

---

# Aspectos Humanos de la Automatización y Nuevas Tecnologías en Minería: Integrando Personas y tecnología a través del diseño centrado en las personas

Documento técnico preparado para el proyecto ACARP C34026

---

Robin Burgess-Limerick<sup>1</sup>, Tim Horberry<sup>1</sup>, Danellie Lynas<sup>1</sup>, Andrew Hill<sup>1</sup> y Joel Haight<sup>2</sup>

1 Universidad de Queensland; 2 Universidad de Pittsburgh



CREATE CHANGE



# ACARP

Marzo, 2024

---

## Resumen ejecutivo

Este documento técnico explora los posibles beneficios y modos de falla asociados con los equipos mineros autónomos y describe un marco para mejorar la seguridad, la salud y la productividad a través del diseño centrado en el ser humano.

Los camiones autónomos se han utilizado en minas a cielo abierto por más de 10 años con resultados demostrables en la reducción de los riesgos de colisión. Remover a los operadores de los equipos de perforación elimina la exposición al polvo y vibraciones, riesgos de acceso y salida, y riesgos de seguridad asociados con el desplazamiento de vehículos dentro de la mina. La automatización de los dozers se ha empleado con menos frecuencia; sin embargo, retirar al operador de la cabina del dozer tiene el potencial de eliminar la exposición a áreas peligrosas como pilas de material, así como la exposición a vibraciones transmitidas al cuerpo entero y riesgos de lesiones musculoesqueléticas. La automatización de la minería de carbón subterránea tiene el gran potencial para remover a los mineros de una variedad de peligros para la seguridad, en particular a las caídas de rocas, estallidos o la ignición del metano; así como riesgos para la salud como la exposición al polvo respirable y al ruido. Los beneficios para la salud y la seguridad de remover a los operadores de los vehículos subterráneos de carga, transporte y descarga son claros; incluida la eliminación de peligros asociados a vibraciones al cuerpo entero, partículas de diesel y riesgos de colisión de vehículos.

Sin embargo, se identificaron diversos de tipos de falla introducidos con la automatización.

Deficiencias de software	Interrupción de tecnologías de comunicación	Ataques a la ciberseguridad	Acceso no autorizado a zonas autónomas
Pérdida de habilidades manuales	Exceso de confianza	Errores de entrada	Cambios de modo involuntarios
Limitaciones de los sensores	Falta de conciencia del entorno del sistema	Pérdida de la conciencia de la situación	Desafíos de la conciencia de la situación distribuida
Interacciones complejas	Dificultades de comunicación	Sobrecarga de trabajo	Factores de riesgo de lesiones musculoesqueléticas

Todas estas fallas involucran aspectos humanos. Los estándares y guías de orientación actuales tienen un foco insuficientemente en la integración de humanos y tecnología durante la implementación de la automatización en minería.

La integración de sistemas humanos incorpora el análisis, el diseño y la evaluación centrados en el ser humano dentro del proceso más amplio de ingeniería de sistemas. La integración de sistemas humanos es un proceso continuo que debe comenzar durante la definición de requerimientos, continuar durante las iteraciones de diseño del sistema y a lo largo de la puesta en marcha y operación para verificar que se hayan alcanzado los objetivos de rendimiento, seguridad y salud. A continuación, se presenta un marco para la integración de sistemas humanos durante la implementación de nuevas tecnologías en minería. Se definen seis ámbitos relevantes para la minería: staff, dotación de personal; capacitación; ingeniería de factores humanos; seguridad; y salud.

Los procesos de integración de sistemas humanos adaptados de otras industrias deben implementarse durante la adquisición de equipos mineros automatizados y se debe solicitar a los proveedores de tecnología que proporcionen un Plan de integración de sistemas humanos.

Aspectos de particular importancia incluyen el diseño de interfaces para mantener la conciencia de la situación, la reducción de la carga de trabajo de los operadores de la sala de control y la formación de las personas que asumirán nuevos roles. No se debe subestimar el alcance de la capacitación requerida para todos/as aquellos/as que son /impactados/as por la tecnología, y probablemente aumentará en comparación con roles anteriores. Formación continua y evaluación de competencias serán requeridas a medida que se modifiquen los sistemas. Garantizar que suficiente personal capacitado en las salas de control esté disponible para la industria es fundamental tanto para la productividad como para la seguridad y la salud.

## Introducción

El impacto de una creciente automatización de equipos mineros es probable que signifique una mejora en la seguridad y la salud. Sin embargo, desde el punto de vista del marco de control de EMESRT<sup>1</sup>, la introducción de componentes autónomos crea nuevos tipos de falla. Si bien existen directrices para la implementación de equipos mineros autónomos<sup>2</sup>, estos documentos ponen insuficiente atención a la integración de los seres humanos y la tecnología.

*Este informe técnico explora los beneficios potenciales y los tipos de falla asociados con la automatización de equipos mineros y describe un marco para mejorar la seguridad, la salud y la productividad a través del diseño centrado en el ser humano.*

Según reportes públicos, había 183 instalaciones de equipos mineros autónomos (y semiautónomos) equipos de flota hasta el 2022 (Figura 1). Las minas australianas albergaron el 44% de las instalaciones, seguidas por las minas canadienses (16%). Los tipos de flotas más comunes fueron los camiones de transporte de superficie autónomos y los vehículos subterráneos de carga, transporte y descarga semiautónomos, seguidos de los equipos de perforación de superficie autónomos. La mayoría de las instalaciones australianas estaban en minas a cielo abierto (64%), mientras que la mayoría de las instalaciones canadienses estaban en minas subterráneas (62%).

El tamaño de las flotas de camiones de superficie suele ser mayor que otro tipo de equipamiento. El total de camiones autónomos en funcionamiento a nivel mundial en el 2022 fue de 1070 (un aumento anual del 39%), de los cuales 706 estaban operando en Australia; y se proyecta que el número de camiones autónomos en funcionamiento a nivel mundial superará los 1.800 para finales de 2025<sup>3</sup>. La automatización de equipos mineros de mayor relevancia para las minas de carbón australianas son la perforación autónoma, el transporte autónomo, los bulldozers semiautónomos y desarrollo de túneles semiautónomos. También se examinará la automatización de cargador subterráneo dada la prevalencia de esta tecnología y las lecciones que se pueden aprender de su implementación.

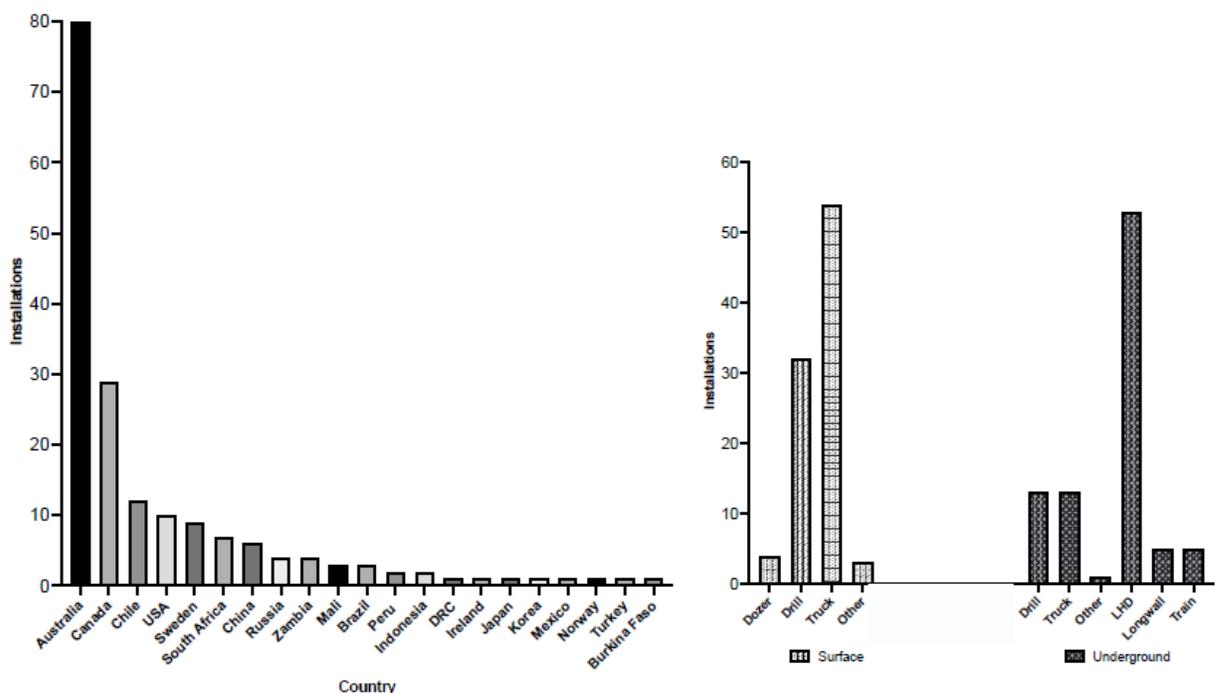


Figura 1: Instalaciones de flotas de equipos mineros automatizados hasta 2022 por país y tipo de equipamiento(N=183).

<sup>1</sup> <https://emesrt.org/control-framework/>

<sup>2</sup> eg., Department of Mines and Petroleum (2015). *Safe mobile autonomous mining in Western Australia — Code of Practice*; ISO (2019). *Earth-moving machinery and mining — Autonomous and semi-autonomous machine system safety*; GMG (2019). *Guideline for the implementation of autonomous systems in mining*; NSW Resources Regulator (2020). *Autonomous mobile mining plant guideline*. DOC20/690069..

<sup>3</sup> FutureBridge (2022). *Autonomous Haulage Systems – The Future of Mining Operations*. <https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-industrial-manufacturing/autonomous-haulage-systems-the-future-of-mining-operations/> (accessed May 24, 2023)

## Beneficios y tipos de falla de la automatización

### *Camiones autónomos*

Los camiones autónomos se han utilizado en minas a rajo abierto por más de 10 años, proporcionando ahorros de costos significativos y beneficios de productividad<sup>4</sup>. La seguridad ha sido una preocupación primordial para ambos, los fabricantes de equipos y las empresas mineras, y el perfil general de riesgo de colisión es marcadamente más bajo que la operación manual del camión. Por ejemplo, un análisis de incidentes asociados con camiones de acarreo, tanto manuales como automatizados, registrados por la mina Jimblebar de BHP en Australia Occidental durante los cuatro años que abarcó la introducción del transporte autónomo en el sitio indicaron que la tasa general de incidentes disminuyó en más del 90% durante el período<sup>5</sup>. Información más reciente<sup>6</sup> indica que las mejoras de seguridad en el sitio continuaron en los años siguientes. Rio Tinto también ha reportado una diferencia respecto de la magnitud en los cuasi accidentes entre vehículos autónomos y manuales<sup>7</sup>.

Sin embargo, un análisis de los “resúmenes para la concientización de la industria” proporcionado por el Departamento de Minas, Regulación Industrial y Seguridad de Australia Occidental<sup>8</sup> revela potenciales modos de falla generales asociados con equipos mineros automatizados. Cincuenta y tres resúmenes de incidentes relacionados con camiones autónomos se reportaron entre enero de 2010 y mayo de 2021.

Algunos de los incidentes no estaban relacionados con las funciones autónomas del camión. Por ejemplo, un camión autónomo fue alcanzado por un rayo:

“Un camión minero autónomo (AMT) vacío estaba subiendo una rampa en una mina de tajo abierto cuando fue alcanzado por un rayo. Un trabajador cercano vio cómo un neumático explotaba y causaba daños a la estructura superior (incluyendo cubierta, gabinete de autonomía, motor y cabina) del AMT. ... No hubo heridos. Las investigaciones encontraron que el rayo inició una explosión química que provocó la deflación incontrolada del neumático”<sup>9</sup>.

Aunque se informó como un “suceso potencialmente grave”, el incidente tal vez sería mejor caracterizado como un “posible incidente grave evitado por la automatización”, en el sentido de que las consecuencias podrían haber sido más graves si el rayo hubiera caído sobre un camión manual

*Error de modo.* En otro caso, se produjo un incidente como consecuencia de un “chofer controlador” sin darse cuenta cambió un camión autónomo a modo manual:

“Un camión minero autónomo que viaja por el camino de acarreo en modo manual con un chofer controlador en la cabina, traspasó la berma. No hubo heridos y la flota autónoma fue suspendida. Al parecer el conductor que estaba calibrando el camión sin darse cuenta lo puso en modo manual 15 segundos antes de que el camión traspasara la berma”<sup>10</sup>.

Este es un ejemplo de falla de “modo de error” que puede ocurrir con cualquier sistema que puede funcionar en diferentes modos.

*Falta de conciencia del sistema sobre el entorno.* Un tipo de incidente relativamente común representado en los resúmenes de incidentes son la pérdida de tracción asociada con carreteras húmedas. Se describieron diez incidentes en la base de datos, incluyendo:

“Al acercarse al área de trabajo de una excavadora, un camión autónomo perdió tracción y frenó provocando que se deslizara. La carretera había sido regada recientemente por un camión cisterna. Después de perder tracción, el camión autónomo sobrepasó el carril, intentó corregir su trayectoria y mantuvo su posición dentro del carril durante ~ 45 m. El límite del cuerpo volvió a traspasar el carril cuando se activó el evento de parada en el camión. Al frenar bruscamente, el camión se deslizó ~ 20 m deteniéndose a ~ 4 m fuera de su carril planificado.”<sup>11</sup>

<sup>4</sup> Price, R., Cornelius, M., Burnside, L. & Miller, B. (2019). Mine Planning and Selection of Autonomous Trucks. In Topal, E. (eds) *Proceedings of the 28th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*. Springer.

<sup>5</sup> Pascoe, T., McGough, S., & Jansz, J. (2022). From truck driver awareness to obstacle detection: A tiger never changes its stripes. *World Safety Journal*, XXXI(2), 15-28.

<sup>6</sup> Craig, B. (2022). Western Australia Iron Ore Update. Presentation & Speech. October 3, 2022. [https://www.bhp.com/-/media/documents/media/reports-and-presentations/2022/221003\\_waiospeeches.pdf](https://www.bhp.com/-/media/documents/media/reports-and-presentations/2022/221003_waiospeeches.pdf) (accessed June 3, 2023).

<sup>7</sup> Fouche, L. (2023). Vehicle fatality elimination. Presentation to the Collision Avoidance Forum 2023. <https://www.resourcesregulator.nsw.gov.au/sites/default/files/2023-03/Leon-Fouche-Rio-Tinto-Update-CA-Forum.pdf> (accessed June 3, 2023).

<sup>8</sup> *Mining incident summaries*. <https://www.dmp.wa.gov.au/Safety/What-accident-and-incident-19287.aspx>

<sup>9</sup> Incident summary SA-067-26713, 06/01/2018

<sup>10</sup> Incident summary SA-MG-453-16969, 19/06/2014

<sup>11</sup> Incident summary SA-299-22131, 04/02/2016

“Un camión autónomo (AHS) sin cargar bajaba por una rampa de 7 grados en una mina a cielo abierto, a 47 km/h, cuando las ruedas traseras perdieron tracción en la carretera no asfaltada. Esto provocó que el camión iniciara un frenado medio. El camión redujo la velocidad a 9 km/h, mientras permanecía en su carril, antes de intervenir su trayectoria programada y provocar una frenada crítica. A continuación, el camión se deslizó hacia la izquierda y se detuvo contra una berma. El tiempo total recorrido desde la pérdida inicial de tracción hasta la detención fue de 9 segundos y pasaron 4 segundos desde la frenada crítica hasta la detención. Una investigación inicial indica que la rampa tenía un exceso de agua. El análisis de ingeniería de los datos recuperados del camión mostró que el camión operaba acorde fue diseñado<sup>12</sup>”.

“Un camión de transporte de superficie autónomo viajaba por la rampa de desechos en una mina de tajo abierto cuando se deslizó y giró unos 90 grados antes de rodar hacia el lado de la cabina. El incidente fue causado por el camión al pasar de condiciones húmedas en la rampa a secarse provocando que éste se deslizara .”<sup>13</sup>

En cada uno de estos ejemplos, aunque se perdió el control del camión autónomo y el camión se desvió de su trayectoria prevista (y en un caso volcó hacia su lado), no había otros vehículos en las cercanías. Se destaca que, si bien los camiones pueden haber "funcionado según lo diseñado", el frenado de emergencia al deslizarse puede no haber sido la respuesta óptima a la situación.

En otros dos ejemplos, la pérdida de control provocó una colisión con otro camión autónomo:

“Un camión autónomo (AHT) vacío chocó con un AHT cargado en una faena a tajo abierto. El vacío AHT salió de su carril y entró en el carril del AHT cargado. Las operaciones autónomas fueron suspendidas y se inició una investigación. Estaba lloviendo intensamente antes de la colisión y el camión vacío experimentó una pérdida de tracción.”<sup>14</sup>

“Después de una lluvia en una faena a tajo abierto, un camión de transporte autónomo hizo contacto con la parte trasera del otro camión autónomo mientras se encontraba en una rampa.”<sup>15</sup>

En ambos casos, los vehículos involucrados eran autónomos y no había riesgo de lesiones a las personas. Sin embargo, es posible que surjan consecuencias más graves si un camión autónomo perdiera tracción cuando se encuentre cerca de un vehículo manual.

*Falla de comunicaciones.* En febrero de 2019 se produjo otra colisión entre camiones. Un resumen del incidente menciona:

“Un camión autónomo (AHT) en un tajo abierto dio marcha atrás e hizo contacto con un AHT estacionado.”<sup>16</sup>

Se proporcionaron detalles adicionales en un informe de los medios de comunicación:

“El camión en reversa se detuvo cuando se cortó la comunicación. Cuando la señal wifi regresó, la tecnología LiDAR (detección y alcance de luz) del camión se activó, detectando la presencia del camión detrás de él y permaneció estacionado... Sin embargo, el camión luego dio marcha atrás en la máquina estacionada”.<sup>17</sup>

Aunque se cita textual al director ejecutivo de la empresa diciendo que el incidente “no fue el resultado de ninguna falla del sistema autónomo”, parece que hubo algún tipo de falla de comunicaciones que provocó un error de WiFi entre el camión y la sala de control<sup>18</sup>. Las consecuencias podrían haber sido graves si en ese momento se hubiera localizado un vehículo ligero ocupado detrás del camión.

*Pérdida de conciencia de la situación.* El tipo de incidente más común descrito en los resúmenes involucra interacciones entre un camión autónomo y otro vehículo (p. ej., dozers, camión de agua, niveladora, vehículo de servicio o vehículo ligero) en el cual, el vehículo operado manualmente traspasó la línea de permiso del camión autónomo, provocando que el vehículo autónomo frene. Dieciocho incidentes de este tipo fueron identificados en la base de datos, incluidos siete en los que el vehículo operado manualmente chocó con el camión autónomo.

Uno de esos incidentes se resumió como:

“Un camión de transporte automatizado (AHT) giró... hacia la ruta de un camión cisterna operado manualmente. El AHT estaba iniciando un circuito para posicionarse debajo del

<sup>12</sup> Incident summary SA-861-25701, 25/07/2017

<sup>13</sup> Incident summary SA-356-27825, 18/05/2018

<sup>14</sup> Incident summary SA-205-30271, 16/03/2019

<sup>15</sup> Incident summary SA-275-32600, 16/02/2020

<sup>16</sup> Incident summary SA-389-29984, 2/11/2019

<sup>17</sup>

<https://thewest.com.au/business/mining/fortescue-metals-group-auto-haul-truck-crash-christmas-creek-no-failure-of-system-ng-b881104957z2>

<sup>18</sup> Bhattacharya, J. (2020). Wireless network capacity and capability is a pre-requirement for implementation of automation and other technologies in open-pit mining. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 68, 152–152

cucharón de la excavadora. Al darse cuenta de la ruta proyectada del AHT, el operador del camión cisterna comenzó una acción evasiva. Sin embargo, los dos vehículos colisionaron.”<sup>19</sup>

Posteriormente, la entidad reguladora<sup>20</sup> proporcionó más detalles del incidente (Figura 2).

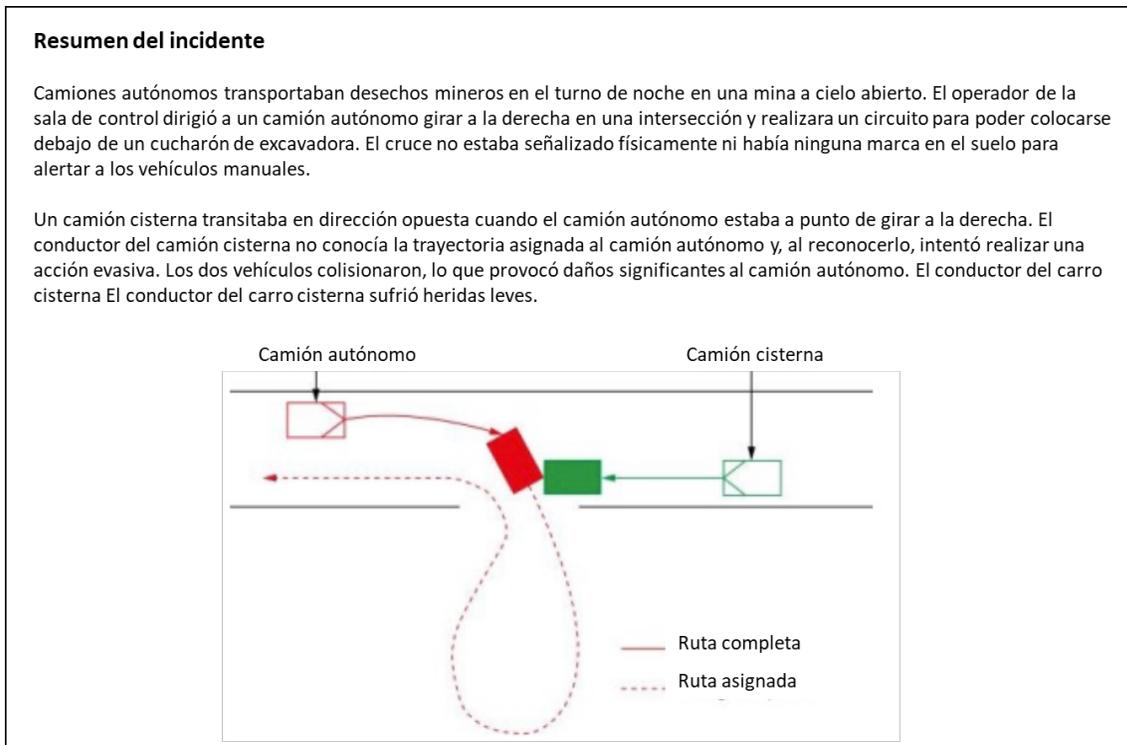


Figura 2: Descripción de la colisión entre un carro cisterna tripulado y un camión autónomo

Las causas directas del incidente identificadas por el regulador fueron:

- “Los recorridos del camión autónomo y del camión cisterna se interceptaron;
- Se liberó el circuito de giro del camión autónomo para su uso en el sistema de control, pero la intersección correspondiente, no se delineó en el terreno y no fue comunicado su uso.
- Al detectar el camión cisterna en su ruta de desplazamiento asignada, la velocidad del camión autónomo (unos 40 km/h) y el tiempo de respuesta significó que no pudo evitar la colisión”.

Las causas que también contribuyeron fueron:

- “Los procesos de gestión de cambio para la planificación y asignación de vías en el sistema de control fueron inadecuados;
- Se instaló un sistema de concientización en el camión cisterna para permitir al conductor monitorear la ruta del camión autónomo. Sin embargo, en el momento de la colisión, el conductor del camión cisterna no estaba plenamente consciente de la ruta prevista por el camión autónomo”. (énfasis añadido).

Esta última “causa contributiva” da indicios del tipo de falla - una pérdida de conciencia de la situación por parte del operador del camión cisterna. La nota también destaca la importancia del sistema de conocimiento del sitio proporcionado en vehículos operados manualmente dentro de zonas autónomas.

Varios otros resúmenes de incidentes también señalan el papel de esta interfaz. Por ejemplo:

“Se produjo una colisión entre un camión autónomo y un carro cisterna en una rampa a cielo abierto. El operador del camión cisterna condujo hacia una ruta de acarreo activa mientras mojaba una sección del pozo y *observó un camión autónomo en la pantalla*. El operador del carro de agua determinó que había suficiente espacio para articularse con el camión que se acercaba y continuó en su trayecto. Cuando el carro de agua entró en la visión del camión autónomo, el camión Aplicó los frenos y comenzó a reducir la velocidad. Las ruedas del camión entonces se bloquearon y los dos equipos hicieron contacto. La visión del camión autónomo se vio perjudicada dado que el camión se acercaba desde una vista fuera del camión cisterna”.<sup>21</sup> (énfasis añadido).

“Un camión cisterna entró en una intersección en la ruta de un camión autónomo durante el turno de noche en una mina tajo abierto. El operador frenó y se detuvo a tres metros

<sup>19</sup> Resumen del incidente SA-605-17670, 16/8/2014

<sup>20</sup> <https://www.dmp.wa.gov.au/Documents/Safety>

MS\_SIR\_226\_Collision\_between\_an\_autonomous\_haul\_truck\_and\_manned\_water\_cart.pdf

<sup>21</sup> Resumen del incidente SA-992-22337, 05/03/2016

del camión. Una luz de la torre estaba frente al parabrisas del camión cisterna, impidiendo la visión del operador de la intersección. *El operador utilizó la pantalla cartográfica para comprobar la ubicación de los vehículos autónomos, e interpretó mal la ubicación del camión*”.<sup>22</sup> (énfasis añadido).

“Cuando el conductor de un vehículo ligero (LV) se acercaba a una intersección en ruta de acarreo, observó la luz intermitente y luz de balizade un camión autónomo (AHT). *El conductor del LV miró la pantalla para ver la línea de permiso del AHT, pero no pudo verla y decidió hacer zoom para alejar la pantalla*. En ese momento el conductor del LV vio las luces del AHT al girar hacia él cuando los dos vehículos entraron en la intersección. El conductor del LV aplicó el freno y se detuvo y los sistemas de seguridad del AHT se activaron en modo de “excepción” (donde todos los frenos están aplicados) y el vehículo se detuvo. Los dos vehículos se detuvieron a una distancia de 5 a 10 m.”<sup>23</sup> (énfasis añadido).

“En una intersección en forma de Y en una mina cielo abierto, un vehículo ligero (LV) para evitar un límite traspasó la ruta de un camión de residuos autónomo vacío. El traspaso de la ruta inició una parada crítica que resultó en un casi accidente, con los vehículos deteniéndose a ~ 4,0 m de distancia. ... *Una investigación sobre el incidente descubrió que el conductor del vehículo perdió conciencia de la situación, ya que se distrajo enfocándose en el conocimiento del sitio en la pantalla localizada entre los asientos delanteros del vehículo fuera del campo de visión del conductor*.”<sup>24</sup> (énfasis añadido).

Estos incidentes resaltan la importancia del sistema de conocimiento del sitio y, en particular, el diseño de interfaces (Figura 3) proporcionadas para ayudar a los operadores de equipos operados manualmente dentro del zona autónoma a mantener el conocimiento de la situación. A su vez, esto resalta la importancia general del diseño de interfaces destinado a proporcionar información urgente a operadores humanos.



Figura 3: Interfaces de conocimiento del sitio proporcionadas dentro de vehículos manuales operados dentro de zonas autónomas en sitios de minas a cielo abierto.

**Exceso de confianza.** Uno de los reportes de incidentes “casi accidente” dio indicios de un tipo de falla distinto a la pérdida de conciencia de la situación.

“Repeticiones... mostraron un suceso potencialmente grave en una mina a cielo abierto. El AHT estaba acercándose a una intersección en un camino de acarreo cerca del ROM, y tenía su línea de permiso fuera, indicando su intención de girar a la derecha. Mientras desaceleraba y empezaba a girar, un vehículo ligero se acercó desde la dirección opuesta y continuó entrando en la intersección. La AHT identificó el riesgo de colisión, aplicó los frenos y se detuvo. El vehículo ligero no se detuvo, sino que continuó por el cruce, pasando a menos de 10 m del AHT. El conductor del vehículo liviano no cedió el paso, según los requisitos de permiso, y no se detuvo, no llamó a Emergencia ni reportó el incidente a su supervisor.”<sup>25</sup>

<sup>22</sup> Incident summary SA-019-30692, 03/06/2019

<sup>23</sup> Incident summary SA-380-18526, 15/01/2015

<sup>24</sup> Incident summary SA-039-18170, 08/12/2014

<sup>25</sup> Incident summary SA-520-26849, 09/01/2018

Es difícil imaginar que el conductor de un vehículo ligero no se dé cuenta de que pasa por una intersección a menos de 10 m de un camión de transporte. Si bien este incidente puede haber sido un ejemplo particularmente atroz de pérdida de conciencia situacional, es más probable que este sea un ejemplo del potencial general de "exceso de confianza" en la automatización para conducir a cambios de comportamiento que degradan la seguridad del sistema, es decir, el operador del vehículo ligero tenía tanta confianza en que el camión autónomo se detendría que deliberadamente condujo por la intersección delante del camión. Combinando esta situación con una pérdida de tracción produciría un escenario plausible de fatalidad.

*Interacciones complejas.* Dos resúmenes sobre incidentes de automatización merecen un comentario como ejemplos de cómo pueden surgir resultados no deseados en sistemas complejos en ausencia de falla de cualquier componente del sistema. El primer accidente resultó en una colisión de camión a camión:

“Un camión de transporte autónomo se detuvo en una rampa de una mina a cielo abierto. Una ruta única para el resto de los camiones autónomos fue creada para adelantar al camión. Un trabajador se subió para recuperar manualmente el camión. Este fue encendido y conducido por la rampa hacia el camino de un segundo camión que pasaba. los camiones hicieron contacto, deteniéndose en la rampa. ... El sistema de detección de proximidad/conocimiento del sitio no estaba completamente operativo en el primer camión cuando entró en la ruta para adelantar”<sup>26</sup>.

En este caso, cuando el operador reinició el camión autónomo para conducirlo manualmente, hubo un retraso antes de que el sistema de conocimiento del sitio del camión transmitiera activamente su posición. No hubo retroalimentación al conductor que era la situación y que el conductor no tenía visibilidad del camión autónomo acercándose por detrás. Esta combinación de circunstancias dio como resultado que el camión autónomo fuera incapaz de detenerse cuando el camión operado manualmente se interpuso en su camino. Todos los componentes del sistema funcionaron según lo previsto, sin embargo, la colisión aún ocurrió.

Otro incidente resultó en una interacción inusual entre dos peatones y un inesperado movimiento de dos camiones autónomos que tuvo serias potenciales consecuencias:

“Después de que dos camiones autónomos (AHT) en una mina a tajo abierto perdieran comunicación, dos operadores fueron los encargados de reubicar los vehículos. Cuando el primer conductor entró en la cabina de un AHT, el vehículo avanzó mientras el operador aplicaba el freno y cambiaba al modo manual. Como el segundo operador estaba a punto de abordar el otro AHT, sonó la bocina y el vehículo se movió hacia adelante, con el operador apartándose del camino.”<sup>27</sup>

Posteriormente, la entidad reguladora proporcionó información adicional<sup>28</sup> (Figura 4):

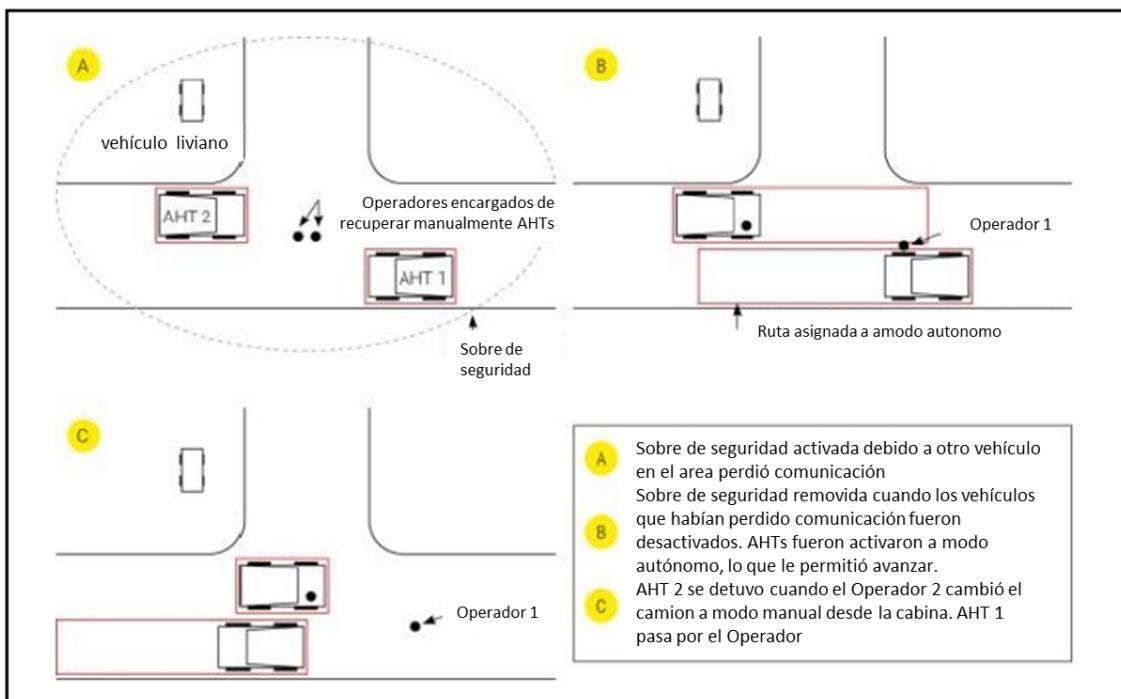


Figura 4: Descripción de movimientos autónomos involuntarios de camiones cerca de peatones

Las causas directas identificadas fueron:

“Los operadores intentaron abordar los AHT mientras no estaban bajo su control. Los operadores no identificaron que los AHT estaban en modo de excepción al intentar abordarlos.”

<sup>26</sup> Incident summary SA-051-28892, 03/10/2018

<sup>27</sup> Incident summary SA-743-32237, 29/12/2019

<sup>28</sup> [https://www.dmp.wa.gov.au/Documents/Safety/MSH\\_SIR\\_286.pdf](https://www.dmp.wa.gov.au/Documents/Safety/MSH_SIR_286.pdf)

“Una vez desactivados los vehículos ligeros en la zona, lo que eliminó el sobre de seguridad, los AHT pasaron del modo de excepción a modo autónomo, lo que les permitió reanudar operaciones”.

Las causas contribuyentes fueron definidas como:

“Los AHT estaban en modo de excepción y no suspendidos (modo inseguro para acercarse).

Falta de comprensión o claridad respecto de las acciones de los AHT en diversos modos de operación.

Redundancia limitada en la red de comunicaciones utilizada por el AHS.

Capacidad del personal para anular funciones del sistema que están diseñadas como controles de seguridad críticos.

Los operadores no observaron las luces indicadoras del modo de estado del AHT.

Es posible que problemas anteriores de comunicación hayan insensibilizado a los operadores ante posibles peligros. Los AHT no detectaron a una persona a punto de abordar”.

Una vez más, la pérdida de control de la situación se produjo a pesar de que todos los sistemas funcionaban según lo diseñado. En ambos casos, la falta de retroalimentación a las personas del sistema sobre el estado de los componentes autónomos, o la falta de comprensión de la información proporcionada, contribuyeron al evento. Ambos ejemplos ilustran por qué los métodos convencionales de análisis de riesgos basados en fallas son insuficientes para comprender los riesgos asociados con sistemas complejos que incluyen componentes autónomos. También se requieren técnicas de análisis adicionales, como el Análisis de Estrategias para Mejorar la Resiliencia (SAfER) y/o el Análisis de Procesos Teóricos de Sistemas (STPA).<sup>29</sup>

*Errores de entrada.* Además de los incidentes relacionados con camiones automatizados informados al regulador del Oeste de Australia (WA), se han observado varios otros ejemplos de incidentes, entre ellos:

“La automatización no eliminó que los camiones volcaran en los semáforos en rojo. Control Mina todavía requería de forma remota la asignación de camiones fallidos. Por lo tanto, los controladores necesitaban observar el sistema de iluminación antes de anular el camión”.<sup>30</sup> “

Aunque la automatización evitó con éxito que los camiones ingresaran a áreas cerradas (áreas mineras activas), el sistema dependía en gran medida de los LV para prácticamente bloquear el área. Los camiones sin conductor ingresaron a (áreas mineras activas) donde los vehículos livianos olvidaron bloquear o activar el botón de manera efectiva<sup>31</sup>

Ambos incidentes son ejemplos de errores durante la entrada al sistema.

*Deficiencias del software.* Otro tema de preocupación es la gestión de cambios de software. Se requiere un esfuerzo considerable por parte de las mineras para probar el funcionamiento de las actualizaciones antes de instalarlas debido a la posibilidad de que se introduzcan errores de software. El alcance del esfuerzo se debe, al menos en parte, a la escasa información proporcionada por los fabricantes a las minas respecto de los cambios de software.

*Conciencia de la situación en la sala de control.* Los camiones autónomos y la tecnología asociada, así como las personas tanto en la sala de control como en terreno, forman un sistema cognitivo conjunto. La toma de decisiones oportuna y adecuada requiere que el sistema cognitivo conjunto mantenga una comprensión precisa del estado del sistema y del entorno para permitir la predicción de probables eventos futuros. Ninguna persona en el sistema tiene acceso a toda la información necesaria para mantener este conocimiento de la situación. Más bien, la conciencia de la situación se distribuye por todo el sistema. Mantener un conocimiento preciso distribuido de la situación es un proceso dinámico y colaborativo que requiere interacción momento a momento entre los miembros del equipo y la tecnología.

Por ejemplo, el operador de la sala de control no tiene acceso directo a la información sobre las condiciones de la ruta y depende de las personas en la mina para proporcionar la información necesaria que permita tomar decisiones apropiadas, como reducir la velocidad de los camiones para evitar eventos de pérdida de tracción. De manera similar, el controlador tiene acceso a información amplia del sistema que debe comunicarse a los roles en terreno. La comunicación entre los miembros del equipo es claramente un aspecto crítico para mantener un conocimiento

<sup>29</sup> Hassall, M., Seligmann, B., Lynas, D., Haight, J., & Burgess-Limerick, R. (2022). Predicting human-system interaction risks associated with autonomous systems in mining. *Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems*, 57, 78–85.

<sup>30</sup> Pascoe, T., McGough, S., & Jansz, J. (2022). From truck driver awareness to obstacle detection: A tiger never changes its stripes. *World Safety Journal*, XXXI(2), 15–28. p.20.

<sup>31</sup> *ibid*

preciso de la situación, al igual que la adquisición e interpretación de información de las interfaces del sistema autónomo. ¿Las salas de control automatizadas generalmente estaban ubicadas inicialmente en los sitios mineros; sin embargo, cada vez más, los controladores se trasladan a centros de operaciones remotos, lo que exacerba este problema. El diseño de las interfaces de la sala de control (por ejemplo, Figura 5) es crucial para permitir que los operadores de la sala de control desempeñen su papel en el mantenimiento del conocimiento de la situación.

*Riesgos de lesiones musculoesqueléticas.* Existen algunas limitaciones en el diseño de los aspectos físicos de las estaciones de trabajo del controlador, como posiciones altas del monitor que provocan la extensión de la cabeza y el cuello y un incremento en las demandas visuales, aunque éstas pueden mejorarse mediante el uso de estaciones de trabajo de pie (Figura 6). Los requisitos de la interfaz de entrada también requieren el uso excesivo de dispositivos señaladores.

Figura 5: Interfaces de la sala de control de transporte autónoma.

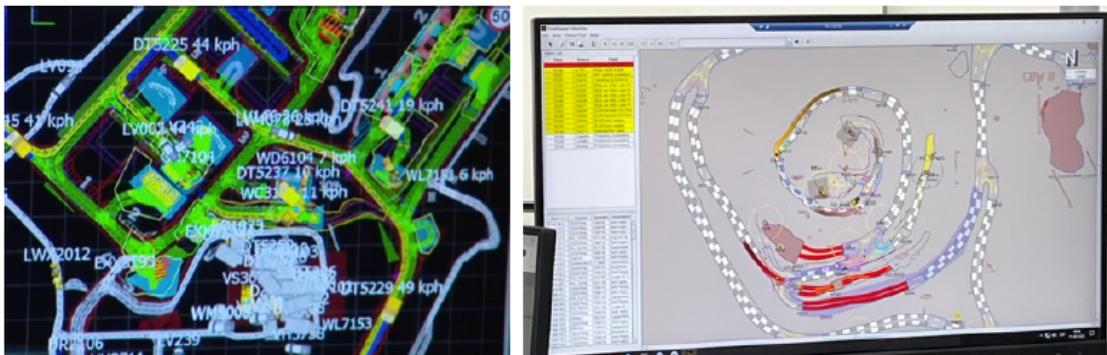
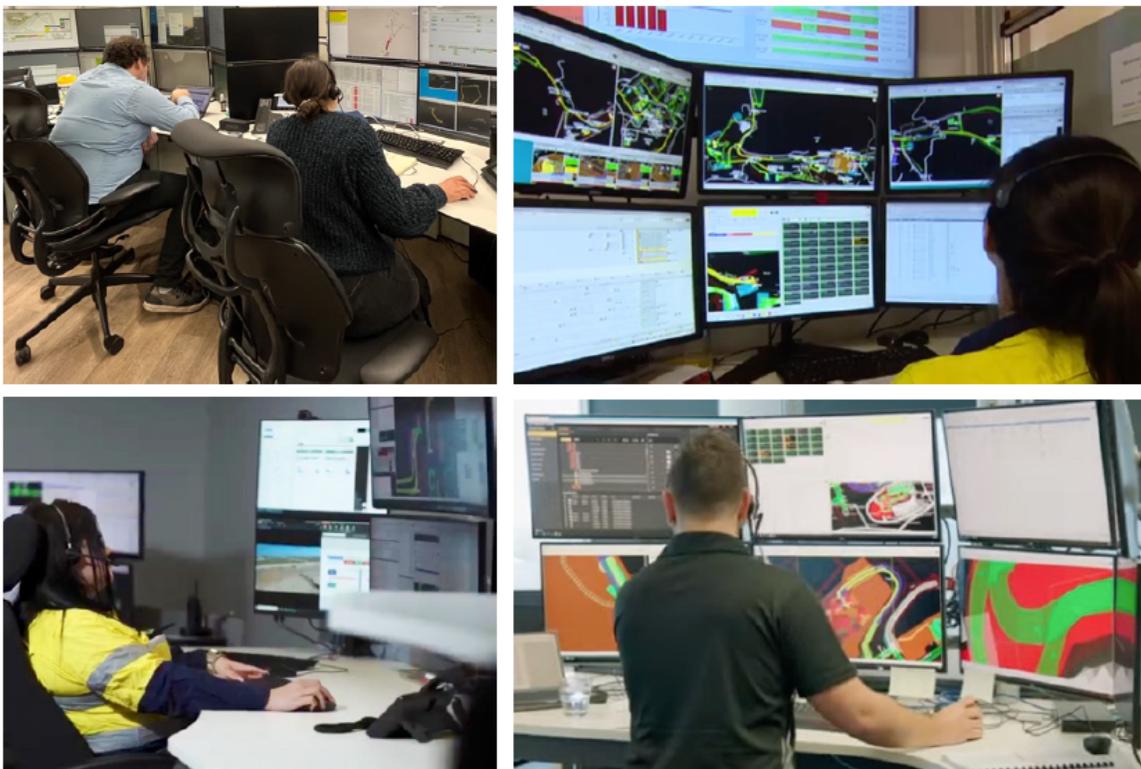


Figura 6: Estaciones de trabajo de control automatizado.



*Carga de trabajo.* Los roles en la sala de control implican una alta carga de trabajo cognitiva que puede conducir a la disminución del desempeño y/o tener efectos adversos para la salud. Además de los posibles impactos en el bienestar del operador y desempeño subóptimo, hay implicancias para la rotación y el correspondiente reclutamiento y los costos de capacitación.

Por ejemplo, un controlador entrevistado por Pascoe explicó que:

"Anteriormente, para una operación manual tú no lo harías, tienes 40 choferes de camiones que pueden pensar al respecto y hacerlo tú mismo. Tienes un controlador, en promedio, a cargo de 25 camiones, con un constructor. Planificando también todo el trabajo para esos 25 camiones. Entonces, es una rotación constante; él no se detiene; es implacable..."<sup>32</sup>

La carga de trabajo es impredecible y esto también aumenta el estrés. Como señalaron Pascoe et al:

"Los supervisores pueden estar realizando tareas de monitoreo y al mismo tiempo enfrentarse a cortes de red, deslizamientos de camiones y máquinas averiadas"<sup>33</sup>

<sup>32</sup> Pascoe, T. (2020). *An Evaluation of Driverless Haul Truck Incidents on a Mine Site: A Mixed Methodology*. Unpublished PhD thesis. Curtin University of Technology. p. 157.

<sup>33</sup> Pascoe, T., McGough, S., & Jansz, J. (2022). Haul Truck Automation: Beyond Reductionism to Avoid Seeing Turtles as Rifles. *World Safety Journal*, XXXI(3), 26–38. p. 33.

Los operadores también notaron como fuente de estrés las interrupciones en el trabajo, por ejemplo, las solicitudes rutinarias de acceso a la obra que interrumpen los trabajos de construcción que requieren una concentración constante.

Chirgwin también observó una alta carga de trabajo de controladores autónomos en múltiples salas de control:

“Varios controladores que tenían experiencia en operaciones manuales y autónomas habían asumido que la automatización facilitaría su vida laboral, pero la experiencia fue todo lo contrario y su carga de trabajo, carga cognitiva y responsabilidades de comunicación habían aumentado debido a la automatización”<sup>34</sup>

y observó que la carga de trabajo también aumenta con la asignación de tareas adicionales, quizás innecesarias:

“... muchas organizaciones continuaron aferrándose a formas obsoletas de trabajo y... continuaron agregando tareas a la función de controlador. Un ejemplo de esto es la insistencia en la presentación de informes manuales. A pesar de que los sistemas tienen la capacidad de capturar multitud de datos, todos los controladores entrevistados informaron que debían informar manualmente sobre lo que estaba ocurriendo durante su turno y las justificaciones de sus acciones. Esta tarea fue vista en gran medida como una tarea asignada al controlador con el objetivo de ahorrar tiempo a otra persona ...”<sup>35</sup>

*Dificultades de comunicación.* La carga de trabajo del controlador también aumenta por el grado de comunicación requerida con las personas que desempeñan funciones en terreno. El requisito de que la sala de control supervise y responda a múltiples canales de comunicación (radio, teléfono, en persona) genera potencial de frustración, conflictos interpersonales y sobrecarga cognitiva. Los múltiples canales de comunicación significan que el personal de terreno no sabe si el operador de la sala de control ya está atendiendo a otra fuente de información. Es posible que tampoco consideren el tiempo necesario para tramitar una solicitud antes de que se pueda atender la siguiente. La dinámica interpersonal del grupo es importante en esta situación, en particular la relación entre los operadores de la sala de control y el personal de terreno, donde las interacciones son en gran medida virtuales, y particularmente si el controlador tiene una experiencia limitada en terreno.

La rápida expansión del transporte autónomo ha resultado en que las empresas mineras encuentren dificultades considerables para atraer, capacitar y retener controladores. Esto se ha convertido en un círculo vicioso, en el que la escasez de controladores genera altas cargas de trabajo, provocando agotamiento, lo que agrava el problema. Chirgwin describió la situación que observó en varias salas de control:

“...a menudo se observaba que los controladores estaban en turno antes que los empleados de producción minera y, a menudo, eran los últimos en irse, yendo más allá de su turno de 12 horas asignado. No era raro ver a un controlador no tomar un descanso (incluido un descanso para ir al baño) durante hasta 6 horas y, a veces, eso se extendía a todo el turno. ... A menudo no había nadie para reemplazar al controlador durante su descanso, por lo que o no tenían uno, o los otros controladores o su supervisor asumían la carga de trabajo adicional durante ese período de descanso.”<sup>36</sup>

La escasez de controladores dificulta la liberación del personal para recibir capacitación, lo que, a su vez, también contribuye a aumentar el estrés y reducir la satisfacción laboral.

#### *Perforadoras de tronaduras*

Retirar a los operadores de las plataformas de perforación elimina la exposición al polvo y la vibración, los riesgos de acceso y salida y los riesgos de seguridad asociados con el desplazamiento de vehículos dentro de la mina. Las ventajas de una operación se describieron de la siguiente manera:

“Desde nuestro punto de vista en operaciones lo que buscamos es la precisión del proceso, la cual en perforación todavía depende mucho del factor humano. Pero antes esto dependía de un operador en la cabina que estaba expuesto a riesgos- a menudo estaban cerca de paredes, cerca de los bordes de los bancos o de los frentes del mineral. Entonces, sacar al operador de la cabina y colocarlo en el IROC en realidad mejora la utilización de la flota al mismo tiempo mejora la calidad de vida del operador - sin exposición al ruido, vibraciones o climas extremos como el frío. Pero también es más eficiente- por ejemplo, en el sitio el operador tiene un descanso de una hora para almorzar, pero además de ese tiempo sale de la cabina, viaja unos 30 minutos hasta el casino y luego lo mismo de regreso. Por lo tanto, es inevitable una subutilización del activo de perforación. Aquí, el operador de la perforadora autónoma todavía tiene una

<sup>34</sup> Chirgwin, P. (2021). Skills development and training of future workers in mining automation control rooms. *Computers in Human Behavior Reports*, 4, 100115. p. 7..

<sup>35</sup> ídem

<sup>36</sup> ídem

pausa para el almuerzo, pero elimina todo ese tiempo extra relacionado con el sitio... Además, la máquina continúa perforando de todos modos durante las pausas para el almuerzo y los cambios de turno”<sup>37</sup>

Un aumento del 37 % en la tasa de perforación y un mejoramiento en la precisión; así como también se reportó una mayor disponibilidad para una mina diferente<sup>38</sup>.

En los resúmenes de incidentes del Oeste de Australia (WA) se informaron varios incidentes asociados con equipos de perforación autónomos. En dos casos, la plataforma chocó con una berma o una artesa; en tres casos se produjo una colisión o casi colisión con otro equipo de perforación; y en un caso, la plataforma de perforación autónoma chocó con un vehículo ligero. El contacto entre vehículos ocurrió, no se explicó la causa del fallo del sistema para evitar obstáculos del equipo de perforación. Por ejemplo:

“En una mina a tajo abierto, una plataforma de perforación móvil autónoma se dirigía a una nueva ubicación del patrón de perforación. Durante el trayecto, la máquina entró en contacto con un vehículo ligero (LV) estacionado. La perforadora fue detenida y se informó a un supervisor. No hubo heridos. El resto de la flota autónoma quedó inactiva mientras se probaba la eficacia de los sistemas de detección de peligros. Se inició una investigación.”<sup>39</sup>

Si bien los equipos de perforación se mueven lentamente y, por lo tanto, la probabilidad de una colisión con consecuencias graves es baja, los resúmenes de incidentes destacan que las tecnologías para evitar obstáculos son falibles.

*Errores de entrada.* En otro caso, se señaló como causa del incidente un error de entrada en la ubicación del límite autónomo, es decir:

“Se actualizó un límite de perforación autónoma en una mina a tajo abierto para permitir que una perforadora autónoma se reubicara en otra área del patrón de perforación. Mientras se reubicaba, la perforadora autónoma cruzó el cono límite delimitado hacia un área de perforación manual. Los trabajadores de los alrededores vieron la perforadora autónoma detrás de una perforadora manual y llamaron al operador de la sala de control para que detuviera el desplazamiento de la perforadora autónoma. Se detuvo a unos 15 metros de la perforadora manual. Se notificó al supervisor y ambas perforadoras dejaron de funcionar. No hubo heridos y se inició una investigación. Se descubrió que el límite de perforación autónomo actualizado era incorrecto”. (énfasis añadido).<sup>40</sup>

Este es un ejemplo de error durante la entrada al sistema de control, que es una categoría general de errores potenciales asociados con la introducción de componentes autónomos.

Se han adoptado diferentes enfoques para el diseño de estaciones de trabajo de equipos de perforación autónomos para permitir tanto la tele operación como el control autónomo. En algunos casos, los controles físicos del equipo de perforación se han replicado en una sala de control. Por ejemplo, la estación de trabajo ilustrada en la Figura 7 se utiliza para controlar tres equipos de perforación automatizados. Otros enfoques se ilustran en la Figura 8, donde se proporcionan palancas de mando, pero abstraídas del contexto de la cabina de perforación.

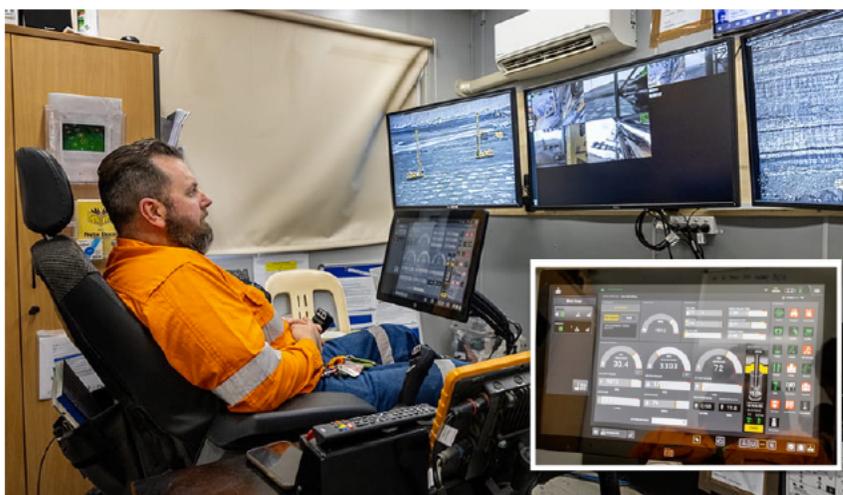


Figura 7: Réplica de la estación de trabajo de la cabina de perforación y de la interfaz para un equipo de perforación automatizado. (Westrac, 2022).

<sup>37</sup> Moore, P. (2023). Anglo American Los Bronces – inside the IROC. *International Mining*. <https://im-mining.com/2023/08/22/anglo-americanlos-bronces-inside-the-iroc/> (accessed August 23, 2023).

<sup>38</sup> Ellis, Z. (2023). Autonomous surface drilling: KGHM Robinson mine. *Presentation to the Mine Automation and Emerging Technologies Health and Safety Partnership meeting*, September 21, 2023.

<sup>39</sup> Incident summary SA-762-28966, 10/09/2018

<sup>40</sup> Incident summary SA-554-27908, 27/5/2018

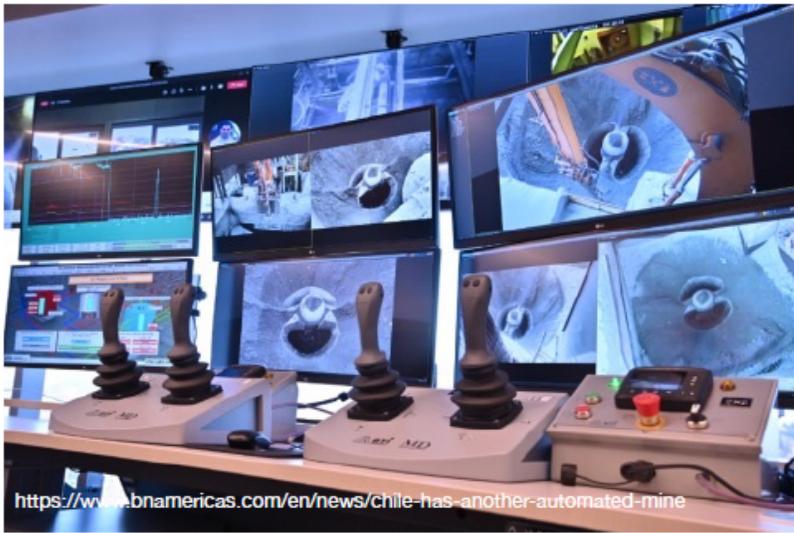


Figura 8: Controles de palanca de mando para equipos de perforación automatizados.

Otro enfoque se ilustra en la Figura 9. Múltiples transmisiones de cámaras de video proporcionaron una vista de 360 grados desde el equipo de perforación y desde un punto de vista remoto, ayudando al operador remoto a mantener conciencia de la situación global y local. Se replican las interfaces visuales proporcionadas anteriormente dentro de la cabina de perforación, sin embargo, los controles ubicados dentro de la cabina manual han sido reemplazados por un controlador Xbox inalámbrico.

Los controles del controlador inalámbrico Xbox provocan diferentes acciones en cada uno de los tres modos de operación (modo de perforación, modo de configuración y modo de propulsión). Esto crea la posibilidad de que se produzcan errores. La probabilidad de errores de modo se puede reducir asegurándose de que el modo actual de la máquina se reconozca fácilmente por parte de los operadores remotos. Por ejemplo, la retroalimentación auditiva puede proporcionar un medio para identificar el modo de la máquina que no depende de la atención visual.

Operar un control en una dirección que causa un efecto opuesto al previsto es otro posible mecanismo de error. La probabilidad se reduce asegurando la compatibilidad control-respuesta direccional. Determinar la relación control-respuesta direccional apropiada es complicado en esta situación porque la orientación del control remoto inalámbrico puede variar durante uso, sin embargo, parece haber una posible inconsistencia en las direcciones elegidas para "hoist", "jack up" en el modo de perforación, "swing deck up" en el modo de configuración (todo hacia arriba cuando el control remoto está en la orientación, ilustrada en la Figura 10); y las direcciones de control ilustradas para "mástil arriba" en el modo de configuración (la reversa).



Figura 9: Interfaz y estación de trabajo autónoma de perforación de pozos de voladura

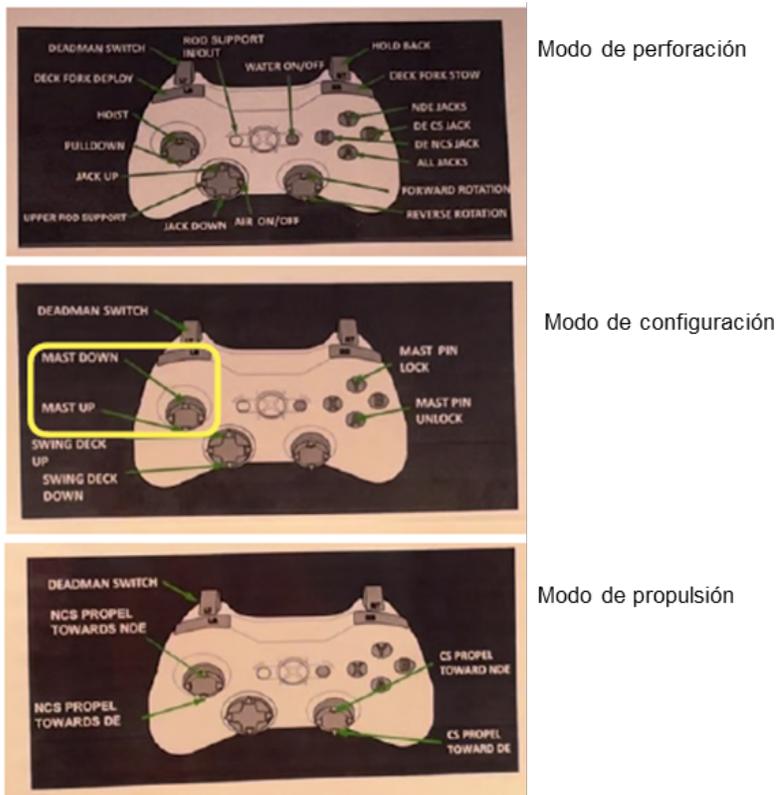


Figura 10: Funciones de perforación por control remoto en diferentes modos

### Dozers

La automatización de los dozers se ha desarrollado siguiendo el uso de operaciones de control remoto fuera de línea para retirar a los operadores humanos de áreas peligrosas como las pilas de almacenaje. La eliminación del operador de la cabina del dozer también elimina la exposición a vibraciones de todo el cuerpo y problemas de lesiones musculoesqueléticas, sin embargo, se crea el potencial de pérdida de conciencia de la situación debido a la pérdida de información directa de las señales que se perciben en terreno.

Pantallas de vídeo y una variedad de interfaces adicionales para mantener el conocimiento de la situación han sido implementadas para la operación tanto a control remoto como automatizada. Una evaluación integral de diferentes combinaciones de señales visuales, auditivas y de movimiento para la teleoperación de dozers se llevaron a cabo como parte de Proyecto ACARP C20021<sup>41</sup>. La Figura 11 ilustra la interfaz proporcionada para estas pruebas que incorpora información de instrumentos e información esquemática. El uso previsto era que los dozers empujaran en la superficie en las minas de carbón a cielo abierto. Se descubrió que la calidad visual era el factor dominante que influenciaba el rendimiento, mientras que la provisión de señales de movimiento no proporcionó ningún beneficio adicional en el rendimiento.



Figura 11: Interfaces proporcionadas para experimentos de interfaz de topadora remota (Dudley, 2014)

En la Figura 12 se ilustra una estación de trabajo de dozer semiautomatizada. Aquí, las interfaces proporcionadas incluyen ambas vistas en planta y en elevación de la posición del dozer, además de transmisiones de video para ayudar al operador a mantener la conciencia de la situación. En este caso, un operador supervisa de forma remota hasta cuatro dozers. Los beneficios para la seguridad y la salud incluyen la eliminación de la exposición a vibraciones de todo el cuerpo y otros factores de riesgo musculoesqueléticos, acceso y salida, y riesgos de transporte en terreno.

<sup>41</sup> Dudley, J. J. (2014). *Enhancing awareness to support teleoperation of a bulldozer*. MPhil Thesis, School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland.

La transición a la operación de dozer semiautónomo requirió una amplia capacitación de los operadores, comenzando con dos dozers y trabajando gradualmente hasta llegar a cuatro. La utilización se ha incrementado un 25% y la productividad ha mejorado mediante el software que automatiza la toma de decisiones. Se realizaron modificaciones en la planificación de producción para aprovechar la mayor disponibilidad de equipos<sup>42</sup>.



Figura 12: Interfaces de dozer semiautomatizadas.

*Pérdida de conciencia situacional.* Una colisión se produjo entre un dozer semi-automatizado y una excavadora en el 2019. El Regulador de Recursos de Nueva Gales del Sur ha proporcionado un informe de la investigación<sup>43</sup>. Se estaban utilizando dozers semiautónomos (SATS) para realizar operaciones de amontonamiento masivo. Esta técnica requiere una excavadora para que limpie el material del banco trasero hacia donde retroceden los dozers antes de comenzar a empujar. El material es utilizado para crear una hilera en la parte trasera del área de empuje del dozer. Se estableció un control de procedimiento que una máquina operada manualmente no debe operar en la ranura del dozer activo.

Un operador en entrenamiento supervisaba tres dozers semiautónomos desde la estación remota. Cada dozer está equipado con cuatro cámaras de video y las transmisiones de video son desplegadas en la estación de trabajo del operador (Figura 12). La estación de trabajo incluye controles de teleoperación. En modo semiautónomo, el operador asigna un dozer a una ranura y realiza el primer empuje a través del modo de teleoperación. Luego, el dozer continúa funcionando en la misma ranura de forma autónoma, hasta que se complete la misión o hasta que se hayan realizado 12 pases y el operador debe volver a conectarse con el dozer

Según el informe de la investigación:

“A las 13:30 horas, el operador de la excavadora reanudó su trabajo dentro de la zona de exclusión del SATS desde el norte, viajando hacia el sur. Dado que el borde se construyó utilizando material de las vías, algo de material suelto estaba colgando a lo largo del frente. El operador utilizó la excavadora para escalar el material suelto del frente, mientras viajaba hacia la sección sur de la zona de exclusión SATS.

Como la excavadora había escalado y limpiado previamente la zona norte, se construyó una berma entre el banco trasero y las ranuras de empuje del dozer SATS. Esto resultó en que la excavadora trabajara entre la cara alta de la pila y la berma. A medida que se redujo el material suelto, se añadió a la berma. La tarea avanzó hacia el sur hasta que la excavadora viajó hasta el final de la berma y se ubicó junto a la parte trasera de la ranura 16.

En este punto, el dozer DZ2003 estaba operando en la ranura 16, mientras que el dozer

<sup>42</sup> Gleeson, D. (2021). Thies hits new heights with SATS dozer technology at Lake Vermont. International Mining. <https://im-mining.com/2021/06/02/thies-hits-new-heights-sats-dozers-technology-lake-vermont/> (accessed August 9, 2023)

<sup>43</sup> NSW Resources Regulator (2019). *Collision between semi-autonomous dozer and an excavator*. DOC19/758086.

DZ2002 y el dozer DZ2010 estaban trabajando en ranuras adyacentes en la sección sur de la zona de exclusión, a unos 50 metros de distancia. El dozer DZ2003 llevaba algún tiempo funcionando de forma semiautónoma. Inmediatamente antes de la colisión, el operador del SATS había seleccionado y estaba observando el dozer DZ2002 hasta que el dozer DZ2010 dejó de empujar. El operador del SATS cambió a esta máquina e inició la falla de ubicación.

El dozer DZ2003 había completado un empuje y estaba retrocediendo hacia la parte trasera de la ranura 16 para comenzar el siguiente empuje. En ese momento la excavadora avanzó más allá de la berma y entró en la ranura 16. Alrededor de las 13:40 horas, el dozer DZ2003 golpeó la parte trasera de la excavadora. Cuando se realizó el contacto inicial, la excavadora fue empujada aproximadamente 1,5 metros fuera del camino, hacia la base del muro alto. Luego, la excavadora se detuvo y el dozer DZ2003 continuó avanzando en reversa, chocando con la excavadora varias veces al intentar alcanzar sus coordenadas GPS programadas.

El Dozer DZ2003 finalmente perdió tracción y después de unos segundos de inmersión, el sistema de control falló y dejó de desplazarse. Desde el contacto inicial con el dozer DZ2003, la parada fue de unos 14 segundos. La excavadora sufrió algunos daños, pero el operador resultó ileso.”<sup>44</sup>

Cuando el supervisor selecciona un dozer, una pantalla frente al operador muestra las cuatro cámaras correspondientes al dozer que es el foco de atención del operador. Un pequeño panel lateral también muestra dos vistas de cámara para cada uno de los otros tres dozers. La Figura 13 ilustra la vista del supervisor inmediatamente antes de una colisión. Si bien se dispuso de información al supervisor, no se proporcionó de una manera que facilitara el mantener un conocimiento preciso de la situación. Las personas son muy deficientes en tareas de vigilancia. Es totalmente comprensible que la colisión inminente no fuera identificada por el supervisor que estaba centrado en la falla de encontrar a otro dozer.

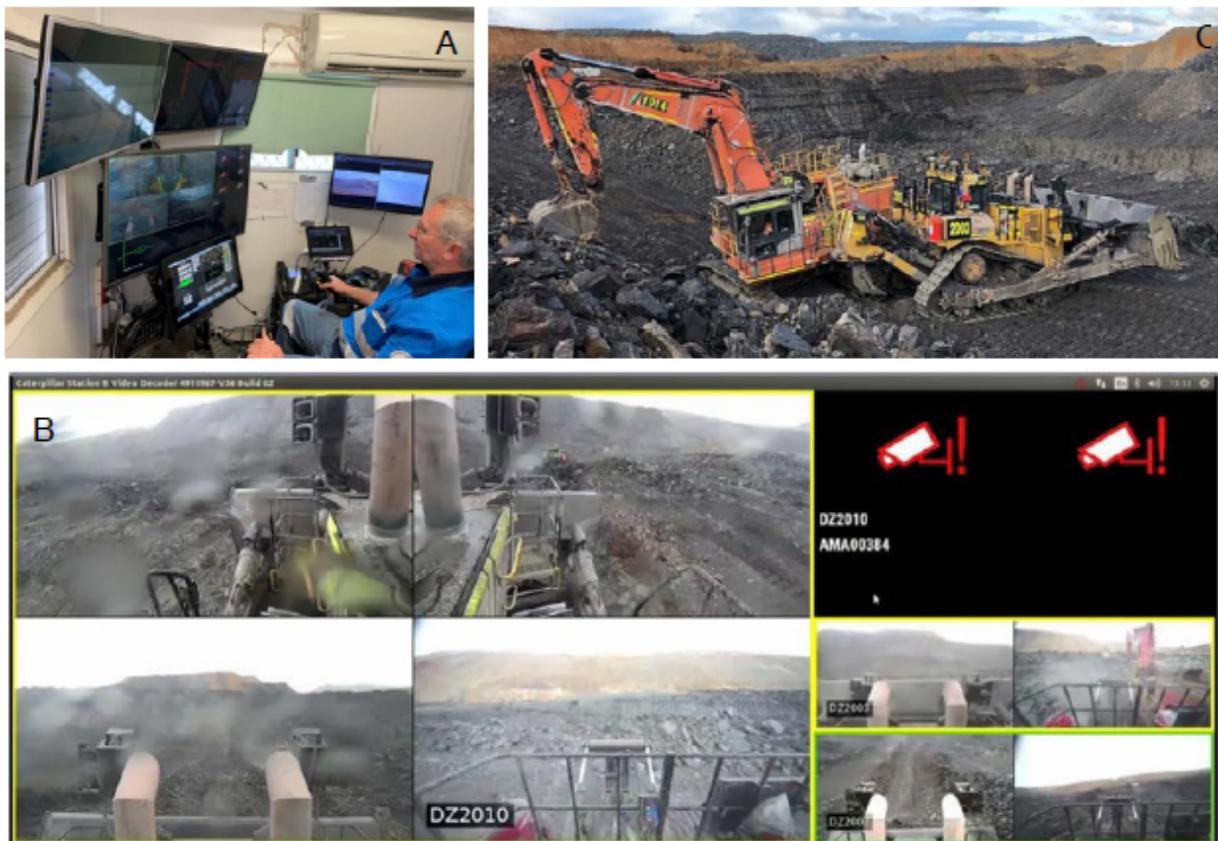


Figura 13: Estación de operador remoto proporcionada al supervisor de tres dozers semiautónomos (A - arriba a la izquierda) ; Imágenes de video disponibles (B - abajo) inmediatamente antes de la colisión entre la topadora 2003 y una excavadora (C - arriba a la derecha).

<sup>44</sup> ídem

## Longwalls

Trabajar en los túneles de una mina de carbón subterránea está asociado a una variedad de riesgos para la seguridad, las más destacadas son caídas de rocas, explosiones o ignición de metano. Los riesgos para la salud y, en particular, la exposición a el polvo respirable y el ruido también están asociados al trabajo en la zona. El proceso de minería longwall (de tajo largo) se centra en una máquina cizalla (la “cizalladora”) con grandes tambores de corte giratorios que se mueven hacia adelante y hacia atrás a lo largo de una superficie de carbón. Con cada pasada de la cizalla se muelen importantes “trozos” de carbón. El carbón cae sobre un sistema transportador que lo aleja de la mina.

La automatización tiene un gran potencial para reducir la exposición de los mineros a estos peligros. La tecnología actual ha trasladado a dos mineros a una sala de control en superficie. Aunque la mayoría de la tripulación permanece bajo tierra, trabajan en lugares menos peligrosos. La tecnología de guía remota dirige continuamente el longwall, trazando automáticamente su posición en tres dimensiones y permitiendo el monitoreo en tiempo real del avance. Las interfaces de la sala de control (Figura 13) proporcionan transmisiones de video e información adicional para compensar la pérdida de información perceptiva directa. Según CSIRO, la automatización de longwall ha aumentado la productividad entre un 5% y un 10% gracias a una mayor consistencia<sup>45</sup>.

Los tipos de falla asociados con la automatización de longwall incluyen: pérdida de conciencia de la situación resultante de la pérdida de percepción directa, incluida la vibración de la máquina y la información auditiva de los cabezales cortantes; pérdida de habilidad manual; interrupciones en la tecnología de comunicación; dificultades de comunicación; alta carga de trabajo cognitiva; y riesgos de lesiones musculoesqueléticas asociadas con el trabajo sedentario.

En lugar de trasladar permanentemente a algunos miembros del equipo desde el subsuelo a la sala de control, los mineros rotan entre la superficie y el subsuelo en diferentes turnos. Esto es beneficioso para rotar a los mineros en la exposición al trabajo de sala de control físicamente sedentaria, pero cognitivamente exigente, así como para mantener conocimientos y habilidades del trabajo subterráneo. Mientras se reducen los riesgos para la seguridad y la salud, una mayor automatización reducirá estas oportunidades de rotación.

Aunque las interfaces de la sala de control (Figura 14) proporcionan amplias fuentes de información y parecen bien diseñadas, los operadores observaron que vistas adicionales de las cámaras serían beneficiosas y que la comunicación entre la sala de control de superficie y los trabajadores en el tajo subterráneo del longwall fue difícil a veces.

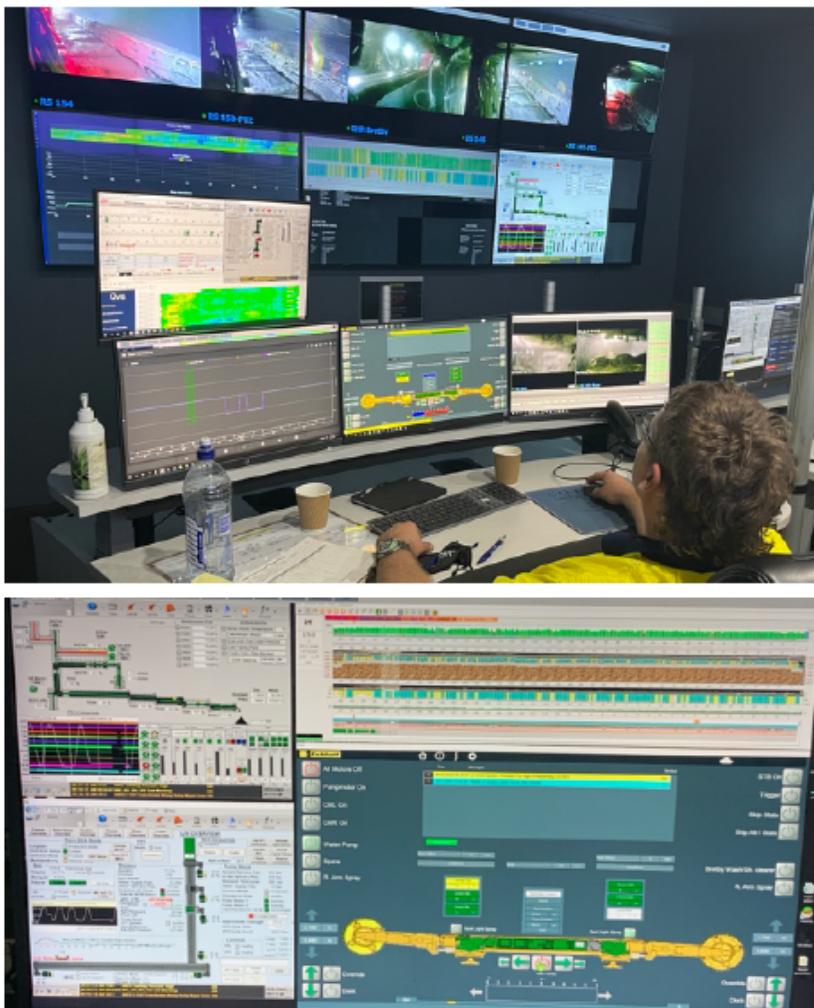


Figura 14: Sala de control automatizada de longwall e interfaz

<sup>45</sup> <https://www.csiro.au/en/work-with-us/industries/mining-resources/mining/longwall-automation>

## Vehículos de carga, transporte y descarga

Vehículos de carga, transporte y descarga (LHD) semiautomáticos han sido instalados en más de 50 minas en todo el mundo desde 2006. Los operadores ubicados en una sala de control cargan el cucharón LHD mediante un control teleoperado. A continuación, el cargador pasa al modo autónomo para desplazarse hasta el vertedero donde se descarga la carga de forma autónoma. Luego, el cargador regresa de forma autónoma al siguiente punto de carga seleccionado por el operador. Los operadores pueden ser responsables de supervisar varios cargadores. Una variedad de interfaces es proporcionada para permitir al operador remoto mantener el conocimiento de la situación y controlar remotamente la fase de carga. (Figura 15).

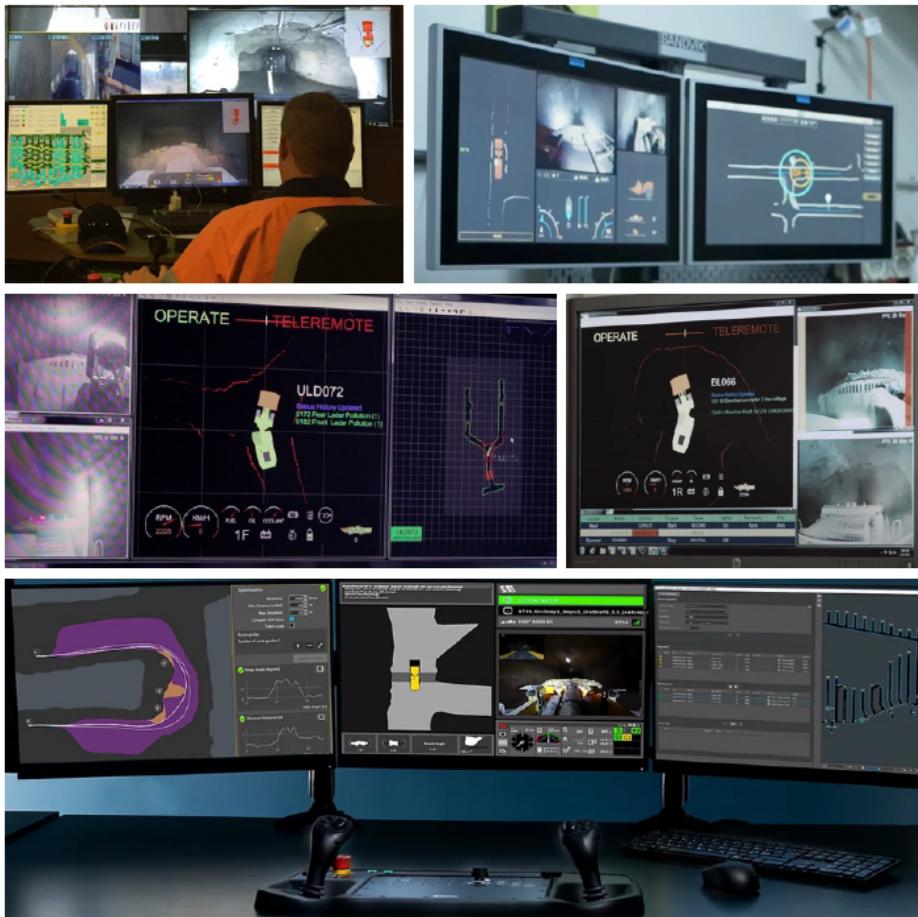


Figura 15: Interfaces de operador LHD subterráneos semiautónomos.

Los beneficios para la seguridad y la salud de remover a los mineros de estos vehículos subterráneos son claros. Se eliminan los riesgos musculoesqueléticos, incluidas las vibraciones de todo el cuerpo, así como los riesgos de colisiones de vehículos y lesiones en la cabeza asociados con los cucharones LHD que se enganchan en el costado mientras se desplazan. En un 16-20% se ha estimado la reducción de la exposición a las partículas de diésel asociada con la introducción de la automatización a las minas subterráneas de cobre<sup>46</sup>.

*Acceso no autorizado a zonas autónomas.* No se han identificado informes de lesiones asociadas con cargadores autónomos. Es probable que esto se deba, al menos en parte, a que la práctica actual es aislar todos los demás equipos y peatones de las zonas en las que operan los LHD autónomos. Sin embargo, se han producido incidentes en los que se han activado equipos automatizados en un área autónoma aislada con múltiples frentes de trabajo mientras había personas ubicadas en otro frente<sup>47</sup>.

Los cucharones cargados vía control remoto, o en promedio, contienen cargas más pequeñas que los cucharones cargados manualmente. Sin embargo, la productividad general es mayor porque surge una mayor utilización del equipo como consecuencia de poder continuar la operación durante las tronaduras y los cambios de turno. Es posible que los supervisores de LHD ubicados remotamente de los cargadores no distingan la calidad de la ruta y permitan que los cargadores conduzcan a velocidades que aumentan los requisitos de mantenimiento no planificados.

La ubicación de la estación de trabajo de control para los LHD semiautónomos varía según el sitio. Algunos sitios ubican la sala de control del LHD bajo tierra y fue considerado beneficioso para mantener la comunicación con el resto del personal bajo tierra. Otros sitios han optado por ubicar la sala de control LHD en la superficie de la mina para reducir el tiempo de viaje.

<sup>46</sup> Moreau, K., Lamanen, C., Bose, R., Shang, H., & Scott, J.A. (2021). Environmental impact improvements due to introducing automation into underground copper mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31, 1159-1167.

<sup>47</sup> Thompson, J. (2023). Hecla Greens Creek case study. <https://www.cdc.gov/niosh/mining/features/2023automationpartnershipmeeting.html>

subterráneo, o en un centro de operaciones remoto en una ubicación de la ciudad a cierta distancia de la mina. En una minera, la supervisión LHD semiautónoma se lleva a cabo tanto en una sala de control en la superficie de la mina como en una sala de control de la compañía ubicada en la ciudad. Esta ubicación adicional permite que el personal que no puede tomar un sistema de turno y continúe trabajando para la empresa.

La integración de cargadores semiautónomos en los sistemas de producción existentes no es sencilla y los sitios observaron que normalmente surgen dificultades para mantener la producción durante la transición. No todos los sitios que implementaron LHD semiautónomos han persistido con la tecnología y algunos sitios han realizado varios intentos antes de tener éxito. La implementación de la automatización LHD requiere un fuerte mandato de los niveles más altos de la empresa para tener éxito frente a las inevitables, aunque temporales, disminuciones de la producción durante la fase de implementación.

Esta observación es consistente con los resultados de un estudio de caso de la implementación exitosa de cargadores semiautónomos en CMOC North Parkes. Las estrategias para una implementación exitosa de la automatización incluyeron: involucrar a todas las personas que se verán afectadas; fomentar la comunicación constante entre operadores y diseñadores; proporcionar a los operadores información esencial; evitar proporcionar información no esencial; proporcionar flexibilidad a los operadores; empoderar a los operadores para que tomen medidas; y aprovechar las nuevas posibilidades que proporciona la automatización<sup>48</sup>.

Un problema identificado en North Parkes durante la preparación inicial para la transición a LHD autónomos fue que todas las tareas subterráneas se verían afectadas por el cambio. Por ejemplo, en el cambio de turno, la operación continua de los LHD desde la superficie permite que la producción continúe, eliminando la presión del tiempo y permitiendo más tiempo para el cambio de turno. Sin embargo, también se identificó que se impediría el acceso a, o a través de, secciones de la mina donde la carga autónoma estaba en operación y esto impactaría en el desempeño de muchas otras tareas.

La comunicación constante entre operadores y diseñadores durante la implementación y posterior operación de los cargadores semiautónomos fue fundamental para desarrollar y refinar la interfaz de usuario de la sala de control. La presencia continua de la experiencia del fabricante en el sitio permitió una rápida retroalimentación con los diseñadores.

Brindar a los operadores oportunidades para sugerir modificaciones al sistema fue una característica clave en el éxito de la implementación. Los operadores actualizaron continuamente una lista de problemas y una "lista de deseos" de mejoras, que se enviaron a los diseñadores del sistema y se produjeron muchos cambios. Por ejemplo, se produjeron daños en el equipo porque el cargador golpeaba las paredes del punto de extracción mientras estaba bajo control manual. Se sugirió utilizar los escáneres láser ya instalados para la navegación autónoma para detectar la proximidad de las paredes durante la operación manual y transmitir esta información a los operadores a través de cambios en el color de la información de escaneo proporcionada en la ventana de asistencia de teleoperación. Esta información también se utilizó para aplicar automáticamente los frenos si era necesario para evitar colisiones con las paredes.

De manera similar, el deslizamiento de las ruedas causó daños a las ruedas del LHD, pero fue difícil de detectar por parte de los operadores mientras cargaban de forma remota. Se agregó un sensor de detección de deslizamiento de las ruedas y se proporcionó al operador una indicación de deslizamiento de las ruedas a través de un cambio en el color de las ruedas esquemáticas del cargador en la ventana de asistencia de teleoperación. En ambos casos, la presentación de información relevante a los operadores de una manera significativa garantizó que la información pudiera usarse de manera efectiva para reducir los daños al equipo.

Información relevante también es transmitida de forma inadvertida, en lugar de intencionadamente. Un operador explicó que puede ser difícil medir cuándo el cucharón se ha bajado lo suficientemente al suelo como preparación para la carga; sin embargo, si el cucharón ejerce demasiada presión sobre el suelo, las ruedas delanteras se levantarán y deslizarán. El operador notó que el movimiento de la cámara que se podía ver en el video cuando se bajaba el cucharón era una señal útil.

Por el contrario, otro cambio realizado durante la implementación del sistema fue reducir la cantidad de alarmas de falla presentadas al operador. Muchas de estas alarmas, si bien eran relevantes para un ingeniero durante la puesta en servicio, no lo eran para el funcionamiento diario del LHD. Además de ser una molestia para los operadores porque cada mensaje requería confirmación, habituándose a los frecuentes mensajes de error no esenciales que llevaron en al menos una ocasión a que un operador no reaccionara ante un error crítico, con consecuencias potencialmente graves.

<sup>48</sup> Burgess-Limerick, R., Horberry, T., Cronin, J. y Steiner, L. (2017). Integración de sistemas humanos de automatización minera: un estudio de caso de éxito en CMOC-Northparkes. Actas de la 13.ª Conferencia de operadores subterráneos de AusIMM 2017, págs. 93-98. Melbourne: AusIMM.

Otra estrategia empleada fue ofrecer flexibilidad en el suministro de información. Los LHD están equipados con un micrófono y el audio está disponible para los operadores; sin embargo, se descubrió que los operadores no deseaban esta información y el audio se omitió porque la molestia del ruido superaba el beneficio de cualquier información relevante transmitida.

Muchos detalles de la implementación de la automatización quedaron en manos de los equipos de producción para que los determinaran. Por ejemplo, en la transición a la carga autónoma, algunas cuadrillas decidieron que los miembros recibirían capacitación para el control autónomo, mientras que otras cuadrillas optaron por tener operadores autónomos especializados. El número de LHD de los que debería ser responsable un operador también fue determinado por las cuadrillas. Si bien una sola persona puede controlar cuatro cargadores, la carga cognitiva era demasiado fatigante y se determinó que tres era lo óptimo. Durante la operación, algunas cuadrillas optan por asignar tres LHD para que sean controlados por cada operador, mientras que otras cuadrillas permitieron una mayor flexibilidad, y todos los cargadores pueden ser controlados por cualquiera de los tres operadores en turno en cualquier momento.

Permitir que las cuadrillas elijan diferentes estrategias brinda la oportunidad de evaluar diferentes opciones, y las comparaciones entre la productividad del operador y la cuadrilla se pueden utilizar para afinar las estrategias del operador e identificar aspectos del comportamiento del operador que conducen a una mayor productividad. Los equipos de producción también han actuado sin involucrar a los diseñadores del sistema. Un problema encontrado fue que las cámaras y los escáneres acumulaban polvo, causando una falla en la automatización. Mientras los diseñadores del sistema exploraban opciones para los mecanismos de limpieza a bordo, las cuadrillas idearon una forma de verter agua sobre la cámara y los escáneres cuando fuera necesario. Hacer que todos los aspectos del sistema de control sean lo más flexibles posible y brindar a los operadores el máximo control sobre la automatización aumenta las oportunidades que tienen los operadores para adaptarse a nuevas situaciones.

La implementación de la carga autónoma también ha tenido consecuencias imprevistas para futuras mejoras de procesos. La capacidad de ejecutar de manera más flexible diferentes patrones de extracción y modificar estos patrones de extracción impulsó el desarrollo de software de optimización para determinar en tiempo real el patrón óptimo de extracción. Esta es en sí misma una forma de automatización que brindará asistencia al jefe de turno para mantener el conocimiento de la situación de la extracción y ayudar a la toma de decisiones.

## Tipos de falla

La introducción de componentes automatizados introduce nuevos tipos de falla que tienen potencial de resultados adversos para la seguridad y la salud, incluidos:

- *Deficiencias de software.* Es difícil verificar que el software sea confiable. Las pruebas sólo pueden revelar la presencia de defectos en lugar de probar la ausencia de errores. Esto es particularmente cierto si el aprendizaje automático (machine learning) está involucrado. Operaciones que han implementado maquinaria autónoma describieron dedicar un tiempo considerable a verificar el funcionamiento de las actualizaciones de software antes de su lanzamiento.
- *Interrupción de tecnologías de comunicaciones.* Los sistemas mineros autónomos dependen de la continuidad de comunicación digital. Se requiere un esfuerzo considerable para garantizar que las redes necesarias estén en lugar y sean mantenidas. La pérdida de conectividad es una causa común de pérdida de productividad y, al menos, un incidente potencialmente grave ha ocurrido, en el cual una interrupción de la comunicación estuvo implicada.
- *Violación de seguridad cibernética.* Infracciones se han producido y este es un riesgo que va a aumentar. Atención continua a la seguridad de la red dado es garantizada dado el daño potencial que un actor malintencionado podría lograr. Los aspectos humanos de la ciberseguridad también requieren atención.
- *Acceso no autorizado a zonas autónomas.* Se han producido incidentes en minas a cielo abierto donde los vehículos no equipados con sistemas de reconocimiento del sitio han accedido a zonas autónomas activas sin escolta. En el contexto subterráneo se han producido incidentes en los cuales se activaron equipos automatizados en un área autónoma aislada con múltiples frentes mientras se ubicaban personas en el área
- *Pérdida de habilidad manual.* Las habilidades manuales de los operadores de máquinas se deteriorarán si no se practican. Si esto es una preocupación dependerá de si el concepto de operación del sistema incluye el restablecimiento de operación manual en cualquier momento y en qué circunstancias.
- *Exceso de confianza.* Es probable que las personas que trabajan cerca de sistemas autónomos cambien su comportamiento para aprovechar las características de seguridad percibidas del sistema. Conducir un vehículo ligero a través de una intersección frente a un camión autónomo, confiando en que el camión tomará medidas evasivas, es un ejemplo. Garantizar que las personas que trabajan con componentes autónomos tengan una comprensión precisa de las capacidades y limitaciones del sistema, así como de las limitaciones físicas, es fundamental. También lo es la supervisión, el seguimiento y el cumplimiento de los procedimientos relacionados con la seguridad, tal como la jerarquía de las reglas de tránsito.
- *Errores de entrada.* Siempre que los controladores humanos sean responsables de ingresar información al sistema existe la posibilidad de error. La probabilidad de tales errores se reduce mediante un eficaz software y diseño de interfaz. Cuando el control remoto esté incluido en el concepto de operaciones, el diseño de los controles de las estaciones de trabajo debe tomar en cuenta la posibilidad de errores y garantizar que se mantenga la compatibilidad direccional de control-respuesta.
- *Cambios de modo involuntarios.* Siempre que el equipo pueda funcionar en diferentes modos, existe potencial para cambiar inadvertidamente entre modos. Esto incluye cambiar entre modos autónomo y manual.
- *Interacciones complejas.* Los sistemas que incluyan componentes autónomos pueden dar lugar a consecuencias adversas imprevistas incluso cuando todos los componentes funcionan según lo previsto. El uso de técnicas de análisis de riesgos basadas en sistemas, como STPA, es recomendado para identificar y controlar tales resultados potenciales.
- *Limitaciones de los sensores.* Los sensores tienen limitaciones que pueden hacer que el sistema pierda conciencia de la situación. Estas limitaciones requieren análisis y gestión.
- *Falta de conciencia del sistema sobre el entorno.* Remover a los operadores del contacto perceptual directo con el entorno operativo crea el potencial de pérdida de conciencia del entorno. Un ejemplo son las rutas mojadas que provocan pérdida de tracción.
- *Pérdida de conciencia de la situación.* Han ocurrido varios incidentes en los que los operadores de equipos manuales en las proximidades de un transporte autónomo no han podido predecir el movimiento de este a pesar de estar provisto de una interfaz de sistema destinada a proporcionar esta información. También se han producido incidentes en los que un operador de la sala de control no ha podido identificar la situación, por a pesar, por ejemplo, de que las transmisiones de vídeo proporcionan la información necesaria. Estos incidentes resaltan la diferencia entre la información disponible y la que

es percibida, y de ahí la importancia crítica del diseño de la interfaz para asistir a las personas dentro de los sistemas a comprender los estados actuales del sistema y predecir con precisión la probabilidad de futuros estados.

- *Desafíos de conciencia situacional distribuida.* Una cuestión relacionada es que, en muchos sistemas, no habrá ningún individuo que posea toda la información necesaria para mantener el conocimiento de la situación general de todo el sistema. En cambio, la conciencia de la situación se distribuye entre las personas y la tecnología dentro del sistema. Mantener un conocimiento preciso de la situación distribuida es un proceso dinámico y colaborativo que requiere una interacción momento a momento entre los miembros del equipo y la tecnología que puede verse obstaculizada por limitaciones en el diseño del sistema o de la interfaz.
- *Problemas de comunicación.* La comunicación entre los miembros del equipo es fundamental. Dificultades asociadas con limitaciones tecnológicas o sobrecarga cognitiva causada por múltiples canales simultáneos de comunicación, pueden obstaculizar el desempeño con posibles consecuencias para la seguridad o la salud. También se requieren habilidades no técnicas y la ausencia de riesgos psicosociales para garantizar un trabajo en equipo eficaz.
- *Carga de trabajo.* Existe potencial de sobrecarga de trabajo para los operadores de la sala de control u otras personas afectadas por la introducción de la automatización, con los consiguientes riesgos de errores y consecuencias adversas para la salud. La carga de trabajo de todas las personas dentro del sistema es un aspecto clave a considerar en el diseño del sistema.
- *Factores de riesgo de lesiones musculoesqueléticas.* El trabajo sedentario de larga duración con pocos descansos combinado con posturas estáticas o incómodas y/o uso excesivo de dispositivos señaladores, especialmente si va acompañado de factores de riesgo psicosocial como una alta carga de trabajo cognitiva, presión de tiempo y/o conflicto con compañeros o supervisores, puede crear una situación en la cual el riesgo de lesión musculoesquelética es alto.

Una gestión de riesgos eficaz requiere un análisis de estos posibles eventos no deseados durante el diseño del sistema. Los análisis realizados deben incluir evaluaciones de riesgos basadas en tareas que involucren a una variedad de operadores y otras personas afectadas por el sistema, y técnicas basadas en sistemas, además de las técnicas convencionales de análisis de riesgos basadas en peligros. Todos estos tipos de falla implican interacciones humanas con la tecnología. Los riesgos deben reducirse durante el diseño de un sistema centrado en el ser humano que se centre en el papel, las capacidades y las limitaciones de las personas en el sistema. La gestión de la mina debe comprender los riesgos residuales para permitir que se diseñen, implementen y supervisen controles eficaces.

## Integración humano-sistemas

La integración de humanos-sistemas (HSI) se refiere a un conjunto de procesos de ingeniería de sistemas desarrollados originalmente por la industria de Defensa para garantizar que los problemas relacionados con los seres humanos se consideren adecuadamente durante la planificación, diseño, desarrollo y evaluación del sistema<sup>49</sup>.

Por ejemplo, el Departamento de Defensa de EE.UU.<sup>50</sup> exige a los directores de programas que lleven a cabo una combinación de actividades de gestión de riesgos, ingeniería, análisis y diseño centrado en las personas incluido:

- el desarrollo de un plan de gestión de integración de humanos-sistemas •
- adoptar un enfoque de diseño de ingeniería humana para operadores y mantenedores
- análisis de tareas
- análisis de errores humanos
- modelado y simulación humana
- usabilidad y otras pruebas de usuario
- gestión de riesgos durante todo el ciclo de vida del diseño
- desarrollo de una estrategia de formación

Y obliga a los ingenieros de sistemas líderes a:

“Utilizar un enfoque de diseño centrado en el ser humano para la definición, diseño, desarrollo, prueba y evaluación para optimizar el rendimiento del sistema humano... Realizar evaluaciones frecuentes e iterativas del usuario final. validación de características y usabilidad... (y)... garantizar que los riesgos de integración de sistemas humanos sean identificados y gestionados durante todo el ciclo de vida del programa...”<sup>51</sup>

Los procesos descritos tienen como objetivo garantizar que las consideraciones humanas se integren en el proceso de adquisición del sistema. La importancia de incluir expertos en la materia de integración de sistemas humanos a lo largo del programa de adquisiciones se hace explícito. Cabe destacar que, a diferencia de la guía de automatización en minería, la seguridad del sistema se considera un dominio dentro de la integración de humanos sistemas.

De manera similar, la Agencia Nacional de Aeronáutica y Espacial de EE. UU. exige que la integración de humanos sistemas sea implementado y documentado en un Plan de Integración de Humanos Sistemas. El plan identifica los pasos y métricas que se utilizarán a lo largo del ciclo de vida del proyecto y los métodos que se adoptarán para garantizar la eficacia de la implementación. Se entiende que la aplicación eficaz de la integración de humanos sistemas da como resultado mayor seguridad y salud, mayor satisfacción y confianza del usuario, ¡mayor facilidad de uso y reducción tiempo de entrenamiento; todo ello conduce a una mayor productividad y eficacia.

Los métodos se han ido difundido progresivamente a la industria civil. Por ejemplo, la administración del Ferrocarril Federal de EE.UU.<sup>52</sup> define HSI como un "enfoque sistemático, que abarca a toda la organización, para implementar nuevas tecnologías y modernizar los sistemas existentes." Combina métodos, técnicas y herramientas diseñadas enfatizar el papel central y la importancia de los usuarios finales en los procesos o tecnologías organizacionales. Orientaciones útiles de HSI se han proporcionado para la adquisición de tecnologías ferroviarias compleja<sup>53</sup>.

---

<sup>49</sup> International Council on Systems Engineering (2015). *INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*. Wiley.

<sup>50</sup> USA Department of Defense (2022b). *Instruction 5000.95. Human Systems Integration in Defense Acquisition*. p. 6.

<sup>51</sup> USA Department of Defense (2020). *Instruction 5000.88 Engineering Defense Systems*. p. 23.

<sup>52</sup> USA Federal Railroad Administration. *Human Systems Integration*. <https://railroads.dot.gov/human-factors/elearning-attention/human-systems-integration>

<sup>53</sup> Melnik, G., Roth, E., Multer, J., Safar, H., & Isaacs, M. (2018). *An Acquisition Approach to Adopting human Systems Integration in the Railroad Industry*. US DOT. DOT/FRA/ORD-18/05.

## HSI para la adquisición de sistemas mineros

La integración de humanos sistemas incorpora análisis, diseño y evaluación centrados en el ser humano dentro del proceso más amplio de ingeniería de sistemas. Es decir, la integración de humanos sistemas es un proceso continuo que debe comenzar durante la definición de requisitos, continuar durante las iteraciones del diseño del sistema y durante la puesta en marcha y operación para verificar que se hayan alcanzado los objetivos de rendimiento, seguridad y salud.

En la Figura 16 se presenta un marco para la integración de humanos sistemas durante la implementación de nuevas tecnologías en minería<sup>54</sup>. Se definen seis áreas relevantes para la minería: dotación de personal; personal; capacitación; ingeniería de factores humanos; seguridad; y salud.

La “dotación de personal” se refiere a decisiones relativas al número y las características de los roles que serán necesarios para operar y mantener el sistema conjunto humano-automatización. Las decisiones en este caso bien pueden requerir la consideración de los resultados de las investigaciones en otros ámbitos, especialmente cuando aspectos de carga de trabajo están involucrados.

Los ámbitos de “personal” y “capacitación” se refieren, respectivamente, a cuestiones relacionadas con las características del personal que será seleccionado para desempeñar esas funciones; y el alcance y los métodos de capacitación y evaluación de competencias involucrados en la preparación del personal para obtener y mantener las competencias (conocimientos, habilidades y habilidades) requeridas para una operación segura y efectiva y el mantenimiento del sistema conjunto de humano-automatización. En lugar de disminuir, es probable que aumenten los requisitos de capacitación para los operadores que interactúan con sistemas altamente autónomos para garantizar que se comprenda completamente el funcionamiento de la automatización. Por ejemplo, los controladores de sistemas automatizados deben comprender: los peligros y la lógica del sistema, y las razones detrás de los procedimientos críticos para la seguridad; resultados potenciales de anular los controles; y cómo interpretar la retroalimentación. También se requieren habilidades para resolver problemas y afrontar eventos imprevistos. Los procedimientos de emergencia deben ser sobre-aprendidos y practicarse con frecuencia.

Los modelos de diseño de sistemas instruccionales<sup>55</sup> ejemplifican la aplicación de los principios de los factores humanos a la formación. En esencia, dichos modelos implican pasos iniciales de análisis (análisis de la situación, tarea, interfaz del equipo, trainees, necesidades de capacitación y recursos, que conducen a la definición de las especificaciones funcionales de la capacitación), seguidos de diseño y desarrollo (generación del concepto de capacitación, desarrollo y prototipo del sistema de capacitación, y pruebas de usabilidad) y evaluación del sistema (determinación de los criterios de evaluación de la capacitación, recopilación y análisis de estos datos y la subsecuente modificación de la capacitación, si está indicado).

El paso inicial del análisis (o análisis de las necesidades de capacitación) en el diseño de la capacitación es fundamental. En particular, se requiere un análisis exhaustivo de las tareas realizadas por los operadores y mantenedores de equipos antes de poder determinar las necesidades de capacitación y las especificaciones funcionales asociadas. El objetivo del análisis de tareas es describir los conocimientos, habilidades y comportamientos necesarios para el desempeño exitoso de la tarea e identificar las posibles fuentes y consecuencias del error humano. Este análisis de tareas normalmente implicaría entrevistas con expertos, revisiones de procedimientos de operación y mantenimiento y observaciones del equipo en uso. Debe incluir la consideración de información requerida por los operadores y mantenedores de equipos y cómo se obtiene esta información, los pasos involucrados en la toma de decisiones y la resolución de problemas, las secuencias de acción y los requisitos de atención de la tarea. El análisis de tareas debe realizarse de manera sistemática y estar bien documentado para proporcionar una base sólida para el diseño de la capacitación y proporcionar un modelo para futuros análisis de necesidades de capacitación.

Una extensión del análisis de tareas para incluir un análisis de tareas cognitivas puede estar justificada para interfaces tarea- equipo más complejas. El análisis de tareas cognitivas busca comprender los procesos cognitivos y los requisitos del desempeño de la tarea, generalmente mediante el uso de protocolos verbales y entrevistas estructuradas con expertos. Los resultados de un análisis de tareas cognitivas incluyen la identificación de la información utilizada durante la toma de decisiones complejas, así como la naturaleza de la toma de decisiones. El análisis de la tarea cognitiva también puede revelar información que sustentará el diseño de la capacitación y la evaluación. Nuevamente, el resultado de un análisis de tareas cognitivas puede incluir la identificación de deficiencias de diseño que deberían retroalimentar el proceso de diseño.

<sup>54</sup> Burgess-Limerick, R. (2020). Human-systems integration for the safe implementation of automation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37, 1799-1806.

<sup>55</sup> Gordon, S.E. (1994). *Systematic Training Program Design: Maximising Effectiveness and Minimizing Liability*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

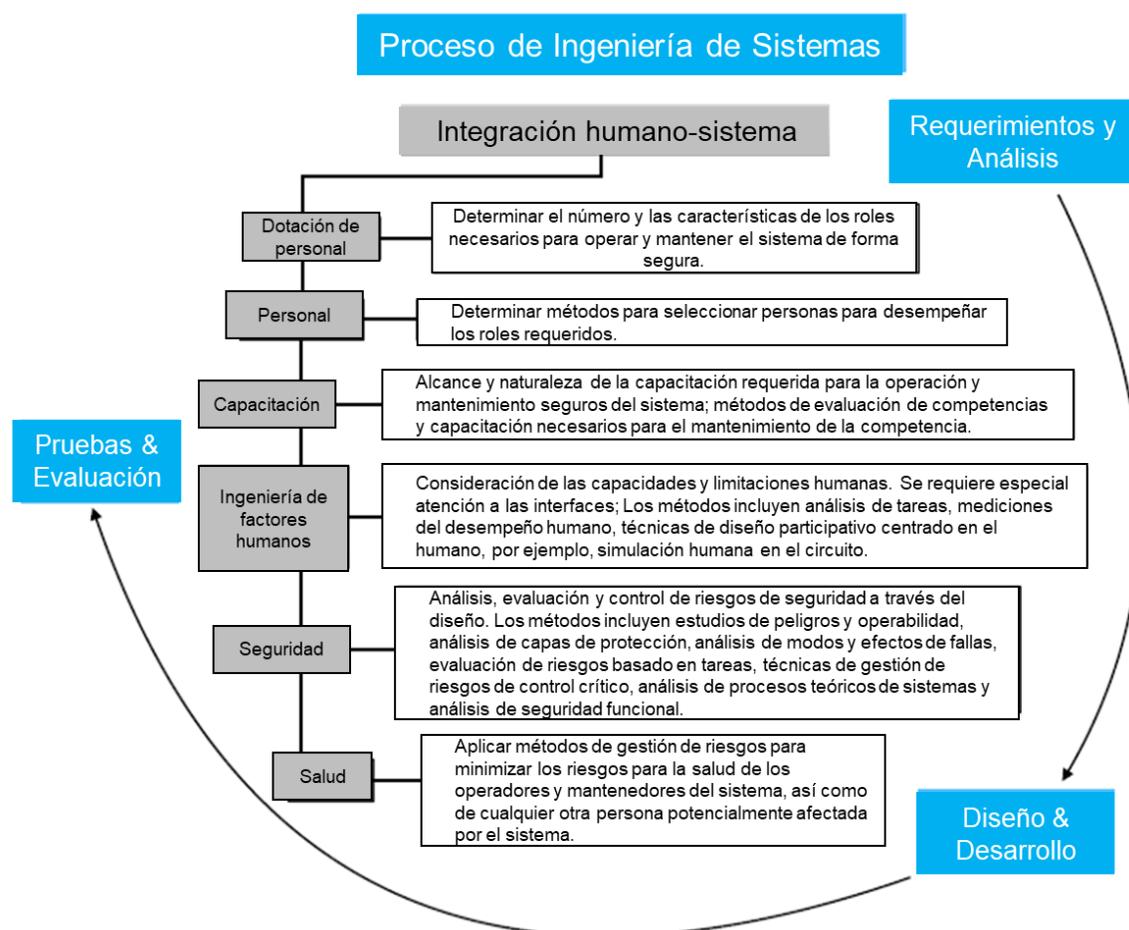


Figura 16: Integración de sistemas humanos para la automatización minera.

Los resultados del análisis de tareas también se utilizan en la segunda fase del diseño de la capacitación para definir los contenidos del programa de capacitación, así como la estrategia de instrucción requerida. Independiente del contenido de la formación (las competencias requeridas), o los métodos empleados las estrategias más eficaces de instrucción incorporan cuatro principios básicos:

1. La presentación de los conceptos a aprender
2. Demostración de los conocimientos, habilidades y comportamientos requeridos
3. Oportunidades para practicar.
4. Retroalimentación durante y después de la práctica<sup>56</sup>

Un concepto inicial de diseño de capacitación generalmente se refina de forma iterativa mediante la evaluación de la usabilidad de modelos de entrenamiento prototipo, hasta que un prototipo final completamente funcional se considere listo para su uso a gran escala. desarrollo. Los aspectos a considerar incluyen la introducción de variaciones y la naturaleza y programación de retroalimentación.

Un caso presentado<sup>57</sup> que sugiere que la variación en la forma en que las tareas son ordenadas y en las versiones de las mismas a practicar, y que menos frecuente retroalimentación se debe proporcionar. Si bien el rendimiento inmediato puede verse reducido, la retención y la generalización son reforzadas como consecuencia del procesamiento más profundo de la información requerida durante la práctica.

La evaluación de las consecuencias de la formación es también un paso esencial y no trivial, y el análisis de tareas ayuda a determinar las medidas de desempeño apropiadas que se utilizarán en la evaluación (o evaluación de competencias). Una evaluación válida de la formación requiere una cuidadosa selección de los criterios de evaluación y medidas (estrechamente relacionadas con los resultados del análisis de tareas) y la recopilación y el análisis sistemáticos de datos. El uso de la simulación es un método prometedor para permitir que los alumnos estén expuestos a eventos raros, como, así como para la evaluación de competencias.

La "ingeniería de factores humanos" abarca la consideración de las capacidades y limitaciones humanas en el diseño, desarrollo y evaluación de sistemas<sup>58</sup>. En el contexto de la automatización y la tecnología, esto es especialmente importante en el diseño de interfaces entre personas y componentes automatizados. Aunque el uso de estándares de ingeniería humana (por ejemplo,

<sup>56</sup> Salas, E., & Cannon-Bowers, J. (2001). The science of training: A decade of progress. *Annual Reviews of Psychology*, 52, 471-499.

<sup>57</sup> Schmidt, R.A., & Bjork, R.A. (1992). New conceptualizations of practice: Common principles in three paradigms suggest new concepts for training. *Psychological Science*, 3, 207-217.

<sup>58</sup> Horberry, T., Burgess-Limerick, R., & Steiner, L. (2011). Human factors for the design, operation and maintenance of mining equipment. Boca Raton: CRC Press.

MIL-STD-1472H) puede ser útil, pero no es suficiente. Las normas prescriptivas son a menudo demasiado generales para ser útiles en situaciones específicas, no abordan compensaciones que pueden ser necesarias y reflejan la tecnología de la época en la que fueron escritos.

Otros métodos empleados en ingeniería de factores humanos incluyen análisis de tareas como los descritos en la sección anterior, y medidas de desempeño humano (por ejemplo, carga de trabajo, usabilidad, conciencia de la situación), así como técnicas de diseño participativo centrado en el ser humano<sup>59</sup>. Simulaciones de humano en el circuito permiten el análisis de las actividades realizadas para lograr las tareas durante la fase de diseño<sup>60</sup>.

La norma ISO 9241 proporciona principios para el diseño centrado en el ser humano de sistemas interactivos basados en computadores que será relevante para muchos proyectos de automatización:

- a) El diseño se basa en una comprensión explícita de los usuarios, las tareas y los entornos
- b) los usuarios participan durante todo el diseño y el desarrollo
- c) el diseño es impulsado y redefinido mediante evaluaciones centradas en el usuario
- d) el proceso es iterativo
- e) el diseño aborda toda la experiencia del usuario
- f) el equipo de diseño incluye habilidades y perspectivas multidisciplinarias<sup>61</sup>

Casos de uso, es decir, una descripción de una tarea realizada por una persona que interactúa con un sistema y las responsabilidades del sistema para realizar esa tarea<sup>62</sup>, proporcionan un punto de partida para el diseño de la interfaz de usuario.

El dominio de “seguridad” incluye la consideración de riesgos de seguridad como los identificados en la norma ISO 17757. Los métodos relevantes incluyen técnicas tradicionales de análisis y evaluación de riesgos, como peligro y estudios de operabilidad, análisis de capas de protección, tipos de falla y análisis de efectos, así como análisis de seguridad funcional y análisis de procesos teóricos de sistemas (STPA).

STPA en particular puede ser útil para el análisis de sistemas complejos que involucran componentes automatizados porque en el análisis se incluyen tanto el software como los operadores humanos<sup>63</sup>. STPA es un método de análisis proactivo que identifica potenciales condiciones no seguras durante el desarrollo y evita una simplista causalidad inherente a las técnicas tradicionales. La seguridad es tratada como un problema de control en vez de un problema de prevención. Las condiciones inseguras se consideran consecuencia de procesos dinámicos complejos que pueden operar concurrentemente. STPA también incluye la consideración de la perspectiva más amplia, dinámica, contexto organizativo en el que se sitúa el sistema automatizado. STPA se ha utilizado con éxito durante el desarrollo de dozers automatizados<sup>64</sup> y transporte automatizado<sup>65</sup>. Otros sistemas basados Las técnicas de análisis (p. ej., SAfER) también pueden ser útiles<sup>66</sup>.

El área de la “salud ocupacional” abarca el uso de técnicas de gestión de riesgos y, en particular, de evaluación de riesgos basada en tareas<sup>67</sup>, para garantizar que el diseño del sistema minimice los riesgos de consecuencias adversas para la salud de los operadores y mantenedores del sistema y, de hecho, de cualquier otra persona potencialmente afectada por las actividades del sistema. Estos análisis deben abarcar todos los aspectos operativos y de mantenimiento. asociados con el componente o sistema autónomo.

Un problema de salud asociado con la introducción de sistemas autónomos en la minería es el potencial impacto en la salud física y mental de los operadores de la sala de control encargados de interactuar con sistemas autónomos. Estrés asociado con cargas de trabajo cognitivas altas (o bajas), potencialmente combinadas con interacciones sociales reducidas y bajo control de la carga de trabajo, y/o presiones de producción, pueden conducir a consecuencias adversas para la salud mental.

Un enfoque general en la integración de humanos sistemas incluye la consideración de

<sup>59</sup> Horberry, T., Burgess-Limerick, R & Steiner, L. (2018). *Human-Centered Design for Mining Equipment and New Technology*. Boca Raton: CRC Press.

<sup>60</sup> International Council on Systems Engineering (2023). *Human Systems Integration: A Primer. Volume 1*. INCOSE.

<sup>61</sup> International Standards Organisation (2010). *Ergonomics of human-system interaction Part 210: Human-centred design for interactive systems*. ISO9241-210. p. 9..

<sup>62</sup> Constantine, L.L. & Lockwood, L.A.D. (2001) *Structure and Style in Use Cases for User Interface Design*. In M. van Harmelen (ed.), *Object-Modeling and User Interface Design*. Addison-Wesley.

<sup>63</sup> Leveson, N.G. & Thomas, J.P. (2018). *STPA handbook*. MIT.

<sup>64</sup> Beasley, P. & McAree, R. (2020) *SATS Automated Mission Planning*. ACARP project C27063, Current projects report, February 2020.

<sup>65</sup> Baillio, B. (2020). *ASI Experience with STPA*. Unpublished document, ASI Mining.

<sup>66</sup> Hassall, M. E., Sanderson, P. P., and Cameron, I. T. (2014). The development and testing of SAfER: a resilience-based human factors method. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 8, 162-186.

<sup>67</sup> Burgess-Limerick, R., Joy, J., Cooke, T. & Horberry, T. (2012). EDEEP - An innovative process for improving the safety of mining equipment. *Minerals*, 2, 272-282.

interacciones y potenciales compensaciones entre decisiones tomadas en diferentes ámbitos. Por ejemplo, decisiones relativas a la automatización y la complejidad de la interfaz puede influir en las características del personal y los requerimientos de capacitación, así como en el número previsto de personas necesarias para la operación y mantenimiento del sistema; mientras que los problemas destacados durante el análisis de seguridad bien pueden conducir a trabajos adicionales de ingeniería de factores humanos para reducir riesgos.

### Implementación de HSI

Las orientaciones proporcionadas para la industria ferroviaria<sup>68</sup> han sido adaptadas en la siguiente sección para la adquisición de nuevas tecnologías mineras. Aunque las etapas de la ingeniería de sistemas se presentan de forma secuencial, la realidad es que los ciclos iterativos ocurren tanto dentro de las etapas como entre ellas. Mientras que los resultados de las evaluaciones realizadas durante el diseño y el desarrollo ciertamente influirán en las subsecuentes iteraciones del diseño, también pueden retroalimentar cambios en los requerimientos, o incluso dar lugar a cambios en el concepto de operaciones.

#### Análisis

La etapa inicial del proceso de ingeniería de sistemas es el análisis. Actividades de análisis centradas en las personas llevadas a cabo como parte de la integración de humanos sistemas abordan lo siguiente:

- Concepto de operación: ¿Cuáles son los objetivos del sistema? y, en particular, ¿cuáles son los roles operacionales y de mantenimiento que desempeñarán las personas? ¿Quiénes serán estas personas? ¿Qué conocimientos y habilidades tendrán? ¿Qué diversidad se prevé? ¿Hay otras personas dentro o fuera del sistema que se debe considerar? •
- Contextos: ¿Cuál es el rango de contextos operativos y casos de uso? ¿Existen diferentes modos de operación? ¿Qué rango de condiciones de entorno son anticipadas?
- Tareas: ¿cómo se asignarán las funciones dentro del sistema? ¿Qué tareas físicas necesitarán realizar las personas? ¿Qué tareas de seguimiento o toma de decisiones deben realizarse? ¿Qué tareas actuales no se llevarán a cabo ni se modificarán? ¿Cuáles son las tareas críticas que realizan las personas? Se pueden emplear diversas técnicas de análisis de tareas dependiendo de la naturaleza de las tareas. Similarmente, Es probable que sean apropiados los análisis de la carga de trabajo y el conocimiento de la situación.
- Desafíos conocidos/lecciones aprendidas: ¿Existen preocupaciones conocidas sobre el desempeño humano basadas en experiencias con sistemas similares en la misma industria o en otras? ¿Qué se puede aprender de incidentes o cuasi accidentes anteriores?
- Seguridad y salud: ¿Qué peligros pueden estar presentes? ¿Cómo podrían ocurrir resultados adversos de seguridad o salud? ¿Qué errores podrían cometer las personas y cuáles serían las consecuencias? ¿Cómo se puede incrementar el potencial de detección de errores humanos y tecnológicos, y la recuperación de errores? ¿Qué controles críticos se requieren para prevenir o mitigar situaciones adversas para la seguridad o la salud?
- Compensaciones: ¿Existen compensaciones entre los dominios de integración de humanos sistemas que deban ser evaluadas? ¿Existen compensaciones entre los dominios de integración de humanos sistemas y otros elementos de ingeniería (por ejemplo, costo) que requieren revisión?

#### Requerimientos

- Los resultados de estos análisis conducen a requerimientos de integración de humanos sistemas que informan el diseño y desarrollo de sistemas posterior. Los requisitos potenciales incluyen:
- Información: ¿qué información deben recibir las personas en el sistema para mantener la conciencia de la situación? ¿Cómo se debe presentar la información para apoyar mejor la toma de decisiones?
- Control: ¿Qué controles y modos de interacción con el sistema se requieren?
- Comunicación: ¿Qué canales de comunicación se requieren dentro y fuera del sistema? ¿Qué métodos de comunicación se deben utilizar?
- Entorno físico: ¿qué diseños de estaciones de trabajo físicas se requieren, por ejemplo, diseño, iluminación, Visibilidad, accesibilidad?, ¿Cómo se abordará la diversidad humana?
- Selección y capacitación: ¿cómo se seleccionará a las personas del sistema? ¿Qué formación (inicial y en curso) será requerida? ¿Cómo se debe realizar la formación? ¿Cómo será evaluada y reevaluada la competencia?

<sup>68</sup> Melnik, G., Roth, E., Multer, J., Safar, H. e Isaacs, M. (2018). Un enfoque de adquisición para adoptar la integración de sistemas humanos en la Industria Ferroviaria. Departamento de Transporte de EE. UU. DOT/FRA/ORD-18/05.

## *Diseño*

Basado en la comprensión explícita de los usuarios, las tareas y los entornos, un diseño centrado en el ser humano y el proceso de desarrollo que involucra a los usuarios es llevado a cabo por un equipo multidisciplinario que incluye recursos humanos. experiencia en factores. El proceso es iterativo y probablemente implique el diseño y prueba de prototipos de aumentando fidelidad y probablemente implique una simulación humana en el circuito.

Los resultados del diseño y desarrollo incluirán:

- Entorno de trabajo — Diseño de entornos físicos para maximizar el rendimiento, así como la salud y seguridad. Los estándares de ingeniería humana pueden ser particularmente relevantes para el diseño físico.
- Software e interfaces — Diseño de la arquitectura general del software, así como de las interfaces a través de la cual los humanos reciben información y a través de la cual los humanos dan información para garantizar un desempeño eficiente y seguro en condiciones normales y anormales.
- Capacitación — Diseño del plan de estudios, métodos de capacitación y evaluaciones de competencias. Documentación — Desarrollo de procedimientos y manuales de capacitación legibles, comprensibles y utilizables y documentación de operaciones y mantenimiento que refleje el “trabajo como es hecho” en lugar de “trabajar como se imagina”.

## *Pruebas y evaluación*

La evaluación centrada en el usuario ocurre durante todo el proceso de ingeniería de sistemas, así como en la validación final del sistema. Las actividades de prueba y evaluación incluyen:

- Planificación— los aspectos de integración de humanos sistemas deben incorporarse al Programa de evaluación y pruebas de ingeniería de todo el sistema.
- Evaluación de prototipos — participan en la evaluación de prototipos usuarios que representan la diversidad de la fuerza laboral prevista para incrementar la fidelidad. Simulaciones físicas y virtuales pueden ser útiles, humanos en el ciclo y mucho más.
- Resolución de discrepancias de ingeniería humana — aspectos del diseño que no cumplen con los requisitos durante las evaluaciones iterativas se identifican y rastrean sistemáticamente. Las acciones correctivas son propuestas e implementadas.
- Validación final — Cada requerimiento requiere evaluación en la validación final del sistema. Evaluación de escenarios incluyen los contextos y casos de uso identificados durante la etapa de análisis. Los datos recopilados incluyen medidas de proceso (p. ej., carga de trabajo y conciencia de la situación) y medidas de resultado, así como valoraciones de los usuarios.

## *Plan del programa de integración de humanos sistemas*

Durante la preparación de propuestas para implementar cualquier nueva tecnología en las mineras, y particularmente si componentes automatizados están involucrados, se debe requerir a los proveedores que presenten un programa de integración humano sistema que detalle el trabajo de integración humanos sistemas que se realizará en colaboración con el comprador; cómo se hará; y por quién.

Un plan de integración humanos sistemas debe incluir:

- Descripción general — una descripción general del sistema propuesto; el concepto preliminar de operaciones, roles asociados y entorno operativo; experiencias con sistemas anteriores.
- Capacidades organizacionales— descripciones resumidas de puestos y calificaciones de personal clave profesionales de integración humanos sistemas dentro del proveedor.
- Riesgos del programa — una discusión sobre cómo se identificarán y evaluarán los riesgos de la integración humanos sistemas.
- Actividades de integración humanos sistemas — las actividades específicas de integración de humanos sistemas que serán realizados por el vendedor en colaboración con el comprador para abordar cada uno de los dominios de Integración de humanos sistemas durante el análisis, diseño y evaluación del sistema.
- Programación de integración de humanos sistemas: un cuadro de hitos que identifica cada actividad de la integración de humano sistema, incluidos los hitos y su relación con el programa.

## Conclusiones

Si bien la introducción de equipos mineros automatizados tiene un gran potencial para reducir los riesgos de seguridad y salud, introducen nuevos tipos de falla. Todos los nuevos tipos de falla tienen aspectos humanos. Las normas actuales y los materiales de orientación prestan insuficiente atención a la integración de los seres humanos y tecnología durante la implementación de la automatización en la minería.

Los procesos de integración de humanos sistemas adaptados de otras industrias deben implementarse durante adquisición de equipos de minería automatizados y se debe exigir a los proveedores de tecnología que proporcionen un plan de integración de humanos-sistemas.

Aspectos de particular importancia incluyen el diseño de interfaces para mantener el conocimiento de la situación, la reducción de la carga de trabajo de los operadores de la sala de control y la formación de las personas que asumirán nuevos roles. No se debe subestimar el alcance de la capacitación requerida para todos aquellos afectados por la tecnología, y probablemente aumentará en comparación con los roles anteriores. La evaluación de la formación continua y competencias será necesaria a medida que se modifiquen los sistemas. Garantizar que un número suficiente de personas capacitadas de la sala de control esté disponible para la industria es fundamental tanto para la productividad como para la seguridad y la salud.

### Contacto:

Robin Burgess-Limerick PhD CPE FHFESA

Investigador catedrático

+61 401 714 511

E. [r.burgesslimerick@uq.edu.au](mailto:r.burgesslimerick@uq.edu.au)