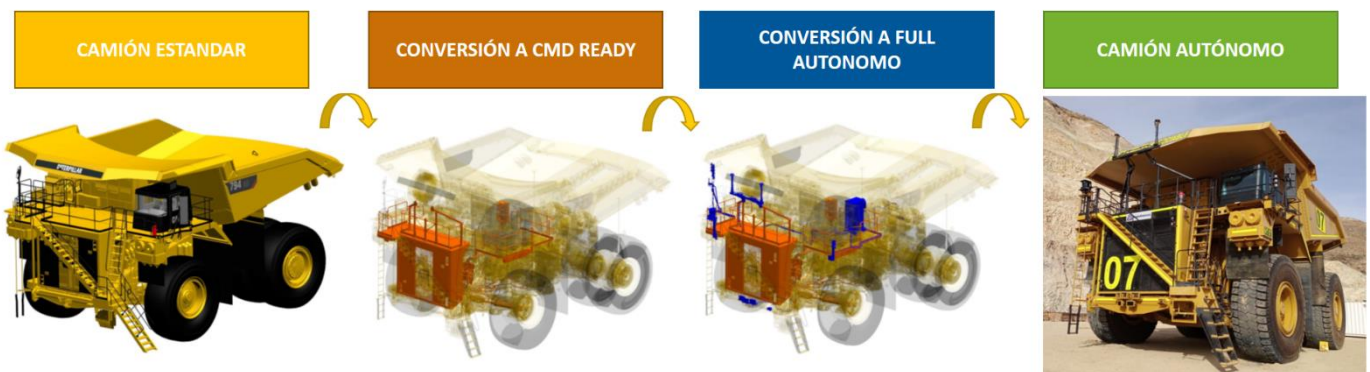
luego la camioneta tripulada por personal autorizado. El camión tuvo la misión de detectar la camioneta y reducir la velocidad y, cuando fue necesario, detenerse manteniendo una distancia mínima de 30 metros. En todo el recorrido, el camión mantuvo siempre una distancia de seguridad y reaccionó preventivamente cuando la camioneta se acercaba por los costados. Esta y todas las pruebas de aceptación de usuario fueron superadas con éxito.

Concluidas todas las etapas anteriores, Ferreyros puso a disposición de Quellaveco los primeros camiones autónomos en la minería peruana.

Es importante remarcar que se logró una notable reducción en el tiempo de entrega de la flota de equipos autónomos, listos para operar, frente al plan inicial del proyecto.

En el marco del trascendental objetivo de seguridad de la operación de los camiones autónomos, a la fecha y después de poco más un año de operación no se ha registrado ningún incidente con tiempo perdido utilizando esta tecnología.

Figura 3: Conversión de camión estándar a camión autónomo



Fuente: Gráficos de Caterpillar. Elaboración propia de Ferreyros

6. Funcionamiento

Cabe preguntarse cómo es que los camiones autónomos toman sus propias decisiones y en tiempo real generan las condiciones para una operación segura y eficiente. En primer lugar, es necesario entender que los camiones autónomos están controlados parcialmente por un servidor central que tiene instalado un sistema llamado MineStar Fleet Command, que no solo controla a los camiones autónomos, sino a toda la flota que trabaja y opera en el circuito cerrado de autonomía: la Zona de Operación Autónoma (AOZ, por sus siglas en inglés). Este sistema tiene configurados y registrados, tanto los equipos autónomos como los tripulados; además, tiene reflejada la operación minera de manera digital ("Modelo de Mina"), de tal modo que ningún aspecto importante se deje de lado, desde las vías de acarreo, zonas de carga y descarga, bermas y grifos hasta los talleres de mantenimiento, entre otros. Todas estas dimensiones operativas son configuradas

constantemente y muchas de ellas en tiempo real para tener un modelo de mina siempre actualizado.

Por otro lado, para que toda la flota tripulada se comunique correctamente con los camiones autónomos y con el servidor central, se instaló y calibró las tecnologías Fleet y Terrain de Caterpillar, lográndose con éxito muy altas precisiones en el posicionamiento de los cucharones de las palas de cable Caterpillar 7945, de menos de 25 cm, y de la hoja de empuje de los tractores de oruga Caterpillar D11 y D10T2, de menos de 20 cm. Cabe resaltar la importancia de este resultado, ya que los equipos que interactúan con los camiones autónomos requieren de precisiones en centímetros en su ubicación.

Los camiones autónomos desarrollan su velocidad gracias a un algoritmo de interacción con otros equipos que se basa en proyecciones y permisos en las vías por donde circulan. Así, el sistema va brindando permisos con la debida anticipación y una vez que el camión obtiene el permiso para desplazarse por una o varias

vías, va a desplazarse dentro de las velocidades permitidas, con la garantía de que otro camión autónomo no tiene permiso para circular sobre esa vía. De esta forma, los camiones autónomos pueden desplazarse de manera segura y eficiente aprovechando su velocidad y haciendo los ciclos de acarreo más homogéneos y predecibles.

Cabe señalar que los camiones autónomos cuentan con siete niveles o barreras de protección para evitar eventos de seguridad:

- i. **Zona de Operación Autónoma (AOZ, por sus siglas en inglés).** Se trata de un circuito cerrado en el que interactúan todos los camiones autónomos y equipos tripulados, con garitas electrónicas de control de acceso. Para poder ingresar a la zona autónoma, es indispensable contar con el entrenamiento necesario y con permisos otorgados por el área de Entrenamiento de Mina, los mismos que deben ser validados por el controlador de los camiones autónomos para permitir el ingreso a la zona.
- ii. **Procedimientos de la mina.** Todos los trabajos dentro y fuera de la zona de operación autónoma están debidamente documentados y son difundidos a todos los niveles de la operación. Además, se cuenta con reglas azules de autonomía que todos deben estrictamente respetar: por ejemplo, minimizar interacciones con los camiones autónomos.
- iii. **Parada de oficina.** Existe un controlador que tiene la capacidad de detener uno o todos los camiones autónomos a la vez con una sola instrucción, si considera que puede presentarse un potencial accidente o condición subestándar dentro de la zona de operación autónoma.
- iv. **Conciencia del sitio o “Site Awareness”.** Se trata de un sistema instalado a bordo de los equipos tripulados, tales como las camionetas, los camiones lubricadores y camiones grúa, entre otros, para hacer posible la comunicación con los camiones autónomos. De esta forma, los camiones pueden reaccionar al conocer la ubicación exacta, velocidad, dirección y actividad que están realizando los equipos tripulados; esta reacción se traduce en la disminución o incremento de la velocidad o incluso la detención completa del camión. Para establecer la comunicación con el camión autónomo, este sistema incluye un receptor GNSS de alta precisión, con una pantalla dentro

de la cabina del equipo tripulado, y antenas de red para la comunicación inalámbrica.

- v. **Parada de emergencia a bordo.** También conocida como la parada automática del camión autónomo, se presenta al detectar una eventual pérdida de comunicación; una pérdida de la señal de posicionamiento satelital con su corrección diferencial incluida, o la degradación de dicha señal; y una pérdida del control ante eventos críticos como, por ejemplo, eventos de salud relacionados al funcionamiento del motor, frenos, tracción o dirección.
- vi. **Percepción.** Este importante nivel de protección es posible gracias al uso del sensor LiDAR, combinado con los radares de detección de objetos, como un sistema que permite detectar objetos de todo tipo, vivos e inertes; operar bajo condiciones de lluvia y neblina; y generar una realidad digital que sirve como una fuente de información detallada para tomar decisiones oportunas ante cualquier desviación con el diseño. Si, por ejemplo, se presentan animales silvestres en la vía, el camión los va a detectar y visualizar y va a detenerse hasta que se haya levantado la observación y tenga el permiso para circular nuevamente.
- vii. **A-Stop.** Se trata de un dispositivo portátil similar a un celular; es uno de los equipos de protección personal (EPP) que se requieren para ingresar a la Zona de Operación Autónoma (AOZ). Este dispositivo permite al usuario detener a todos los camiones autónomos que se encuentren en un radio de 400 metros tan solo presionando un botón, si es que ello evita un potencial evento. Cabe señalar que es imperativo el ingreso del personal a la zona AOZ portando su dispositivo A-Stop como parte de sus EPP.

7. Conclusiones e impactos

A partir de la experiencia de Ferreyros en la implementación y puesta en marcha de los primeros camiones autónomos en el Perú, en la operación Quellaveco, surgen algunas conclusiones importantes para replicar los resultados obtenidos:

1. Factores como la formación de equipos multidisciplinarios, la optimización de procesos internos, la fluidez en la comunicación entre el cliente minero, el distribuidor y la fábrica, así como la disponibilidad de infraestructura adecuada, entre otros, tuvieron un impacto relevante en las

eficiencias alcanzadas en las diversas etapas de implementación de la solución de autonomía en la operación de Quellaveco. Las eficiencias registradas y la aplicación de diversas estrategias, en estrecha labor conjunta entre todos los actores involucrados en el proyecto, permitieron alcanzar una notable reducción del tiempo de entrega de la flota de camiones autónomos, listos para operar, respecto al plan inicial.

mostró permanentemente el cliente para impulsar el desarrollo del proyecto permitieron lograr un hito histórico en la minería peruana.

2. El desarrollo de estrategias de entrenamiento y los esfuerzos puestos en integrar y compartir información valiosa fue clave para la sostenibilidad de la gestión del conocimiento, tanto para el proyecto Quellaveco como para otras futuras operaciones, basándose tanto en la experiencia con la que Ferreyros ya contaba como en la que fue adquirida en cada etapa, lo que se constituye en uno de los logros más importantes de la implementación.
3. La adopción de la autonomía en la minería peruana ha impulsado la constitución de un *hub* de talento experto en la materia. Solo en Ferreyros, se consolidó en los primeros años de la experiencia con la autonomía un conjunto de medio centenar de especialistas, entre ingenieros y técnicos, relacionados a esta tecnología, todos altamente capacitados y calificados para brindar soporte de nivel mundial a proyectos como Quellaveco. El personal, tanto femenino como masculino, incluye talentos de la zona de influencia de la mina, como Moquegua y regiones cercanas como Tacna y Arequipa. A ello se suma la trascendental inserción y adopción de nuevos roles en la operación, de gran magnitud, correspondientes a la empresa minera. A la vez, se ha demostrado el impacto positivo de integrar cuadros experimentados y recursos jóvenes, articulando la profundidad del conocimiento con ideas innovadoras.
4. El logro de la primera implementación exitosa de autonomía potencia las capacidades de Ferreyros para asumir nuevos retos de implementaciones y desarrollo de iniciativas tecnológicas que buscan fomentar nuevas formas de hacer minería, con un enfoque sostenible.
5. El compromiso del cliente minero, del fabricante y del distribuidor con el éxito de una implementación de esta envergadura y trascendencia fue un factor decisivo en cada una de las etapas. La disposición a integrar esfuerzos conjuntos de las partes, el foco en la búsqueda de soluciones y el rol activo que

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a todas las personas del proyecto Quellaveco que contribuyeron a hacer posibles los primeros camiones autónomos en el Perú. En especial, nuestro agradecimiento a Ferreyros por la confianza y apoyo brindado en todo momento, con la firme convicción de que los peruanos estamos preparados para afrontar todos los retos que se nos presentan en un ambiente de equidad y seguridad.

Referencias

Caterpillar (2022). *“500+ Autonomous Trucks Operating Worldwide With Cat® Command for Hauling”*. En **Web Site de Caterpillar**; News, Features Stories; 3 de febrero de 2022 (https://www.caterpillar.com/en/news/caterpillarNews_/2022/500-autonomous-trucks.html)

Ferreyros (2022). *“Ferreyros y Quellaveco a la vanguardia de la tecnología en la minería peruana”*. En **Web Site de Ferreyros**; Novedades, Noticias; 26 de mayo de 2022 (<https://www.ferreyros.com.pe/noticia/ferreyros-y-quellaveco-a-la-vanguardia-de-la-tecnologia-en-la-mineria-peruana/>)

Quinde, B. (2022). *“Perú sube posiciones en ranking mundial de producción minera”*. En **Tiempo Minero**. (<https://camiper.com/tiempominero-noticias-en-mineria-para-el-peru-y-el-mundo/peru-sube-posiciones-en-ranking-mundial-de-produccion-minera/>)

Autores

Luis Huamán Ortiz: Actualmente se desempeña como Especialista Senior de Aplicación y Mejora Continua de la Gerencia de Soporte Eléctrico y Tecnología en Ferreyros S.A. Cuenta con 14 años de experiencia en la implementación de proyectos de tecnología asociados a la cadena de valor del negocio minero. Es Entrenador certificado por Caterpillar en MineStar Fleet y Terrain, así como Experto Técnico Senior MineStar. Es miembro del MineStar Trainers Team de Ferreyros, equipo que brinda el soporte a clientes con entrenamientos fundacionales y avanzados en el uso de la tecnología MineStar. Es Ingeniero de Sistemas por la Universidad Nacional de Cajamarca y cuenta con estudios de Especialidad de Redes, SQL Server, Oracle por la Universidad Nacional de Ingeniería.

Cargo: Especialista Senior de Aplicación y Mejora Continua de la Gerencia de Soporte Eléctrico y Tecnología
Empresa: Ferreyros SA
Dirección: Calle Melgar #622 – Cerro Colorado - Arequipa
Teléfono: 054 659444
Móvil: +51 984060293
Correo electrónico: Luis.Huaman@ferreyros.com.pe

Luis Herrera Gutiérrez: Actualmente se desempeña como Jefe de Soporte de Tecnología Minera de la Gerencia de Soporte Eléctrico y Tecnología de Ferreyros S.A. Cuenta con 10 años de experiencia en implementación y gestión de soluciones de Tecnología Minera bajo la plataforma Caterpillar; en análisis, diseño y desarrollo de sistemas; y en manejo de Bases de Datos Oracle. Es Entrenador certificado por Caterpillar MineStar Fleet y Terrain, así como Experto

Técnico MineStar. Es miembro del MineStar Trainers Team de Ferreyros, equipo que brinda el soporte a clientes con entrenamientos fundacionales y avanzados en el uso de la tecnología MineStar. Culminó sus estudios de Ingeniería Informática en la Universidad Católica San Pablo de Arequipa y ha sido certificado por SGS como Auditor Interno en Sistema de Gestión de Seguridad de la Información ISO 27000.

Cargo: Jefe de Soporte de Tecnología Minera de la Gerencia de Soporte Eléctrico y Tecnología
Empresa: Ferreyros S.A.
Dirección: Calle Huánuco 207 Mariano Melgar – Arequipa
Teléfono: 054 520798
Móvil: +51 988396476
Correo electrónico: Luis.Herrerag@ferreyros.com.pe