



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS
PARA LA OPTIMIZACIÓN DE DATOS
DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE
SEGURIDAD EN EL TRABAJO PARA
UNA EMPRESA DE MANTENIMIENTO
PREDICTIVO DEL SECTOR MINERO

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA
OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN
PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES

RUBEN DIEGO ARMANDO ELIAS DIAZ

LIMA – PERÚ

2025

ASESOR

MG. JONH MAXIMILIANO ASTETE CORNEJO

JURADO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

MG. ISELLE SABASTIZAGAL VELA

PRESIDENTE

MG. JESÚS ARTURO SANTIANI ACOSTA

VOCAL

MG. RAUL ASTETE CORNEJO

SECRETARIO (A)

DEDICATORIA.

A mis padres que me enseñaron la perseverancia.

A mi esposa, por su constante apoyo.

AGRADECIMIENTOS.

A mis amigos por su apoyo

FUENTES DE FINANCIAMIENTO.

Trabajo de investigación Autofinanciado

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Los egresados:

| N° | APELLIDOS Y NOMBRES |
|----|--------------------------------|
| 1. | ELIAS DIAZ RUBEN DIEGO ARMANDO |

Pertencientes al programa de la **MAESTRÍA EN PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES**, autores del trabajo titulado: **HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE DATOS DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE SEGURIDAD EN EL TRABAJO PARA UNA EMPRESA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO DEL SECTOR MINERO**, el cual ha sido elaborado, sustentado y aprobado, según corresponda, para optar por el grado de **MAESTRO EN PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES** bajo la modalidad de **TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**.

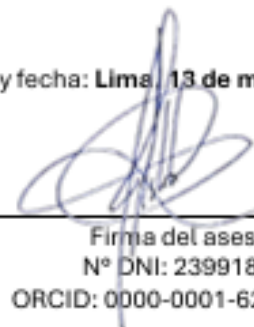
En calidad de docentes asesores de la Universidad Peruana Cayetano Heredia:

| N° | APELLIDOS Y NOMBRES DEL DOCENTE | FACULTAD | NIVEL DE ASESORÍA |
|----|---------------------------------|----------|-------------------|
| 1. | ASTETE CORNEJO JONH MAXIMILIANO | FAMED | ASESOR |

Declaramos que el contenido del presente documento es original y que las citas y referencias a otros autores cumplen con las normas académicas establecidas. En ese sentido, hacemos constar que:

- El documento presenta un porcentaje de similitud de **14%**, según el reporte emitido por el software **Turnitin®** (identificador de entrega: **2902304605**; fecha de entrega: **13-03-2026**).
- Tras una revisión detallada del reporte y del contenido del trabajo en cuestión, no se han identificado indicios de plagio.
- Se certifica que el documento respeta los principios de integridad académica y cumple con los requisitos institucionales de originalidad.

Lugar y fecha: **Lima, 13 de marzo de 2026**



Firma del asesor
N° DNI: 23991826
ORCID: 0000-0001-6225-6720

Firma del Co-asesor
N° DNI:
ORCID:

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN. | 1 |
| I. CAPITULO I: Herramientas tecnológicas disponibles para la optimización de datos del sistema de gestión de seguridad en el trabajo. | 6 |
| II. CAPITULO II: Datos del sistema de gestión de seguridad en el trabajo que pueden ser optimizados con herramientas tecnológicas..... | 31 |
| III. CAPITULO III: Herramientas digitales que aplican para la optimización de datos de un sistema de gestión de seguridad. | 54 |
| IV. CONCLUSIONES | 79 |
| V. RECOMENDACIONES | 81 |
| VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 82 |

RESUMEN

En nuestro país, los supervisores de seguridad, salud ocupacional y medio ambiente (SSOMA) en el rubro minero enfrentan el reto de equilibrar su tiempo entre la supervisión en campo y la gestión documentaria (1-3). Esta labor se vuelve aún más complicada cuando ocurre un evento que requiere una investigación exhaustiva, lo que conlleva a invertir todo su tiempo disponible. Como consecuencia, los sistemas de gestión de seguridad en muchas ocasiones no se actualizan a diario, debido a la falta de tiempo o la alta carga operativa asociada al uso de herramientas convencionales dificulta su actualización en tiempo real (4).

Ante esta problemática, surge la propuesta de emplear herramientas tecnológicas para optimizar el sistema de gestión de seguridad en el trabajo (5). La idea es identificar que componentes del sistema de gestión de seguridad en el trabajo pueden beneficiarse de estas innovaciones tecnológicas para mejorar su cumplimiento en tiempo real (6,7). De esta manera, se busca mantener la información actualizada en todo momento, garantizando así que todas las actividades de prevención se ejecuten a tiempo y con eficacia, con el objetivo principal de prevenir accidentes dentro de la empresa (8,9).

El uso de herramientas tecnológicas brinda una serie de beneficios visibles, como la mejora en la eficiencia de la gestión documentaria mediante sistemas digitales que simplifican y agilizan los procesos de registro, seguimiento y actualización de datos (10,11). Además, estas herramientas permiten la automatización de procesos, lo que facilita la generación de informes y el análisis de datos, lo que a su vez favorece a una toma de decisiones más informada y acertada (12,13).

PALABRAS CLAVE

Herramientas tecnológicas, optimización de datos, eficiencia, Seguridad y Salud en el trabajo, minería.

ABSTRACT

In our country, safety, occupational health and environment supervisors (SSOMA) in the mining sector face the challenge of balancing their time between field supervision and document management (1-3). This task becomes even more complicated when an event occurs that requires exhaustive investigation, which requires investing all your available time. As a consequence, security management systems are often not updated daily, due to lack of time or the labor involved in using physical or traditional tools (4).

Given this problem, the proposal arises to use technological tools to optimize the workplace safety management system (5). The idea is to identify which components of the workplace safety management system can benefit from these technological innovations to improve compliance in real time (6,7). In this way, the aim is to keep information updated at all times, thus guaranteeing that all prevention activities are carried out on time and effectively, with the main objective of preventing accidents within the company (8,9).

The use of technological tools provides a series of visible benefits, such as improving the efficiency of document management through digital systems that simplify and speed up the processes of recording, monitoring and updating data (10,11). In addition, these tools allow the automation of processes, which facilitates the generation of reports and data analysis, which in turn favors more informed and accurate decision-making (12,13).

KEYWORDS

TECHNOLOGICAL TOOLS, DATA OPTIMIZATION, EFFICIENCY, SAFETY

AND HEALTH AT WORK, MINING.

INTRODUCCIÓN.

La industria minera enfrenta numerosos desafíos asociados con la gestión de la seguridad en el trabajo, debido a las complejidades de sus operaciones y los altos riesgos inherentes a sus actividades (14,15). Los sistemas de gestión de seguridad en el trabajo (SGST) son fundamentales para mitigar estos riesgos y garantizar un entorno laboral seguro (16). Sin embargo, las empresas que operan en este sector, en especial aquellas dedicadas al mantenimiento predictivo, han reportado dificultades significativas en la actualización y manejo de los datos relacionados con la seguridad laboral (17).

Uno de los aspectos que más críticos hemos detectado en la gestión de la seguridad en la minería es el exceso de carga de trabajo a la que se enfrentan los supervisores de seguridad, salud ocupacional y medio ambiente, (SSOMA) (18). Se ha concluido en distintos estudios que la necesidad de equilibrar las actividades de la supervisión en campo con las actividades administrativas como la gestión de documentación que, en cierta medida, menoscaban la eficacia del SGST (19). Las situaciones imprevistas que implican la aparición precisa de la investigación detallada para dar explicaciones retrasan la actualización de los sistemas y dificultan la puesta en marcha de las medidas preventivas (20).

El empleo de herramientas tradicionales o bien herramientas físicas para la gestión de información en seguridad es un aspecto que agrava este problema (21). Tienen la característica de ser lentas, pesadas y propensas a errores humanos, que limita la posibilidad de obtención de la respuesta en tiempo real

(22). La digitalización de los procesos administrativos puede ser una solución (23). Permiten hacer un mejor manejo de la información al permitir su registro, monitoreo y análisis en un tiempo actual (24).

Investigaciones recientes han acentuado los beneficios de la digitalización para la gestión de la seguridad en el trabajo. Por ejemplo, Martínez y Ruiz en el 2020 indican que las plataformas digitales no sólo permiten la automatización de las tareas repetitivas sino que, además, aumentan la exactitud de la interpretación de los datos, haciendo posible una toma de decisiones más ilustrada (25). Estas soluciones son, además, especialmente pertinentes para la industria minera, donde las exigencias en materia legal de seguridad y salud y la prevención de riesgos se sostienen sobre la base de información precisa y actualizada (26).

Por su parte, en el caso del mantenimiento predictivo de la minería, el uso de herramientas digitales puede ser incluso más favorable. Estas empresas manejan datos masivos sobre informes de inspecciones, sobre el estado de los equipos o sobre las medidas de prevención a seguir, por lo que son necesarias soluciones ágiles y eficaces en la gestión de estos datos. La no adopción de la tecnología adecuada en este contexto no sólo puede ser una barrera operativa, sino que puede incluso aumentar los riesgos laborales e ir en detrimento de la productividad (27).

Por esta razón, hay que determinar las herramientas tecnológicas adecuadas para la optimización de datos del sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo en empresas de mantenimiento predictivo del sector minero. Investigación que pretende abordar un problema tanto en lo práctico como en

lo teórico y, paralelamente, construir soluciones para mejorar no solo la seguridad sino también la eficiencia de las empresas.

Justificación del estudio

La investigación cuenta con una cierta relevancia teórica, en la medida que brinda desarrollo de conocimiento en cuanto a la aplicación de herramientas tecnológicas en los sistemas de gestión de seguridad en el trabajo, área que, en los últimos años, ha tenido un notable incremento gracias a la digitalización de los procesos. Este estudio se orienta a partir de los principios de la gestión de la seguridad y salud ocupacional, tomando elementos teóricos relacionados con la optimización, con la automatización y con el manejo de datos en tiempo real. Además, permitirá enriquecer el marco conceptual asociado a la integración de tecnología en contextos fuertemente regulados como el minero, generando un modelo que pueda llegar a ser replicable en otros contextos similares.

Desde la perspectiva práctica el estudio responde a las necesidades del sector minero, en cuanto en el área de mantenimiento predictivo, que necesita mejorar la eficiencia en la gestión de la seguridad en el trabajo. De forma general, la implementación de herramientas digitales permitirá una disminución del trabajo administrativo, así los supervisores dedicarse a actividades críticas de supervisión y prevención de riesgos en el campo. Este tipo de planteamiento permite optimizar los procesos, mejorar la precisión y la rapidez de la información y facilitar así la toma de decisiones en base a información veraz y actualizada.

Desde un punto de vista social, la propuesta tendrá un impacto directo en la disminución de accidentes laborales y el aumento de la seguridad de los trabajadores en uno de los sectores de actividad que presenta mayores índices de riesgo, como el minero. La mejora de los sistemas de gestión de la seguridad en el trabajo a través de la aplicación de las herramientas tecnológicas asegurará que las medidas preventivas se lleven a cabo con la rapidez y la eficiencia necesarias, contribuyendo así a la mejora del bienestar de los trabajadores y sus familias. Asegurar un entorno de trabajo más seguro permitirá promover una cultura de la seguridad en la empresa y en el sector, lo que tendrá un impacto positivo en la calidad de vida de los trabajadores y en su percepción acerca de la responsabilidad social corporativa de la organización.

Pregunta de investigación

¿Qué herramientas digitales se aplican para la optimización de datos de un sistema de gestión de seguridad en el trabajo para una empresa de mantenimiento predictivo del sector minero?

Objetivos

Objetivo General:

- Identificar las herramientas digitales que aplican para la optimización de datos de un sistema de gestión de seguridad en el trabajo para una empresa de mantenimiento predictivo del sector minero.

Objetivos Específicos:

- Describir las características de las herramientas tecnológicas disponibles para la optimización de datos del sistema de gestión de seguridad en el trabajo.
- Identificar los datos del sistema de gestión de seguridad en el trabajo que pueden ser optimizados con herramientas tecnológicas.

I. CAPITULO I: Herramientas tecnológicas disponibles para la optimización de datos del sistema de gestión de seguridad en el trabajo.

La optimización de los sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo (SGSST) utilizando herramientas tecnológicas ha surgido como una pieza fundamental en la prevención de Riesgos Laborales y en la mejora de las condiciones de seguridad en distintos sectores. Las innovaciones presentadas, como el Internet de las Cosas (IoT), el cloud computing, los sistemas de monitoreo en tiempo real y el análisis de datos, han permitido a las organizaciones reducir la siniestralidad, mejorar su productividad y generar un entorno laboral más seguro. Dicha transformación digital no solo garantiza una respuesta más ágil ante emergencias, sino que también optimiza la gestión de riesgos, generando beneficios tanto para los trabajadores, como para la productividad y el cumplimiento normativo (28).

1.1. Introducción a la seguridad laboral

La seguridad en el lugar de trabajo es una condición muy importante para conseguir el bienestar de los trabajadores y la viabilidad de las empresas. La gestión de la seguridad ha sido, hasta ahora, un proceso que se realizaba de forma manual y con auditorías periódicas, pero los avances tecnológicos han revolucionado la seguridad en las empresas desde la elaboración de un control sistematizado de la información y decisiones a través de un control incesante. El acceso a herramientas digitales ayuda a poder llevar a cabo una gestión más eficaz de los riesgos, lo que, a su vez, produce un descenso de los accidentes. Como indica Másmela Olivar et al. (2021), la digitalización de la empresa ha

aportado un empuje en los sistemas de gestión de la seguridad puesto que los métodos informáticos permiten un mejor seguimiento y control (28).

1.2. El Internet de las Cosas (IoT) y su Influencia en la Seguridad Laboral

El Internet de las Cosas (IoT) ha modificado el ámbito de seguridad en el trabajo, introduciendo una perspectiva más activa y más eficaz. Cuando los diferentes dispositivos que permiten el control de las variables como la temperatura, la presencia de gases volcánicos, los niveles de vibración, otros factores ambientales, etc. se conectan entre ellos, se puede llevar a cabo un análisis continuo del entorno de trabajo. Igualmente, estos dispositivos permiten no sólo la supervisión de las condiciones del entorno, sino también la evaluación de la salud de los trabajadores mediante la utilización de sensores que permiten controlar parámetros de evaluación de la salud de los trabajadores como la fatiga y la frecuencia cardíaca a través de la evaluación continua. Tal enfoque preventivo permite implementar medidas conductuales que eviten incidentes graves. (29) ilustra el uso del IoT en el entorno de la construcción y las medidas adoptadas con respecto a la prevención de caídas en altura, cuyo riesgo es habitual en ese sector. De hecho, el uso de sensores en el interior de cascos o chalecos permite incluso la supervisión en tiempo real de los trabajadores el envío de alertas a supervisores o a los mismos trabajadores en caso de situaciones de riesgo entre el personal detectadas.

El efecto favorable del Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) en la seguridad en la operación laboral va más allá de anticipar la presencia de unas condiciones peligrosas de trabajo. De igual importancia es el hecho de que,

además, permite localizar a los trabajadores en el caso de una emergencia concreta. Los dispositivos conectados emiten información a sistemas de gestión centralizada que permiten actuar de forma veloz y eficaz en el caso de un incidente, lo cual es crucial en situaciones de alto riesgo.

1.2.1. Monitoreo en Tiempo Real de las Condiciones Ambientales

Una realidad en el entorno laboral que incluso se considera una de las innovaciones más relevantes que ha llegado como consecuencia del Internet de las Cosas (IoT), sería la facilidad de realizar monitoreos de las condiciones ambientales en tiempo real. Los sensores que miden diferentes variables, como temperatura, humedad, niveles de gases tóxicos, ruido o vibración, posibilitan la detección de ambientes laborales adversos antes de que se conviertan en situaciones de riesgo elevado. Esta medida permite una acción rápida que va orientada a la prevención de accidentes laborales graves pero también a la mitigación de enfermedades vinculadas con la condición de trabajo llevada a cabo en condiciones de riesgo inadecuadas. Un claro ejemplo se puede observar en sectores productivos de riesgo, como minería o manufactura, en donde se implementan dispositivos IoT para reconocer ambientes de alta toxicidad y generar alarmas antes de que los niveles sean peligrosos para la salud de los trabajadores (29).

En este sentido, no sólo el Internet de las cosas (IoT) controla ciertas características físicas del medio, sino que también actúa en consecuencia en el bienestar global de los empleados, determinando que trabajen en un medio saludable y seguro. Un ejemplo claro de esta línea de actuación es la

automatización de la medición de la calidad del aire, tal que los sensores del IoT son capaces de transmitir rápidamente los niveles de contaminantes, es decir, el monóxido de carbono, el dióxido de nitrógeno, lo cual permite actuar rápidamente, evitando que los trabajadores queden expuestos durante tiempo a situaciones de calidad del aire inadecuadas (29).

1.2.2. Evaluación de la Salud de los Trabajadores mediante Sensores

Aparte de la vigilancia del medio ambiente, el IoT también ha dado lugar a grandes avances en el seguimiento de la salud laboral mediante medios tecnológicos portables: pulseras o chaquetas tecnológicas, que están equipadas con elementos de retroalimentación in vivo incorporados en el propio cuerpo de los trabajadores, que son capaces de medir la frecuencia cardíaca, la temperatura del cuerpo, el nivel de oxígeno en sangre o el grado de fatiga. Dichos dispositivos permiten determinar los primeros signos de problemas de salud, un alto grado de fatiga, el estrés térmico o la fatiga muscular, permitiendo la intervención antes de que se produzca un incidente o una enfermedad (30).

Por ejemplo, en industrias como la construcción, donde los trabajadores realizan actividades físicamente demandantes en condiciones extremas de temperatura, los dispositivos IoT pueden ser empleados para monitorear signos de agotamiento o el riesgo de sufrir golpes de calor. Al detectar estos peligros, el sistema puede emitir alertas que permitan a los supervisores intervenir a tiempo y proporcionar el descanso necesario a los empleados, evitando así situaciones más graves. Adicionalmente, algunos de estos dispositivos están

diseñados para enviar notificaciones automáticas a los trabajadores, instándolos a tomar medidas preventivas como hidratarse adecuadamente en entornos calurosos o realizar descansos periódicos.

1.2.3. Prevención de Accidentes mediante Sensores de Movimiento y Localización

Los trabajadores en áreas industriales como la construcción, la minería y la manufactura se encuentran expuestos a diferentes riesgos como la cercanía a la maquinaria, el movimiento de los equipos de trabajo y caídas desde la altura. Por su parte, los sensores de localización, que se integran fundamentalmente en cascos, chalecos y wearables, permiten establecer un seguimiento en tiempo real de la posición ocupacional en el interior de cualquier instalación. Este dispositivo permite, no solo la posibilidad de conocer si existe, de manera previa, una situación potencialmente peligrosa sino también el envío de alertas en el momento en que un trabajador se dirige a una zona de riesgo o se aproxima a algún equipo en funcionamiento (30).

Un claro ejemplo del uso de sensores IoT se puede ver en el sector de la construcción, donde las caídas desde la altura son las principales causas de accidentes laborales. La incorporación de los sensores en cascos y chalecos permite, aun en un escenario donde se produzca un deslizamiento o caída, la capacidad de notificar inmediatamente a los supervisores, lo que ofrece la ventaja de atender más rápidamente a los trabajadores, sea para rescatarlos o para implementar medidas preventivas adecuadas, dado que estos sistemas de

localización también contribuyen a optimizar los tiempos de respuesta en una emergencia, ya que permiten establecer con gran precisión la localización exacta de los trabajadores para facilitar el acceso a los equipos de rescate en momentos críticos.

1.2.4. Respuesta Ante Emergencias: Coordinación y Toma de Decisiones en Tiempo Real

La integración de tecnologías del IoT (Internet de las Cosas) ha hecho que la capacidad de respuesta frente a las emergencias que puedan aparecer en los distintos ambientes laborales haya sufrido una mejora notable. Efectivamente, la unión de los distintos dispositivos permite que los sistemas de gestión puedan recibir información en tiempo real sobre las condiciones del ambiente laboral y la ubicación de los trabajadores, favoreciendo así poder coordinarse adecuadamente en situaciones críticas. Para ilustrarlo, cabe poner el ejemplo de un incendio o de una fuga de gas, donde los dispositivos IoT pueden disparar alarmas, cerrar puertas, activar sistemas de ventilación o, incluso, activar protocolos de extinción (sin intervención humana alguna), etc. Esta automatización aporta una respuesta más rápida ante la emergencia además de disminuir el potencial de daños a los trabajadores/as y las instalaciones disponibles (29).

Además, los dispositivos IoT son una opción adicional que se puede usar para mejorar la gestión de evacuaciones en situaciones de emergencia o de peligro inminente. Mire a los empleados en el momento dado que se pueden proponer

"rutas de evacuación" personalizadas, así como guiar a los trabajadores hacia las zonas de seguridad a partir de factores externos en evolución como la evolución del fuego o el contacto con productos químicos o materiales peligrosos. Los sistemas de este tipo no sólo protegen a los trabajadores sino que también son una opción más eficiente para hacer operaciones de rescate a causa de la capacidad de proporcionar información exacta y actualizada a los equipos de rescate respecto a la situación de los trabajadores y de las zonas de trabajo afectadas (29).

1.2.5. Impacto del IoT en la Capacitación y Conciencia de los Empleados

Una de las esferas en las cuales el IoT hace notar su influencia es en la formación y capacitación de los empleados en lo que se refiere a las nociones de seguridad en la empresa. Así, si bien los dispositivos inteligentes pueden ser empleados para monitorizar el nivel de seguridad, también pueden dar lugar a la formación y la retroalimentación en el momento. Empleando dispositivos portátiles, los empleados pueden recibir instrucciones, avisos o recomendaciones relacionadas con su seguridad cuando están en la ejecución de sus tareas diarias. A la vez, los sensores pueden recabar información sobre las acciones de los empleados, lo cual puede ser utilizado para hacer que la formación sea más personalizada, adecuada y efectiva para las necesidades de cada uno de entre ellos (29).

Por ejemplo, alertando a los operarios en el interior de una planta industrial al alcance de los procesos de seguridad a seguir a la hora de manipular máquinas, advirtiéndoles de la correcta utilización del equipo de protección personal (EPP)

y recordando a los operarios que tienen que hacer pausas activas o ejercicios de estiramiento. Esta interacción con la tecnología en tiempo real puede contribuir a garantizar que las normativas de seguridad se cumplan y puede contribuir a establecer también una cultura de la seguridad continua en el interior de la propia empresa.

1.2.6. Desafíos y Consideraciones en la Implementación del IoT para la Seguridad Laboral

Si bien los beneficios derivados de la implementación del IoT respecto a la seguridad laboral son imposibles de discutir, también es cierto que diversos desafíos deben considerarse en el proceso de implementación. De hecho, el hecho de implementar dispositivos IoT en el entorno laboral puede suponer costes elevados, especialmente en el caso de aquellas actividades donde los equipos y las operaciones son altamente sofisticadas. De hecho, para llegar a implantar con éxito esta tecnología hay que contar con una perspectiva holística que contemple no sólo el hecho de comprar dispositivos, sino también de formar correctamente a los operarios y adaptar las formas de trabajo a los nuevos sistemas tecnológicos (30).

1.3. Monitoreo en Tiempo Real y Sistemas de Alerta Temprana

El control en tiempo real es una de las herramientas más eficaces a la hora de optimizar la seguridad laboral. En este sentido, los sensores ubicados en las máquinas y en las zonas de trabajo pueden contribuir a verificar variables indispensables de control, tales como el detectado de sustancias tóxicas, la temperatura, la humedad y otras variables que podrían poner en riesgo de salud

a los trabajadores. En este sentido, estos dispositivos son capaces de generar información que se procesa de forma casi inmediata mediante sistemas de gestión que a su vez activan alertas tempranas que pueden contribuir a tomar decisiones proactivas en la protección de los trabajadores (30).

Wan y Muhammad exponen una experiencia de tipo práctico, basada en minas subterráneas, en la que se implementó un sistema para llevar a cabo la monitorización que permite la detención de la acumulación de gases nocivos y la monitorización de la estabilidad estructural de las galerías. Las alarmas generadas por este tipo de sistemas permiten la evacuación de los trabajadores y la rápida intervención de los grupos de emergencia mejorando de este modo la seguridad en unos entornos tan peligrosos (30).

Los sistemas de monitorización no solo permiten tener agilidad en las respuestas, sino que permiten un enfoque preventivo mediante el análisis de patrones de riesgo. Dichos patrones extraídos de los datos históricos pueden ser utilizados para optimizar el proceso de seguridad permitiendo por ejemplo, identificar los lugares críticos.

1.4. Analítica avanzada y toma de decisiones informadas

La integración de los mecanismos de analítica avanzada, como el análisis predictivo, evidentemente está cambiando el concepto de gestión de los riesgos laborales. Este tipo de mecanismos permiten analizar volúmenes masivos de datos generados por dispositivos y herramientas del Internet de las Cosas (IoT), sensores y sistemas de control y monitorización en tiempo real con la intención de identificar tendencias y de descubrir patrones que revelen la probabilidad de

que un accidente ocurra. A ese respecto, Barker explica como la incorporación de la analítica avanzada en los sistemas correspondientes a la seguridad laboral logra la predicción y prevención de los incidentes antes de que se materialicen, y esto crea impactos en la secuencia de la cual las organizaciones manejan sus respectivos procesos de seguridad (31).

Además, el análisis predictivo puede servir para la planificación de los recursos y de las tareas a realizar por parte del personal en zonas que se consideran de alto riesgo. Si tomamos como ejemplo que un sistema de monitorización de la actividad de una máquina revela que está trabajando a temperaturas más altas de las que serían normales puede prever que existe en este caso la probabilidad de que una sección de la máquina puede fallar mecánicamente realizando la prevención de ese fallo, con lo cual la organización de la empresa puede, con suficiente antelación, llevar a cabo una serie de intervenciones con la intención de mitigar el riesgo de accidentes e incrementar de este modo la seguridad de sus empleados.

1.5. Integración de herramientas digitales para mejorar la comunicación

La comunicación instantánea entre el personal y la gerencia es un aspecto básico que se puede optimizar mediante la utilización de herramientas tecnológicas. Plataformas en la nube, aplicaciones móviles y sistemas de mensajería instantánea son herramientas básicas para la difusión de información básica sobre la seguridad laboral. Estos sistemas permiten la transmisión de alarmas sobre la existencia de determinadas condiciones de riesgo, por ejemplo, sustancias peligrosas o la evacuación de determinadas zonas.

Ballester y Torregrosa hacen referencia a la implementación de herramientas en la nube centradas en mejorar la coordinación de las actividades laborales y la gestión de los elementos de seguridad, dichas herramientas están preparadas para organizar la globalidad de las acciones en el ámbito de la seguridad desde el entorno de la empresa y llevar a cabo informes automáticamente, aliviando la gestión de las medidas preventivas (32).

El uso de estas herramientas permite una comunicación mejor de los niveles de la organización, alcanzando a hacer que los empleados sean responsables de los aspectos de la seguridad y que la gerencia tenga información sobre cualquier incidente o riesgo.

1.6. Capacitación mediante simuladores y realidad aumentada

Las tecnologías de simulación y realidad aumentada (AR) ofrecen un enfoque innovador para la formación de los trabajadores de aspectos vinculados con la seguridad. Estas herramientas permiten a los trabajadores experimentar situaciones de emergencia en entornos controlados, sin tomar ningún riesgo real. Según lo que indica Castillo, la capacitación apoyada en simuladores capacita a los trabajadores para responder de forma correcta ante emergencias, tales como incendios, caídas o exposición a sustancias tóxicas (33).

Por otra parte, la realidad aumentada puede instalarse para proporcionar información de forma instantánea sobre el estado real del entorno laboral. Dispositivos como las gafas inteligentes permiten a los trabajadores ver lugares de riesgo, instrumentos de protección y avisos de condiciones peligrosas, lo que

permite aumentar la conciencia situacional y la capacidad de tomar decisiones adecuadas (33).

1.7. Desafíos y Barreras en la Implementación de Tecnologías

A pesar de los significativos beneficios que las herramientas tecnológicas proporcionan, su utilización conlleva una serie de desafíos significativos. Uno de los obstáculos más destacados es el desacuerdo que puede surgir en las personas que no desean cambiar para ajustar sus respectivos modos de trabajar, así como los elevados costes para poner en marcha una tecnología, que pueden desincentivar a muchas organizaciones. La naturaleza complicada de la integración de nuevas tecnologías con los sistemas que ya están en funcionamiento, especialmente por la interoperabilidad (34).

También, hay que tener en cuenta que la seguridad de los datos es un impedimento importante. Los sistemas que contienen grandes volúmenes de información pueden ser vulnerables a ataques informáticos, lo que nos hace ver la necesidad de establecer medidas de seguridad eficaces y efectivas para proteger la información sensible. Al igual que explica Guavita, la garantía de protección de los datos, tanto personales como laborales, ha de ser uno de los aspectos más relevantes de cara a la puesta en marcha de tecnologías de los sistemas de gestión de la seguridad (34).

1.8. Sistemas de Gestión de Seguridad en el Trabajo (SGST)

Son creaciones con la finalidad de controlar los riesgos que existen en el puesto de trabajo, lograr disminuir los accidentes, y garantizar que los trabajadores tengan un espacio de trabajo seguro y saludable; en otras palabras, este sistema

no persigue únicamente evitar accidentes, sino que también muestra la intención de establecer un lugar que respete y persiga la seguridad y salud de todos los trabajadores. El sistema es necesario para cumplir con la legislación correspondiente, tanto nacional como internacional (35).

La norma internacional ISO 45001:2018 es la norma internacional más utilizada en el mundo para la creación, implementación, mantenimiento y mejora de un SGST. En esta norma, los sistemas se fundamentan en la gestión continua de riesgos, es decir, en la identificación, evaluación y tratamiento de peligros para evitar accidentes y enfermedades laborales, por lo que se definen objetivos específicos para el SGST; entre ellos se encuentran la mejora continua de las condiciones de trabajo, la reducción de costes por accidentes, y el cumplimiento de la legislación gubernamental (35).

El modelo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PDCA) es clave para el buen desarrollo de un SGST. Este ciclo brinda la necesaria flexibilidad para manejar las estrategias de seguridad sobre la base de los resultados obtenidos. Una de las prácticas más interesantes para optimizar este ciclo se centran en la utilización de tecnologías que favorecen una gestión más eficiente de la información relacionada con la seguridad (36).

1.9. La Relevancia de la Tecnología en los Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SGST)

La automatización y digitalización de los procesos integrados en un SGST favorece cualquier ejercicio de recolección de datos con una frecuencia, precisión y fiabilidad óptimas; tal innovación permite a las organizaciones mantener un registro completo y actualizado de los riesgos detectados, de los

incidentes girados y de las medidas preventivas desarrolladas; a su vez, la tecnología facilita la gestión de los equipos de protección garantizando la existencia de los mismos y, su adecuada utilización, pero mejora igualmente la trazabilidad que puede lograrse tras determinados acontecimientos de riesgo o accidentes cruzando la información obtenida por Kullberg en 1992 (37).

1.10. La Administración de Datos en los SGST

La gestión de datos en los SGST ha pasado a ser un aspecto clave, ya que la información que se recoge sobre incidentes, sobre condiciones laborales y sobre investigaciones es clave para tomar decisiones adecuadas. Una buena gestión de estos datos es también fundamental para las auditorías, tanto internas como externas, y es necesaria para elaborar informes que sean conformes a las leyes del gobierno (38). En los sistemas tradicionales la gestión de los datos era manual, con un uso de documentos en papel, de registros escritos y con hojas de cálculo. Sin embargo, la digitalización ha hecho posible que la gestión de estos datos sea mucho más efectiva, con el uso de sistemas informáticos que gestionan, analizan, interrogando y distribuyendo la información adecuada. Herramientas como los software de gestión de la seguridad permiten a las empresas llevar el control de los registros de incidentes y programar inspecciones periódicas, aportando una visión general y actualizada del estado de la seguridad laboral (39).

1.10.1. Beneficios de los Sistemas Automatizados en la Gestión de Datos

La automatización de procesos es una de las principales características que en especial posibilita la tecnología, tal como es su uso para la elaboración de informes, los sistemas de monitorización de las medidas correctivas, etc.

Igualmente, los mismos sistemas favorecen la analítica avanzada que, una vez combinada con datos históricos, produce información que ayuda a la determinación de patrones de riesgo y, por lo tanto, favorece la mejora continua de la seguridad de los trabajadores (40).

1.11. Herramientas Tecnológicas para la Gestión de la Seguridad Laboral

1.11.1. Software de Gestión de Seguridad

El uso de este tipo de mecanismo ha encontrado un aumento notable ya que permitiría centralizar toda la información asociada a la seguridad del trabajo en un solo lugar. Este tipo de sistemas permite documentar y hacer seguimiento a la evolución de incidentes, accidentes de trabajo y al cumplimiento de normas de seguridad, de forma que pueda ser instantáneamente accesible para todos los actores involucrados (gerentes, técnicos de seguridad, trabajadores, etc.). Algunos ejemplos de este tipo de software son Intalex System, SAP EHS, que incluyen herramientas para gestionar incidentes, analítica de riesgos, auditorías y cumplimiento normativo (40). La asistencia a este tipo de trucos hace que las tareas de seguridad laboral se vean liberadas de carga administrativa, optimizando recursos y reduciendo la probabilidad de errores humanos. Además, optimiza la integración de datos en tiempo real, la que optimiza la capacidad de respuesta ante cualquier incidente o situación peligrosa que pudiera presentarse en el contexto del trabajo (40).

1.11.2. Internet de las Cosas (IoT) en Seguridad Laboral

La aplicación de la tecnología IoT (Internet de las Cosas) en el ámbito de la seguridad laboral ha permitido la implementación de sensores inteligentes en los equipos de protección y en el espacio laboral, los cuales permiten controlar diferentes parámetros de calidad como son la calidad del aire, el nivel de ruido, la temperatura y la presencia de sustancias tóxicas. A través del uso de los sensores IoT se pueden generar alertas en tiempo real en el caso de que se detecten situaciones en condiciones peligrosas, lo que permite responder en un momento previo a que se genere una situación de incidente y así podamos evitar accidentes severos. Por otro lado, estos dispositivos permiten establecer un seguimiento de las condiciones de salud y seguridad de los trabajadores (41).

Por ejemplo, en las situaciones laborales donde se produce una elevada exposición a los gases tóxicos, los sensores pueden detectar niveles peligrosos de ellos y advertir a los trabajadores inmediatamente. Igualmente, estos dispositivos permiten la transmisión y el almacenamiento de datos, o bien la obtención de datos continuos que permitan el análisis de las tendencias en seguridad y la toma de decisiones predictivas.

1.11.3. Big Data y Análisis Predictivo

El concepto de Big Data se refiere al análisis y procesamiento de grandes volúmenes de datos generados por múltiples fuentes tales como sensores, sistemas de seguimiento o informes de incidentes. En concreto, el análisis predictivo forma parte del Big Data y se define como la especialidad que aplica modelos estadísticos y algoritmos de Machine Learning (aprendizaje automático) para descubrir patrones que nos permitan anticipar acontecimientos

que aún no han tenido lugar. Esta modalidad es extraordinariamente útil para identificar qué partes de la organización se exponen a un mayor riesgo de accidente, dado que parte de datos que considera los incidentes en el pasado y otras variables (42).

La combinación del Big Data y la metodología de los Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SGSST) ayuda a no solo ser reactivos ante los incidentes, sino a ser también proactivos respecto a los riesgos. Los analistas en seguridad durante su análisis echarán mano de herramientas innovadoras de Machine Learning (aprendizaje automático) para detectar patrones no evidentes como las condiciones de riesgo que surgen de la interacción de diferentes variables (42).

1.11.4. Realidad Virtual (VR) y Realidad Aumentada (AR)

La incorporación de la realidad virtual (RV) y de la realidad aumentada (RA) está revolucionando por completo la orientación que se tenía hacia la formación en seguridad laboral. Con la RV se crean entornos simulados donde el trabajador puede interactuar sin ningún tipo de riesgo, ya sea protagonizando situaciones de emergencia o ejecutando tareas relacionadas con la seguridad sin estar expuesto a ningún peligro. Por ejemplo, se pueden simular evacuaciones en situaciones de incendios o formación sobre el uso seguro de maquinaria pesada, dando así la posibilidad a los trabajadores para practicar sus reacciones dentro de un entorno controlado (40). Por otro lado, la RA aporta información digital al entorno físico. En situaciones laborales se puede entender como el mostrar guías visuales en tiempo real de procedimientos de seguridad o avisos de riesgos inminentes. También la RA puede ser útil para la rápida

identificación de herramientas o equipos en grandes espacios lo que ayuda a aumentar la seguridad de los trabajadores (40).

1.11.5. Drones en la Inspección y Monitoreo de Riesgos

Los drones han pasado a ser herramientas realmente poderosas para inspeccionar lugares de difícil acceso como techos, fachadas o maquinaria de gran altura, pudiendo llevar a cabo inspecciones visuales, usando en su caso cámaras térmicas para poder detectar fallos estructurales o fugas en instalaciones del tipo industrial, etc. Se puede así, identificar los peligros antes de que se transformen en importantes incidentes. Tal y como han indicado Celik, los drones permiten también realizar una recolección de los datos de una forma más extensiva y más rápida, mejorando así la efectividad de la gestión de riesgos, al mismo tiempo que se reduce el tiempo que los trabajadores pasan expuestos a las situaciones de peligro (40).

1.12. Integración de Herramientas Tecnológicas en los SGST

La utilización combinada de diferentes herramientas tecnológicas en los SGST, permite a las organizaciones gestionar el desempeño de la seguridad laboral y la gestión de los riesgos de un modo más eficaz. El Big Data, el Internet de las Cosas (IoT), los drones, la realidad aumentada son herramientas que se retroalimentan y que forman una plataforma para el monitoreo, el control y el análisis. Es un enfoque que facilita la evaluación de manera continua, la mejora de los procesos de toma de decisiones y la utilización de los recursos disponibles (40).

Según Celik, el éxito de esta combinación se apoya en la centralización de datos, ya que todos los sistemas de seguridad están interconectados, de manera que se

puede tener una visión global del estado de la seguridad laboral dentro de la organización. El proceso de centralización de datos también favorece la comunicación entre departamentos, ya que permite que todos los actores relevantes en la gestión del riesgo (los técnicos, los gerentes, los empleados) tengan acceso a la información y sepan para reaccionar de un modo rápido y eficaz en caso de una emergencia (40).

1.13. Tendencias Futuras en el Uso de Tecnologías para SGST

El avance constante de tecnologías, como la inteligencia artificial, el aprendizaje automático y la realidad aumentada, va a provocar un impacto notable en los Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SGSST). Un desarrollo relevante es el propio avance de algoritmos de inteligencia artificial que permitirán, no solo prever incidentes con más precisión, sino también adaptar los programas de formación en seguridad a las condiciones concretas de cada uno de los empleados. Igualmente, el uso de gemelos digitales, es decir, representaciones virtuales de lugares de trabajo físicos, está surgiendo como otra de las herramientas más importantes para identificar y controlar riesgos antes de que se conviertan en problemas (40).

La ciberseguridad está empezando a convertirse en una de las cuestiones más importantes: el aumento de la interconexión tiene como consecuencia el aumento de la probabilidad de ser víctima de ataques cibernéticos que pueden amenazar la seguridad de los datos, que están muy relacionados con la salud laboral. En consecuencia, las organizaciones deben establecer políticas proactivas que garanticen que sus sistemas estén bajo control, y que la

confidencialidad, la integridad y la disponibilidad de la información sean las esperadas (40).

Se espera también que las plataformas de colaboración online, basadas en la cadena de bloques (blockchain), creen mayor transparencia y fiabilidad en cuanto a la gestión de la seguridad en el trabajo. Proveerá a cada empresa de la capacidad de intercambiar información o datos relevantes con las hoy organizaciones reguladoras y otros interesados a los que le sea de interés cumplir con la normativa y en consecuencia contribuirá a crear confianza en las políticas de seguridad que se adopten, o de un nuevo enfoque respecto el abordaje de las normas (40).

1.13.1. Adopción de Soluciones Hechas a Medida

Parece también que crecerá la adopción de soluciones tecnológicas a la medida para SGST, hechas a base de la forma de ser del sector industrial; estas tecnologías integrarían tecnologías disruptivas y transportables, permitiendo a las organizaciones abordar los problemas de su propia forma para garantizar que las iniciativas de seguridad estén alineadas con los objetivos operacionales (41).

1.13.2. Evolución de Plataformas de Monitoreo Colaborativo

Las plataformas de la vigilancia colaborativa que faciliten la comunicación con el tiempo real en la comunicación entre equipos internos y externos seguirán siendo una de las tendencias básicas, ya que determinan el aprendizaje colectivo (41) y al mismo tiempo contribuirán a la generación de soluciones nuevas de la interacción en un continuo proceso de mejora de buenas prácticas de lecciones aprendidas en gestión de la seguridad laboral (41).

1.13.3. Automatización Robótica de Procesos (RPA) en la Seguridad Laboral

La Automatización Robótica de Procesos (RPA) está reduciendo paulatinamente afianzando como una solución necesaria para llevar a cabo la automatización de tareas de realizar tareas repetitivas en el marco de los Sistemas de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SGST). Las actividades correspondientes a la generación de informes, la programación de auditorías y la monitorización de incidentes pueden ser gestionadas de otra manera por esta tecnología, ya que si libera a los trabajadores de las últimas tareas de rutina, la RPA supone en cierta medida no sólo el aumento de la eficiencia operativa sino que contribuye también a disminuir la posibilidad de errores humanos en la gestión de los datos de los accidentes laborales (41).

1.13.4. Uso de Inteligencia Artificial Conversacional

Los asistentes virtuales que incorporan inteligencia artificial (IA) se han convertido en un elemento clave para el avance de las actividades formativas y en la gestión de crisis. Las posibilidades de ofrecer información a los empleados en un periodo inmediato, ofrecer directrices de seguridad y ayudar en la evaluación inicial de las crisis, crea una capacidad de respuesta más rápida y efectiva (41).

1.13.5. Desarrollo de Protocolos de Respuesta a Crisis Basados en Tecnología

El uso de instrumentos complejos para la simulación y gestión de crisis, por ejemplo, los sistemas para el análisis de escenarios y los simuladores en tiempo

real, permitirá que las organizaciones estén más capacitadas para abordar emergencias. Las tecnologías de estas herramientas avanzadas son capaces de crear protocolos específicos que las organizaciones pueden poner en práctica para garantizar la seguridad de los trabajadores y la continuidad operativa, incluidos los escenarios más severos (41).

1.14. Aplicaciones Móviles para la Gestión de Seguridad Laboral

Las aplicaciones móviles se han convertido en algo central e importante en lo que respecta a la gestión de la seguridad en el trabajo, debido a la manejabilidad que aportan, así como a la simplicidad de su uso. Estas aplicaciones permiten a los trabajadores y supervisores enviar inmediatamente información sobre incidentes, consultar protocolos de seguridad y completar listas de verificación en cualquier lugar. Incluso, muchas aplicaciones incluyen tal función como la geolocalización, lo que ayuda a identificar rápidamente las zonas de riesgo y emitir alertas a los trabajadores que están en cercanía (41).

Ejemplo de aplicación: En sectores como la construcción y la minería, las aplicaciones móviles se implementan para registrar riesgos, envían alertas automáticas cada vez que hay una actualización de las normas de seguridad, y permiten acceder a manuales y guías.

1.15. Blockchain en la Gestión de Seguridad Laboral

El blockchain, habitualmente relacionado con el ámbito financiero, está tomando relevancia como mecanismo dentro de los Sistemas de Gestión de Seguridad en el Trabajo (SGST) para mejorar la trazabilidad y la transparencia. La tecnología

blockchain garantiza la integridad de los datos auditados, la autenticidad de los certificados de formación y el seguimiento del cumplimiento de la normativa de seguridad (42).

Ventajas destacadas:

- Inmutabilidad: Los registros de seguridad son incontestables e inalterables.
- Transparencia: Facilita auditorías y fomenta la colaboración entre las distintas partes interesadas.
- Seguridad: Minimiza el riesgo de acceso no autorizado a información sensible.

1.16. Wearables y su Impacto en la Seguridad Ocupacional

Los dispositivos portátiles o wearables están transformando la forma en la que las organizaciones gestionan la salud y la seguridad de sus empleados. Incluyen desde smartwatches (relojes inteligentes) y gafas de realidad aumentada hasta incorporar sensores directamente en la ropa (42).

Características clave:

- Monitoreo de vitas: Proporcionan una detección de información clave como la presencia de fatiga, estrés térmico o cardiovasculares.
- Monitoreo de localización: Proporcionan información de la presencia de un trabajador en zonas restringidas o peligrosas.
- Alertas en real time: Proporcionan la posibilidad de alertar en situaciones de emergencia.

Ejemplos de ejecución: En sectores como el petróleo, el gas y la fabricación se aplican wearables para poder asegurar la seguridad de los trabajadores que operan en entornos que pueden ser peligrosos.

1.17. Automatización y robótica en SGST

La automatización a partir de la robótica está eliminando la exposición directa de los trabajadores a las condiciones de trabajo peligrosas. Los robots se usan para realizar inspecciones en entornos hostiles, para manipular materiales tóxicos o para realizar tareas repetitivas con precisión (43).

Beneficios específicos.

Riesgos humanos reducidos: menor probabilidad de accidentes en tareas de alto riesgo.

Eficiencia superior: operaciones más rápidas y precisas.

Mantenimiento predictivo: robots equipados con sensores que detectan riesgos reales de mal funcionamiento de equipos antes de que se produzcan.

1.18. Sistemas de alerta temprana en seguridad laboral

Los sistemas de alerta temprana mediante inteligencia artificial y análisis predictivo constituyen una innovación esencial. Dichos sistemas utilizan datos históricos y en tiempo real para emitir alertas sobre la posibilidad de ocurrencia de ciertos incidentes antes de que ocurran (44).

Ejemplo de su aplicación:

Monitoreo de vibraciones en estructuras para detectar fallos inminentes.

Predicciones de eventos meteorológicos extremos que pueden afectar a operaciones en el exterior.

1.19. Tecnologías de geolocalización y SIG

Los sistemas de información geográfica (SIG) y las tecnologías de geolocalización conforman una herramienta esencial para construir mapas de riesgos en condiciones específicas. Estos sistemas permiten a las empresas detectar patrones geoespaciales en accidentes, evaluar la distribución de recursos y planificar respuestas de emergencia más eficaces (44).

Ventajas:

Visualizaciones de los riesgos en mapas interactivos.

Rutas de evacuación optimizadas.

Áreas de alto riesgo que pueden ser objeto de intervenciones preventivas.

II. CAPITULO II: Datos del sistema de gestión de seguridad en el trabajo que pueden ser optimizados con herramientas tecnológicas.

2.1. Introducción

En el presente, la gestión de la seguridad en el trabajo en el ámbito de la minería tiene que hacer frente a retos muy importantes debido a la enorme cantidad de datos que se generan y, al mismo tiempo, al objetivo de una optimización. Las herramientas tecnológicas emergentes permiten hacer más fácil la recopilación, almacenamiento, procesamiento y análisis de lo que se conoce como datos para mejorar la toma de decisiones y con ello la prevención de accidentes. El capítulo contiene un examen teórico sobre las herramientas tecnológicas aplicadas a las optimizaciones de datos en el SG-SST con un interés sobre su aplicación en las empresas de mantenimiento predictivo en el ámbito de la minería.

2.2. Sistema de Gestión de Seguridad en el Trabajo (SG-SST)

En la minería El SG-SST es un conjunto de elementos interrelacionados que permiten establecer políticas, objetivos y procesos para la Seguridad y Salud en el Trabajo (45). Este sistema en la minería es de gran preocupación debido a los riesgos inherentes a la actividad de extracción de minerales y por la necesidad de cumplir estrictamente con normativas (46). La gestión de datos dentro del SG-SST permite determinar patrones de riesgo, mejorar las estrategias de mitigación y mejorar el cumplimiento normativo (46).

El SG-SST incluye la implementación de sistemas de control continuo, la evaluación de las condiciones ambientales y la mejora del uso de los equipos de

protección personal (EPP). Así mismo, las normativas internacionales y locales establecen que se deberá reportar los incidentes y mantener un registro pormenorizado de cada accidente, las enfermedades ocupacionales, el control de los equipos de protección personal (EPP) y de las medidas de prevención adoptadas (45).

La aplicabilidad del SG-SST exige necesariamente la implementación de herramientas digitales que permitan la recopilación y análisis de cantidades ingentes de información de forma eficiente. Las mayores digitalizaciones de los procesos de identificación de los peligros contribuyen no solo a identificar los riesgos desde el principio, sino que también y consideran una capacitación del personal mucho más óptima y reducen los tiempos de respuesta en situaciones de emergencia (46).

2.3. Importancia de la optimización de datos para el SG-SST

La optimización de los datos para el SG-SST resulta determinante para conseguir una mejora en la eficiencia operativa y en la seguridad. Un correcto tratamiento de datos permite también determinar tendencias en los incidentes, prever fallos en los equipos y evaluar la eficiencia de las medidas de seguridad (47). Además, la digitalización y el tratamiento y análisis de datos facilita la reducción de los errores humanos y la toma de decisiones basada en la evidencia (47).

En el sector minero, la obtención y análisis de datos puede conseguir una mejora de la identificación de los peligros ergonómicos, mecánicos y ambientales. Y mediante la integración de herramientas tecnológicas las empresas pueden

conseguir un aumento en el tiempo de respuesta ante las emergencias, una mejora en la formación del personal y una reducción en los efectos negativos de los accidentes laborales (48).

La optimización de los datos para la empresa minera le puede permitir cumplir con la normativa de seguridad y salud laboral evitando posibles sanciones legales y elevar el prestigio en la industria de la minería (48). Asimismo, tener información exacta y en tiempo real permite que los supervisores tomen decisiones más adecuadas y realizar estrategias de prevención más eficaces (48).

2.4. Herramientas Tecnológicas para la optimización de los datos en el SG-SST

2.4.1. Big Data y análisis de datos

En la gestión de la seguridad laboral el Big Data permite la revisión de grandes volúmenes de información con un análisis en tiempo real que favorece la determinación de patrones de riesgo y la mejora de la capacidad predictiva del SG-SST (49). Mediante el análisis también de datos históricos se puede prever la ocurrencia de incidentes y optimizar las estrategias de seguridad (49).

La implementación del Big Data en minería ha posibilitado la integración de múltiples fuentes de información provenientes de sensores, reportes del trabajador y los registros históricos de accidentes. Ello posibilita crear modelos de predicción que son capaces de

establecer áreas de alto riesgo y estrategias de mitigación adecuadas (49).

Los algoritmos de análisis de datos permiten obtener correlaciones entre las variables tono, presión atmosférica, nivel de fatiga de los trabajadores y condiciones del terreno. Esto conduce a que las organizaciones pongan en marcha medidas de prevención a la espera de la generación de un accidente (49).

Un ejemplo de éxito en el campo minero es la utilización del Big Data para el control de la salud de los trabajadores mineros en las minas subterráneas, donde gracias a unos sensores conectados es posible monitorizar en tiempo real los signos vitales de los trabajadores y la adopción de protocolos de seguridad contra alteraciones que podrían desembocar en problemas de salud ocupacional (49).

El examen de la información histórica es esencial para predecir la aparición de incidentes y perfeccionar los mecanismos de seguridad. Gracias al procesamiento de la información acumulada a lo largo del tiempo, es factible detectar y documentar las tendencias existentes, las causas de las que derivan accidentes y las medidas necesarias para prevenir la repetición de situaciones inseguras (49).

La articulación del Big Data en minería ha facilitado la posibilidad de que varias fuentes de información, tales como sensores, informes del trabajador, así como registros históricos de accidentes, amalgamados como un flujo continuo se integran de la información, puedan ser usados para proporcionar un modelo de predicción que permita

identificar áreas de riesgo extremo y ofrecer estrategias de mitigación, de esta manera el enfoque basado en datos, contribuye a la seguridad dando un fuerte impulso al uso de datos en la planificación de la seguridad y en la gestión de recursos para la prevención de riesgos laborales (49).

Los algoritmos de Big Data permiten identificar correlaciones entre variables como el tono ambiental, la presión atmosférica, los niveles de fatiga de los trabajadores y las características del terreno, analizando factores conjuntamente las compañías pueden anticiparse a los riesgos en la ejecución de los trabajos, implementando medidas antes de que ocurra un incidente. Bajo esta línea de argumentación podemos afirmar que el Big Data contribuye no solo a mejorar la respuesta a situaciones peligrosas, sino que también contribuye a construir un enfoque de la seguridad basada en antelación y prevención (49).

Por otra parte, la utilización de las herramientas del Big Data en el SG-SST permite la mecanización de procesos de auditoría y cumplimiento normativo, favoreciendo la producción de informes de auditoría y el control del cumplimiento normativo en las empresas, las mismas pueden asegurarse que sus protocolos estuviesen alineados con los estándares internacionales y, o la propia mejora de sus estrategias de seguridad (49).

2.4.2. Internet de las Cosas (IoT)

El IoT permite la recogida automática de datos mediante sensores situados en equipos y en el espacio de trabajo (50). Los dispositivos

monitorean las variables fundamentales tales como temperaturas, presiones y vibraciones a fin de dar respuesta ante las condiciones de peligro (50). En el sector minero, el IoT mejora la monitorización de la maquinaria y de la salud de los trabajadores mediante sistemas de alerta en tiempo real (50).

Los dispositivos IoT se pueden integrar con los sistemas de comunicación de emergencia, que permiten dar respuesta a los accidentes. El IoT también permite monitorizar la fatiga de los trabajadores a través de los artículos de vestuario (wearables) que almacenan los signos vitales de los trabajadores y que emiten alertas cuando se llega a los estados de riesgo (51). Un estudio sobre el uso del IoT en el sector de la minería ha revelado que el uso habitual de sensores en cascos y chalecos inteligentes ha producido una reducción del 40 % de los accidentes ocasionados por la fatiga a raíz de la detección anticipada de señales de agotamiento de los trabajadores (51). Además, la implementación del IoT en el ámbito minero no solo mejora la seguridad del operario, sino que también optimiza el mantenimiento de las máquinas y equipos críticos. Los sensores IoT montados sobre camiones, taladros y correas transportadoras pueden detectar anomalías en el funcionamiento de éstas; anticipándose a fallos mecánicos y minimizando el riesgo de accidentes por fallos operativos (50).

Otro aspecto importante es la capacidad de interaccionar el IoT con la analítica y la inteligencia artificial, lo que posibilita la generación de sistemas de mantenimiento predictivo que detectan signos de desgaste

previos a la parada del funcionamiento. El uso de la analítica no solo incrementa las eficiencias operativas, sino que también minimiza los tiempos de inactividad de las máquinas y reparaciones inesperadas (50). En lo que respecta a la salud y seguridad laboral, el IoT permite la medición en tiempo real de la calidad del aire en las minas subterráneas, pudiendo detectar la presencia de gases tóxicos como el monóxido de carbono o el metano; de esta forma, los obreros pueden ser inmediatamente avisados con el fin de evacuar o adoptar conductas de prevención ante condiciones de trabajo peligrosas (51).

La conectividad de estos dispositivos con plataformas cloud permite consultar la información desde cualquier punto, facilitando la toma de decisiones en tiempo real por los gestores de seguridad. Por último, el IoT puede integrarse también con tecnologías de realidad aumentada para proporcionar formación alojando un sistema de capacitación referente a la seguridad laboral y reforzando la preparación del operario en caso de situaciones de emergencia (50).

2.4.3. Inteligencia Artificial y Aprendizaje de Máquinas

Las metodologías de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje de máquinas (ML) son útiles para mejorar el procesamiento y análisis de datos del SG-SST al identificar correlaciones y tendencias no evidentes para los operadores de los procesos (52).

Estas herramientas permiten conocer y prever la posibilidad de que se produzcan accidentes laborales junto a las medidas correctivas en

función del análisis de los datos de explotación juntos con las condiciones actuales (52).

La IA también permite la automatización de los procesos de auditoría en la seguridad, de manera que reduce la sobrecarga administrativa y mejora la precisión de la identificación de los incumplimientos normativos. La minería también se benefició de algoritmos de ML para analizar la estabilidad de las infraestructuras subterráneas e identificar potenciales colapsos (52).

Las aplicaciones de IA en minería también pueden visualizarse cuando se utilizan drones que están integrados con algoritmos de visión artificial para inspeccionar túneles y detectar grietas o irregularidades en su estructura, además de mejorar la seguridad reduciendo la exposición de los operadores en entornos peligrosos (53).

2.4.4. Sistemas de Gestión en la Nube

Las plataformas en la nube contribuyen a almacenar y gestionar los datos del SG-SST de manera segura y accesible desde cualquier lugar. La integración de datos en la nube ayuda a la centralización de la información y facilita el trabajo en conjunto entre distintos niveles jerárquicos dentro de una empresa dedicada al mantenimiento predictivo (54).

Estos sistemas también ofrecen la seguridad de la información, puesto que es más difícil perder información o tener accesos no autorizados.

La nube también permite la integración de soluciones tecnológicas, como IoT e IA, en un único ecosistema de gestión (55).

Un informe del sector de la industria minera sostiene que entre el 70% de las empresas que aplican soluciones en la nube afirman haber aumentado sus tiempos de respuesta ante emergencias y mejora el acceso a reportes de seguridad en tiempo real (55).

Por otra parte, el uso de plataformas en la nube facilita la gestión del SG-SST mediante la posibilidad de automatizar procesos críticos de la gestión de seguridad, haciendo más fácil la creación de informes, la planificación de auditorías, el seguimiento en tiempo real de indicadores de rendimiento, etc., lo que permite una adecuada gestión de la información y, por tanto, la adopción de decisiones estratégicas más adecuadas (55).

La capacidad de escalabilidad es otra de las ventajas que podría presentar una plataforma en la nube, ya que las empresas mineras podrían adaptarse a sus capacidades operativas sin necesidad de tener que realizar inversiones en infraestructura tecnológica muy grandes. Las empresas podrían incrementar o disminuir su capacidad de almacenamiento y procesamiento de datos en función de las exigencias del negocio (55).

Las plataformas en la nube permiten además mejorar la colaboración y comunicación en el seno de las empresas, permitiendo el acceso remoto a la información para diferentes usuarios y áreas. Este desempeño es útil para la minería, donde la dispersión de las operaciones y la adecuada gestión de la información en tiempo real son temas muy importantes (55).

También en cuanto a la seguridad de la información, existe un gran número de prestaciones que tienen encriptación de datos y autenticación de usuarios, de tal manera que el acceso a la información sensible en el seno del SG-SST permitiría reducir la posibilidad de la pérdida y manipulación indebida de datos críticos en cuanto a la seguridad y salud de los trabajadores (54).

Finalmente, la nube, conectada con herramientas de inteligencia artificial, posibilitan la identificación de tendencias y patrones de riesgo y por lo tanto maximizan la capacidad predictiva del SG-SST, ayudando incluso a prevenir accidentes antes de que se produzcan. Con el avance de la tecnología se espera la evolución de las propias plataformas y el avance en aportes de un nivel de sofisticación superior en la seguridad laboral en el sector minero.

En definitiva, el Big Data y las analíticas de datos constituyen una revolución en la optimización del SG-SST en el sector minero. La capacidad de procesar volúmenes de información de gran tamaño para la generación de modelos predictivos ha conseguido mejorar la seguridad en el trabajo, reducir los accidentes y potenciar la cultura preventiva en las empresas mineras. Con la evolución de la tecnología, se espera la evolución de las propias herramientas y el avance en aportes de un nivel de sofisticación superior en la gestión de la seguridad laboral.

2.4.5. La ciberseguridad en la gestión de datos del SG-SST

El incremento en el uso de tecnologías digitales en la minería también incrementa la exposición a los riesgos cibernéticos. La ciberseguridad en el marco del SG-SST es clave para poder garantizar el uso adecuado de la información sensible y no llegar a tener intrusiones indeseadas que puedan comprometer la seguridad de los trabajadores (56).

Los ciber riesgos en la industria de la minería pueden ser ataques de ransomware, robo de información, sabotajes digitales, así como también accesos no autorizados a los sistemas críticos de la empresa. La protección de la información del SG-SST requiere de la implementación de un sinnúmero de mecanismos de seguridad, desde cortafuegos profesionales, sistemas de detección de intrusos hasta protocolos de cifrado de datos para evitar que la red corporativa contenga vulnerabilidades (56). Una de las medidas de la protección de la información del SG-SST por ejemplo puede ser mediante la formación de los trabajadores en ciberseguridad, fomentando buenas prácticas para el manejo de la información y el uso de las herramientas de acceso a la red corporativa. También la aplicación de medidas como la autenticación multifactor (MFA) en las épocas de intervención, la auditoría de seguridad periódicamente pueden incrementar la protección de la información del SG-SST (56).

Las regulaciones marco como la ISO/IEC 27001 y el NIST Cybersecurity Framework contemplan los lineamientos para la gestión

segura de la información en la industria, ayudando a mitigar la probabilidad de sufrir un ataque cibernético (56).

En el caso de la industria de la minería la integración de inteligencia artificial para la detección de anomalías de la red y respuesta automatizada es una buena contribución para proteger la información del SG-SST. Asimismo, la adopción de tecnologías como la blockchain para la trazabilidad y custodia de la información garantiza la integridad de los registros de seguridad del trabajo, evitando su manipulación o pérdida de datos útiles (56).

2.4.6. Blockchain para la trazabilidad y seguridad de los datos

La tecnología blockchain tiene la capacidad de ofrecer un sistema descentralizado y seguro para el manejo de los datos del SG-SST. Gracias a esta tecnología, los incidentes laborales, las auditorías y cualquier reporte pueden ser grabados en una base de datos inalterable, lo que genera una mejora de la transparencia y la trazabilidad de la información (57).

2.4.7. Realidad Aumentada y Realidad Virtual en la capacitación en seguridad

Las tecnologías de realidad aumentada (RA) y realidad virtual (RV) han demostrado su utilidad en la capacitación de trabajadores en el sector de la minería. Mediante simulaciones interactivas, los trabajadores se entrenan en protocolos de seguridad sin correr el riesgo de sufrir un accidente (57).

2.4.8. Ejemplos exitosos de herramientas tecnológicas en SG-SST

Diversas empresas mineras pioneras han incorporado herramientas tecnológicas en sus SG-SST con alto éxito. El caso de la minera Rio Tinto, por ejemplo, ha logrado implementar un sistema de medición de las condiciones de sus operaciones en tiempo real mediante IoT, alcanzando no sólo la reducción de casi la totalidad de los accidentes laborales (57), sino un avance en cuanto al bienestar de sus trabajadores.

2.4.8.1. Rio Tinto y el IoT

Rio Tinto ha diseñado un sistema de monitorización supportado por IoT con la finalidad de evaluar las situaciones de sus operaciones en tiempo real. Gracias a la implementación de sensores dispositivos en maquinaria y equipos de perforación, han mejorado la detección de las situaciones peligrosas antes de que supongan siniestros. Con ello han conseguido reducir significativamente los accidentes laborales y la eficiencia operativa del proceso. Además, los datos recogidos son utilizados para formar sobre los peligros específicos y diferenciados de cada mina (57).

2.4.8.2. BHP Billiton y la IA

BHP Billiton ha realizado la implementación de IA y analítica de datos en sus operaciones mineras con el objetivo de tener un descenso de accidentes y en la mejora de la seguridad. Mientras que mediante algoritmos de machine learning han conseguido predecir fallos de las máquinas críticas haciendo un correcto mantenimiento preventivo. Esto ha supuesto una reducción de costes operativos y ha mejorado las condiciones de trabajo al

evitar fallos inesperados que pueden tener a los trabajadores en un riesgo alto (58).

2.4.8.3. Anglo American y su sistema de gestión en la nube

Anglo American ha digitalizado su sistema de gestión de SG-SST mediante plataformas de soporte de gestión en la nube, permitiendo la monitorización remota de todas sus operaciones. Gracias a la implementación de estos sistemas, los supervisores pueden acceder a datos de la operación en tiempo real desde cualquier rincón de la operación, permitiendo una toma de decisiones rápida e informada. Por otro lado, la trazabilidad de los reportes de seguridad ha mejorado, llegando a un descenso de incidentes y mediante un aumento de las políticas de cumplimiento de la seguridad (59).

2.4.8.4. Vale y la inmersión dentro de la Realidad Virtual

Vale ha puesto en marcha tecnologías de realidad virtual para la formación de sus empleados en donde la seguridad dentro del trabajo. Con simulaciones en el entorno de la realidad virtual, los trabajadores pueden practicar la evacuación, la manipulación de los equipos y máquinas de forma aprendida y el tratamiento de emergencias. Esta práctica ha supuesto una reducción de errores en la ejecución de las medidas de seguridad (60).

2.5. Beneficios de la utilización de soluciones tecnológicas en el SG-SST

Los beneficios de la utilización de soluciones tecnológicas en el SG-SST incluyen una mejor seguridad laboral optimizada, reducción de costos operativos, son las implicaciones de la norma mínima del SG-SST. La automatización y digitalización de procesos aportan a la eficiencia de la

organización y a la protección de los trabajadores como los que intervienen en la labor en ambientes sensibles como es el propio del sector minero (60).

2.5.1. Reducción de costos y optimización de recursos

Las soluciones tecnológicas permiten una mejor gestión de los recursos humanos y materiales y, por tanto, una reducción de los costes de explotación (61).

2.5.2. Disminución de accidentes laborales y mejor control de la seguridad

El uso de herramientas tecnológicas hace posible el diagnóstico de riesgos y la prevención de los accidentes, lo que contribuye a mejorar la seguridad laboral (61).

Las compañías pueden anticiparse con la automatización de los procesos de monitoreo en tiempo real ya que pueden detectar las condiciones de riesgo antes de que se produzcan los incidentes, favoreciendo la toma de decisiones basada en datos (61).

El análisis predictivo potenciado por el Big Data e IoT ayudan a las organizaciones mineras a predecir patrones de comportamiento y condiciones inseguras para prevenir accidentes. Un ejemplo son los sensores que forman parte de las máquinas y equipos para identificar el desgaste de los componentes claves antes de que se produzca su fallo, disminuyendo así la probabilidad de tener accidentes mecánicos (61).

Las tecnologías permiten la formación del personal simulando escenarios de riesgo en el que se puede producir una reacción de los

trabajadores con el uso de la realidad aumentada y la inteligencia artificial. Las formaciones inmersivas han demostrado ser más eficaces que la formación convencional y aumentan la retención de los conocimientos en materia de seguridad (61).

Las soluciones de comunicación avanzadas como los sistemas de alertas en tiempo real y el seguimiento georreferenciado de los trabajadores en minas subterráneas permite dar respuestas inmediatas ante eventos peligrosos. En caso de colapsos o fugas de gases tóxicos, los sistemas inteligentes pueden activar diferentes protocolos de evacuación.

Así, desde el punto de vista de la gestión de la seguridad en el trabajo la integración de herramientas tecnológicas disminuye los accidentes y mejora la cultura de la seguridad en el seno de la organización, ayudando a construir una cultura de trabajo más segura y eficiente.

2.5.3. Incremento de la productividad

Al acortar tiempos muertos y optimizar procesos, la productividad de las empresas mineras mejora sustancialmente (61).

Su uso reduce el tiempo de operación y mejora la eficiencia del trabajo, ya que la automatización de trabajos repetitivos y peligrosos las nuevas herramientas tecnológicas (digitalización de los procesos, sensores inteligentes, integración de datos en tiempo real, etc.) permite el uso de información utilizada en materia operativa disponible para la toma de decisiones, allevando la equivocación operativa al mínimo (61).

Por otro lado, la implementación de sistemas de control continuo mediante IoT y Big Data permite la mejora del mantenimiento de maquinaria y evitar tiempos muertos por averías mayores. Un mantenimiento predictivo oportunamente controlado baja el coste de reparación y mejora la operatividad, aumentando el periodo de la producción de la empresa (61).

- La capacitación y formación del personal con simulaciones en entornos de realidades virtuales y aumentada le ayudará a formar eficazmente al personal, la formación controlada de los trabajadores reduce el tiempo de instrucción y es eficaz en la preparación para situaciones de riesgo real (61).

- La gestión eficiente de los recursos. Las tecnologías avanzadas pueden controlar insumos, baja los espacios de desperdicios y pueden maximizar el rendimiento del material utilizado en todos los procesos de la minería, estas organizaciones logran cumplir mayores niveles de producción con un menor uso de recursos suplementarios y esto se refleja de forma positiva en la rentabilidad y la sostenibilidad de la organización (61).

Como conclusión, el uso de las herramientas tecnológicas en la minería mejora el SG-SST.

La incorporación de herramientas tecnológicas en la minería mejora el SG-SST y mejora de forma notable la productividad y eso significa optimizar procesos y mejorar la forma como cada uno de los componentes de la industria cumple sus obligaciones (61).

2.5.4. Casos de éxito

Las empresas mineras han conseguido importantes avances en la gestión de la seguridad en el trabajo mediante la implementación de soluciones tecnológicas innovadoras. Se explican a continuación casos de éxito donde la digitalización y automatización han sido la causa de la reducción de incidentes, mejora de procesos y seguridad en la actividad laboral (61).

Uno de los casos más relevantes es el de una compañía minera de clase mundial que implementó un sistema de vigilancia de la seguridad de los trabajadores en sus operaciones subterráneas, mediante cámaras y sensores con red conectada. Este sistema es capaz de identificar e informar de comportamientos de riesgo de los trabajadores en tiempo real, lo que ha llevado a una reducción del 30 % de los incidentes comunicados en el último año (61).

En el segundo caso, una empresa minera se avanzó al incorporar drones para la inspección y vigilancia de minas a cielo abierto, lo cual ha contribuido con una reducción del 50 % en la exposición de los trabajadores a las áreas de alto riesgo, lo que ha significado un salto cualitativo en la seguridad en el trabajo (61).

Finalmente, la integración de sistemas de IoT con plataformas de análisis predictivo están permitiendo a distintas compañías mineras anticipar fallas mecánicas en su maquinaria pesada, llegando a regular la cantidad de accidentes por fallas operativas en hasta un 40 % de

forma simultánea en el endurecimiento de sus tasas de productividad en los procesos extractivos.

2.5.4.1. Sustitución con sensores inteligentes para la seguridad en Barrick Gold

Barrick

Gold ha implementado sensores inteligentes dentro de su operación minera para controlar la situación del entorno y las máquinas en tiempo real. Gracias a la incorporación de esta tecnología se han detectado niveles peligrosos de gases y condiciones de inestabilidad en túneles subterráneos, facilitando la ejecución de acciones preventivas. Esto ha permitido a los trabajadores estar menos expuestos a situaciones de riesgo y mejorar la respuesta a incidentes (62).

2.5.4.2. Uso de drones para la inspección de áreas de riesgo en Newmont

Mining

Newmont Mining ha desarrollado drones con cámara de alta resolución y sensores térmicos para inspeccionar áreas de difícil acceso y alta peligrosidad de las minas. La adopción de esta solución ha dado lugar a tener menos necesidad de que los trabajadores realicen la inspección manualmente en entornos peligrosos, minimizando la exposición a incidentes. Más aún, los datos pasan a ser analizados de forma precisa y se evalúa el estado de las infraestructuras para prevenir fallas estructurales (62).

2.5.4.3. Digitalización de reportes de incidentes en Antamina

Antamina ha desarrollado una plataforma digital para la generación de reportes de incidentes y condiciones inseguras. Antes de adoptar esta

solución, se generaron reportes manualmente, lo que causaba demora en la toma de decisiones. Con la digitalización la empresa ha podido mejorar la recolección de datos, la eficacia en la respuesta ante incidentes se ha visto beneficiada y la velocidad de respuesta se ha acelerado (63).

2.5.4.4. Realidad Virtual para la capacitación en seguridad en Codelco

Codelco ha puesto en marcha programas de realidad virtual para formar a su personal en protocolos de seguridad y respuesta ante emergencias. Facilitando la interna del entorno virtual, los empleados pueden experimentar el peligro en un entorno controlado, lo que promueve mayor preparación y capacidad de respuesta. De ahí que, además de haber disminuido los accidentes producidos por errores humanos, ha aumentado la concienciación sobre la importancia de las normas de seguridad (63).

2.5.4.5. Aplicaciones móviles para el monitoreo de seguridad en AngloGold Ashanti

AngloGold Ashanti ha desarrollado aplicaciones móviles para que los trabajadores puedan advertir situaciones peligrosas en tiempo real. La misma aplicación facilita la comunicación entre trabajadores y supervisores, lo que permite una respuesta rápida a las amenazas a la seguridad. El análisis de los datos recogidos a partir de la aplicación ha permitido identificar patrones de riesgo, para que las estrategias de mitigación sean mejor implementadas (63).

2.5.4.6. Inteligencia Artificial en la predicción de accidentes en Vale

Vale ha implementado inteligencia artificial en sus procesos de gestión de la seguridad a partir del análisis de datos históricos y de variables

ambientales para predecir incidentes. Los algoritmos de aprendizaje automático encuentran factores de riesgo o advertencias preventivas, que permiten aplicar acciones correctivas antes que suceda un incidente. Esta acción ha permitido reducir considerablemente el número de accidentes y ha mejorado la cultura de la seguridad en la organización (60).

2.5.4.7. Uso de exoesqueletos para reducir lesiones en Freeport-McMoRan

Freeport-McMoRan ha incorporado exoesqueletos para reducir la carga de los trabajadores y prevenir lesiones musculoesqueléticas. Se trata de dispositivos de apoyo ergonómico, que permiten disminuir la fatiga y el riesgo de accidentes vinculados a tareas repetitivas o de alto esfuerzo. La introducción de exoesqueletos ha mejorado la productividad de los empleados y su bienestar, a la vez que ha reducido los días por absentismo laboral por lesiones (60).

2.6. Conclusión.

La optimización de datos en el Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) a través de herramientas tecnológicas es esencial para incrementar la seguridad y la eficiencia en empresas del mantenimiento predictivo del sector minero. La utilización del Big Data, del IoT, de la inteligencia artificial, de la gestión en cloud computing y de software especializado mejora la gestión de la seguridad sustentada en los datos obtenidos de forma continua.

La evolución de las tecnologías aplicadas a la aplicación del SG-SST ha derivado en un impacto positivo en la seguridad laboral y en la sostenibilidad de las operaciones del sector minero. Cuando las empresas comienzan a

utilizar soluciones digitales de gran alcance, se observa cómo la tasa de incidentes laborales se reduce de forma exponencial y, por lo tanto, la salud laboral de los trabajadores mejora, y el mismo tiempo, se aumenta la productividad y se disminuyen los costos relacionados con la atención de accidentes.

Uno de los principales atributos de la digitalización del SG-SST es la posibilidad de tomar decisiones basadas en el cumplimiento de los análisis de datos en tiempo real; al igual que el hecho de anticiparse a los riesgos potenciales y poder actuar de forma proactiva en la aplicación de la seguridad. Por otra parte, la combinación de IA y Machine Learning en la predicción de accidentes y fallas de los equipos es muy efectiva y permite que las empresas puedan ir optimizando sus protocolos de seguridad de forma continua.

No obstante, a pesar de los avances tecnológicos, continúan existiendo retos en el uso de las herramientas mencionadas. Uno de los obstáculos a superar es la resistencia al cambio de las organizaciones, teniendo en cuenta que algunos de los/as trabajadores/as pueden ver la digitalización como una amenaza a su trabajo. Para afrontar este desafío, será relevante llevar a cabo una inversión en sensibilización y formación, dado que la tecnología se asimile como una colaboradora en la mejora de las condiciones laborales.

Un segundo reto a tener presente es el desembolso inicial que la adopción de una tecnología avanzada conlleva. A largo plazo, los beneficios van a superar los costes, pero muchas empresas pueden ver dificultades financieras para implementar sistemas de control inteligente, análisis de Big Data e IA. En

este sentido, es importante que las administraciones y las entidades reguladoras promuevan incentivos para la modernización del SG-SST del sector minero.

Conforme las empresas siguen su proceso de transformación digital, el futuro del SG-SST de la minería va hacia un contexto cada vez más automatizado e interconectado. La combinación de las tecnologías que aparecen, como por ejemplo el IoT, la realidad aumentada o el cloud computing, va a permitir alcanzar niveles de seguridad y eficiencia operativa que fortalezcan un modelo de gestión de alta precisión basado en datos.

Para terminar, la optimización de los datos a través de las herramientas tecnológicas es un medio fundamental para poder reforzar la seguridad en el trabajo del sector minero. Las adopciones de estas herramientas no solo aseguran la ayuda al trabajador, sino que incrementan la competitividad a la vez que promueven un ambiente laboral seguro, eficiente y sostenible en el tiempo.

III. CAPITULO III: Herramientas digitales que aplican para la optimización de datos de un sistema de gestión de seguridad.

3.1. Introducción

La gestión de la seguridad y salud en el trabajo (SST) en el ámbito minero se muestra como un elemento que no puede faltar para tener la seguridad de los trabajadores, pero también para que se puedan optimizar los procesos que se tienen, ya que la minería es un entorno donde el riesgo es alto, donde las condiciones del trabajo son extremas y donde los accidentes pueden llegar a ser mortales cuando no tienen un buen tratamiento.

Las herramientas tecnológicas tienen mucha importancia para poder recoger, analizar y utilizar la información para superar riesgos y optimizar los sistemas de gestión de la seguridad.

Contar con la tecnología integrada en el sistema de la seguridad laboral permite que se tome una decisión fundamentada, disminuye la existencia de accidentes y optimiza la respuesta ante emergencias que se pueden producir.

Las empresas de mantenimiento predictivo del sector minero necesitan sistemas de gestión robustos y avanzados para poder tener en cuenta todos aquellos riesgos, las condiciones ambientales y el estado de los equipos.

La optimización de los datos mediante herramientas digitales no sólo posibilita la seguridad, sino que mejora tanto la productividad como el marco normativo que se tiene en el entorno minero.

El presente capítulo se centra en analizar las principales herramientas tecnológicas que se utilizan dentro del sector minero para optimizar los datos que forman parte del sistema de la gestión de la seguridad en el trabajo.

Nos centraremos en sistemas de gestión en la nube, Big Data, análisis predictivo, IoT, inteligencia artificial, drones y software específico; además, en algunos de los casos, nos detendremos en ejemplos de mantenimiento predictivo, y de esta forma nos centraremos también en los beneficios que pueden proporcionarse, así como los riesgos que su implementación puede suponer para los trabajadores del sector. Ejemplos de casos de éxito complementarán las barreras del entorno que se pueden superar.

3.2. Importancia de la optimización de datos en la SST

La minería es una de las actividades industriales que comporta más riesgos laborales, debido a la forma de operar de la misma. Los trabajadores se enfrentan a peligros asociados a derrumbamientos, explosiones, contaminación atmosférica, temperaturas extremas y defectos en la maquinaria. El correcto control de la SST depende en gran medida de la capacidad de recopilar y gestionar los datos de forma adecuada y eficaz para una toma de decisiones más ágil y precisa (64).

El modelo de optimización de datos en la SST permite a las empresas detectar patrones de riesgo, tener mejor respuesta ante situaciones de emergencia y asegurar el cumplimiento de la normativa vigente, etc. Hay literatura que sugiere que la incorporación de tecnologías digitales en minería puede reducir hasta un 40% la tasa de accidentes comparado con la cultura de seguridad tradicional. La seguridad de los trabajadores es una condena, por lo menos, prioritaria y por el contrario se puede ver que las herramientas de optimización de datos en SST son un factor crítico para la sostenibilidad y la operatividad de las empresas mineras (65).

Los beneficios más destacados de la optimización de datos en la SST son:

- **Detección de riesgo anticipada:** Los sistemas digitales ofrecen la posibilidad de detectar anomalías y patrones que sugieren el riesgo de fallos o accidentes en criterios estandarizados, antes de que se produzcan (66).
- **Automatización de procesos:** Ofrece posibilidades para reducir los errores humanos y optimizar la recolección de datos en tiempo real (66).
- **Mejor toma de decisiones:** Los informes obtenidos son en tiempo real y permiten gestionar la SST proactivamente y ser más eficaces en la respuesta ante incidentes (66).
- **Reducción de costos:** La prevención de accidentes puede generar una reducción de los gastos que tienen lugar en concepto de indemnizaciones, reparaciones de equipos y las pérdidas de productividad que se producen como consecuencia de las interrupciones de la operativa (67).
- **Cumplimiento normativo:** Los sistemas digitales permiten documentar y garantizar el cumplimiento de una normativa de seguridad de forma eficaz (67).

3.3. Principales herramientas tecnológicas para la optimización de la SST

3.3.1. Sistemas de gestión de la seguridad en el Cloud Computing

Los sistemas de gestión de la seguridad operan en la nube a remota, permiten trabajar con grandes cantidades de datos y presentan ventajas destacadas sobre los sistemas de gestión de la seguridad en cuanto a

alcanzar los niveles de, por ejemplo, disponibilidad, integridad u facilidad de escalado (68).

Las plataformas de Cloud Computing ofrecen herramientas de gestión de incidentes, auditorías de seguridad, riesgos de monitoreo de riesgos y formación en materia de SST. Los sistemas de Cloud Computing también permiten una integración con otros sistemas, como IoT o análisis predictivo, lo que incrementa la eficiencia operativa de la mina. De hecho, se trata de plataformas que han sido implantadas con éxito por empresas mineras que han logrado alcanzar unos buenos tiempos de respuesta ante emergencias (69).

Incluso los sistemas de Cloud Computing se pueden servir de otras tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y el análisis predictivo, favoreciendo la eficiencia operativa de las minas. Sensores embebidos, conectados a la nube permiten recabar información sobre el estado de la maquinaria, las condiciones ambientales del lugar y el estado de los trabajadores, generando alertas sobre riesgos en tiempo real. De esta forma, se reduce el riesgo de sufrir accidentes y se mejora la planificación del mantenimiento de equipos críticos (69).

Las empresas mineras que han ido implementando soluciones de Cloud Computing, reportan una mejora considerable en los tiempos de respuesta de emergencias, logrando una menor exposición a peligros y una mejor gestión de los recursos. La automatización de los reportes de incidentes y la posibilidad de realizar auditorías a distancia han contribuido de gran manera al fortalecimiento del cumplimiento

normativo y a seguir mejorando la seguridad ocupacional en el ámbito minero (69).

3.3.2. Big Data y análisis predictivo

En la minería, el uso de Big Data ha representado un cambio en la manera de identificar situaciones que pueden representar un riesgo laboral. El análisis predictivo en base a un modelo Big Data permite anticipar fallos en los equipos, poner de manifiesto situaciones peligrosas y, por lo tanto, incrementar la seguridad de los trabajadores (70).

Del mismo modo, el análisis predictivo ha demostrado su utilidad en la realidad de la minería; se ha demostrado que puede reducir los incidentes laborales en un 30% mediante el análisis de grandes cantidades de datos históricos. Además, el análisis predictivo permite optimizar los procesos de mantenimiento preventivo, contribuyendo de este modo a una reducción de los fallos en la maquinaria y, por ende, a evitar los accidentes por fallos de tipo técnico (70).

Además, se han desarrollado modelos de predicción específicos que detectan tendencias en el comportamiento de la maquinaria y de los trabajadores, logrando así la mejora en la eficiencia operativa y la reducción de riesgos. La fusión del Big Data con inteligencia artificial ha permitido el desarrollo de sistemas de monitoreo autónomo que identifican patrones peligrosos y lanzan alertas preventivas antes de que una persona sufra lesiones (70).

Finalmente, esta implementación tecnológica ha sido fundamental para crear minas inteligentes, donde el análisis de datos mejora la seguridad y la productividad, además de la sostenibilidad del sector minero.

3.3.3. IoT orientado a la seguridad

Se denomina IoT el mecanismo de interconexión que dan lugar a una serie de dispositivos interconectados y a la tecnología que permite la conversación que se establece entre la nube de Internet con un dispositivo y entre dispositivos. Los chips de ordenador más baratos y la conectividad por medio de telecomunicaciones a gran ancho de banda han permitido construir cada vez un mayor número de dispositivos instalados en Internet, por ejemplo, los cepillos, las aspiradoras, los coches y las máquinas pueden incluir sensores para transportar datos que en respuesta pueden responder a una determinada utilización del dispositivo y de este modo ofrecer funciones inteligentes (71).

El IoT o Internet de las cosas conecta en cierto modo la realidad física de las cosas cotidianas con Internet. Aunque desde los años 90 los ingenieros informáticos han estado añadiendo sensores y procesadores a objetos ordinarios en la vida cotidiana, lo cierto es que el progreso fue inicialmente muy lento porque los chips eran grandes y voluminosos. Se empezaron a utilizar los chips de ordenador de baja potencia denominados etiquetas RFID para hacer un seguimiento de equipos caros. El diseño de los dispositivos informáticos fue pasando progresivamente de un tamaño grande a uno pequeño, rápido y

sofisticado y que se podían insertar fácilmente en objetos cotidianas (71).

Los costes de introducir potencia informática en objetos pequeños se han visto reducidos. Por ejemplo, la conectividad que permiten implementar las capacidades de servicios de voz como Alexa por medio de MCU de menos de 1 MB de RAM, como demostraron los interruptores de luz. Se incrementó toda una industria para llenar nuestros hogares, oficinas y lugares de trabajo de dispositivos IoT, y todos aquellos objetos que permiten transmitir datos hacia y desde Internet por sí mismos. Todos aquellos “dispositivos de computación invisibles” más la tecnología que se les atribuye en conjunto se denominan IoT (71).

Los sistemas de IoT corrientes son sistemas que recopilan y comparten datos en tiempo real. Un sistema del IoT consiste en tres partes:

Dispositivos inteligentes

Se trata de dispositivos, como una televisión, una cámara de seguridad o un equipo de ejercicio, a los que se les equipó con capacidades de cómputo. Recoge datos de su entorno, de las entradas de los usuarios o de los patrones de uso y envía los datos a través de internet. ellos los envían a su aplicación de IoT y viceversa (71).

Aplicación de IoT

Una aplicación de IoT es un conjunto de servicios y software que incrusta los datos recibidos de varios dispositivos de IoT. Los datos son procesados mediante tecnología de machine learning (ML) o

inteligencia artificial (IA) para procesar los datos y tomar decisiones. Las decisiones se comunican al dispositivo de IoT y el dispositivo de IoT responde a las entradas de forma inteligente (71).

Interfaz gráfica de usuario.

Los dispositivos de IoT o la flota de dispositivos se pueden gestionar con una interfaz gráfica de usuario. Actualmente, un ejemplo habitual sería la aplicación móvil o un sitio web que se pueden utilizar para registrar o controlar dispositivos inteligentes (71).

El componente de IoT permite integrar sensores y equipos inteligentes con los EPIs o con la maquinaria. Existen dispositivos que permiten obtener datos en tiempo real sobre las condiciones ambientales, el estado de los equipos de maquinaria o la ubicación de los trabajadores, permitiendo así actuar en situaciones de peligro (71).

Las empresas mineras que han incorporado IoT a sus operaciones han alcanzado un buen nivel de garantía de la seguridad laboral puesto que permiten la exposición de los trabajadores a situaciones de peligro gracias a una monitorización remota de los riesgos (71).

3.3.4. Inteligencia Artificial y Machine Learning

La inteligencia artificial (IA) y el machine learning lograron la automatización de procesos aprovechando la capacidad de detección de riesgos mediante algoritmos de aprendizaje automático, el cual permite identificar patrones de riesgo en tiempo real que permitiría una recomendación de medidas preventivas (72).

La minería aplica machine learning con el objetivo de trabajar sobre grandes volúmenes de información histórica obtenida que le permiten identificar tendencias o predecir situaciones de riesgo potencial. Todo esto con el fin de optimizar procesos de seguridad que permiten disminuir la probabilidad de accidentes y la exposición de los individuos a determinadas condiciones riesgosas. La IA, por otra parte, estaría en disposición de hacer uso de dispositivos IoT y sistemas de monitoreo en tiempo real para mejorar la efectividad de la detección de riesgos (72).

También, otro importante beneficio a tener en cuenta en este contexto es el uso de modelos de visión por computadora que, a partir de cámaras y sensores avanzados, podrían detectar el incumplimiento de normas de seguridad, como no usar equipo de protección personal (EPP) o la presencia de personas en zonas de riesgo. Estos sistemas pueden ofrecer alertas automáticas para corregir comportamientos inseguros en tiempo real (72).

Finalmente, y adjuntando a la inteligencia artificial y machine learning, las nuevas tecnologías están siendo implementadas con programas de mantenimiento predictivo que utilizan técnicas de machine learning para implementar rutinas de mantenimiento predictivo que permiten reducir fallos de la maquinaria y evitar accidentes provocados por falla de una parte técnica. Los patrones de desgaste de los equipos llevan a programar mantenimientos preventivos y así evitar caídas inesperadas que puedan poner en riesgo la seguridad de la operación minera (72).

En síntesis, podemos concluir que la inteligencia artificial junto con el machine learning constituyen una mejora importante en la seguridad miner en el sentido que mejoradas las predicciones frente a riesgos laborales. Su acoplamiento y uso con otras herramientas digitales permitiría ir aumentando la cultura de la prevención y crear un entorno de trabajo más seguro y eficiente.

3.3.5. Dron de Inspección

Los drones han demostrado ser una buena herramienta de inspección de condiciones peligrosas en minería sin someter a los trabajadores a riesgos y peligros. Estos dispositivos constantemente recogen datos visuales y ambientales que permiten un análisis e inspección y mejora en la supervisión de zonas de difícil acceso (73).

Adicionalmente, los drones están dotados de cámaras de gran resolución, sensores térmicos y tecnología LIDAR que resulta muy beneficiosa para la detección de estructuras inestables, zonas con densidad de gases peligrosos o fallos en la infraestructura minera. La información recogida "on time" proporciona la base de datos necesaria para la elaboración de modelos tridimensionales de las áreas inspeccionadas, un hecho que ayuda mucho a la toma de decisiones estratégicas que tengan que ver con la seguridad en la mina (73).

Otra ventaja de implementar drones en minería es la posibilidad de realizar inspecciones en los túneles y en áreas subterráneas sin poner a los trabajadores en ambientes duros e incómodos. Mediante su capacidad de autonomía de vuelo y el poder de programar vuelos

automáticos, pueden inspeccionar inmensas áreas en un cierto tiempo corto. Así pues, se hacen más eficientes las operaciones de vigilancia al mismo tiempo que se reduce el coste operativo (73).

El uso de drones en minería también ha sido fundamental para mejorar la reacción ante accidentes o emergencias dado que permite evaluar el estado de un accidente antes de enviar los equipos de rescate y se reduce así el riesgo para los socorristas. Algunas compañías han implementado drones en inteligencia artificial para poder analizar patrones en los datos y así aumentar la efectividad en los gastos de riesgos y planificación de medidas preventivas (73).

3.3.6. Aplicaciones y Software Especializado en Seguridad

El uso del software especializado en seguridad ha facilitado la automatización de reportes, capacitaciones, monitoreo del cumplimiento, etc., lo cual se ha demostrado fundamental en la minería para mejorar la comunicación interna y la respuesta a emergencias (74).

Además, este tipo de software puede ser complementado e integrado con todos los sistemas de IoT y los análisis de Big Data para mejorar la detección de riesgos y la prevención de accidentes laborales (74).

Existen incluso aplicaciones que tienen módulos de formación a través del uso del training interactivo, para garantizar así que el personal esté recibiendo formación continua sobre las normas de seguridad y las buenas prácticas. Asimismo, estas plataformas permiten a los supervisores o responsables realizar inspecciones y auditorías de seguridad a distancia y en tiempo real, lo cual lleva un aumento en la

rapidez de respuesta y por tanto mejora el cumplimiento normativo en las operaciones de las minas (74).

3.3.7. Realidad Aumentada y Realidad Virtual en Seguridad Laboral

El uso de las tecnologías de realidad aumentada (RA) y de realidad virtual (RV) supone un cambio radical en la forma en que se llevan a cabo las acciones formativas en relación a la seguridad de la minería. La RA permite la superposición de información en el entorno físico real organizativo que se está abordando, como la identificación de riesgos en el medio de los trabajadores y trabajadoras al mismo tiempo. Por su parte, la RV permite generar simulaciones inmersivas que permiten a los trabajadores entrenarse en situaciones peligrosas, pero sin riesgo real de sufrir una lesión (75).

Las empresas mineras están aplicando estas nuevas tecnologías para conseguir formar, de tal forma que las formaciones en protocolos de seguridad, la reducción de los errores humanos o la mejora del conocimiento de la situación por parte de los trabajadores sean mucho más eficaces. La práctica educativa con RA y RV también ha demostrado aumentar la retención del conocimiento hasta en un 75%, más que con las formaciones tradicionales (76).

3.3.8. Aplicaciones de Realidad Aumentada y Realidad Virtual en Seguridad Minera

Capacitación y formación:

La RA permite visualizar las instrucciones y las advertencias de seguridad in situ a través de dispositivos como cascos inteligentes y gafas de realidad aumentada.

La RV permite formar a los trabajadores a partir de simulaciones de rescate, manejo de maquinaria pesada o respuesta a emergencias, logrando reducir el tiempo de aprendizaje y aumentando la eficacia de la formación (76).

Identificación de riesgos en tiempo real:

Gracias a los dispositivos de RA, los supervisores son capaces de recibir los peligros que se presentan en su entorno directamente en su sistema por medio de alertas automáticas, obteniendo con ello una respuesta rápida y eficaz.

La integración con sensores IoT hace posible monitorizar el ambiente de trabajo con la detección de variaciones en gases nocivos, temperatura o presión (76).

Simulación de emergencia:

La RV puede reproducir situaciones de emergencia como explosiones, derrumbes o fugas de gas en un entorno seguro y de aprendizaje, pero en este caso para hacer el entrenamiento de procedimientos de evacuación y rescate (76).

Este tipo de simulación permite evaluar las capacidades de los trabajadores en condiciones de estrés y recoge información para la creación de los protocolos de respuesta ante la emergencia (76).

Mantenimiento predictivo y seguridad en maquinaria:

La RA permite la inspección de la maquinaria y de los equipos a través de instrucciones interactivas para el mantenimiento y la seguridad (76).

Los trabajadores pueden seguir guías visuales e interactuar con instrucciones para la reparación de equipamiento crítico en tiempo real de manera remota (76).

Ventajas de la RV y RA en el ámbito de la Seguridad Laboral en el Sector Minero.

Reducción de los accidentados en las empresas: A través de una mejor capacitación y una mejor detección de los riesgos, se reduce el riesgo de que sucedan.

Uso optimizado del tiempo de entrenamiento: los trabajadores pueden entrenarse en el entorno seguro sin tener que detener la operación.

Mayor personalización a entornos específicos: los programas de formación se pueden adaptar a las condiciones concretas de cada mina.

Mejor toma de decisiones: la integración con Big Data y el análisis predictivo permiten captar patrones de riesgo e impedir las actividades en riesgos antes de que suceda un accidente.

La unión de la RV, la RA, el IoT y el Big Data está transformando a la seguridad en el sector minero, mejorando el control de riesgo y la eficiencia operativa. A medida que maduren las tecnologías presentes, también cabe esperar una expansión en su adopción, en busca de un estilo de prevención más efectivo y activo en la seguridad laboral minera (76).

3.4. Beneficios y retos de la digitalización en SST

La incorporación de herramientas digitales en la SST ofrece beneficios como una reducción de incidentes, mejor toma de decisiones y optimización del cumplimiento normativo, pero también tiene retos como la resistencia al cambio, inversión en tecnología y capacitación de recursos humanos (77).

Entre las ventajas más destacadas que ofrece la digitalización en la Seguridad y Salud en el Trabajo (SST), se encuentra la posibilidad de la identificación de riesgos en tiempo real a partir de sensores IoT (Internet of Things) y sistemas de análisis de datos. Esta deriva a la posibilidad de que las compañías puedan anticipar incidentes y con ello mejorar la prevención de accidentes. De igual manera, la digitalización permite la automatización de procesos, como por ejemplo, el de la generación de reportes, la comunicación interna o la formación de los trabajadores, lo que implica gestionar mejor el tiempo y los recursos (77).

Un aspecto positivo lo constituye la mejora en la toma de decisiones, a partir de datos concretos y en tiempo real. Los algoritmos de inteligencia artificial pueden procesar grandes volúmenes de información y, de este modo, identificar patrones de riesgo y proponer medidas preventivas. Aumentar la seguridad laboral, a su vez, repercute en la mejora de la eficiencia operativa y la sostenibilidad empresarial (77).

Sin embargo, la digitalización de la SST también ofrece importantes retos.

Uno de estos retos lo constituye la resistencia al cambio de los trabajadores y directivos que pueden ver la tecnología como un riesgo para las costumbres

tradicionales de los métodos de trabajo. La adopción de nuevas herramientas requiere adecuar la cultura dentro de las organizaciones, esto es, contar con estrategias de sensibilización y formación adecuadas.

Por otra parte, la puesta en práctica de la digitalización supone una fuerte inyección de capital en compras de infraestructura, software y formación, que muchas empresas, las pequeñas, sobre todo, se verán posiblemente incapaces de asumir. También es importante que la protección de los datos de la información recolectada esté garantizada, en la medida en que ya sabemos que la propia digitalización puede representar un riesgo en cuanto a la protección de la información y la privacidad de los trabajadores y trabajadoras (77).

En conclusión, la digitalización de la SST supone un avance hacia la seguridad y salud en el trabajo, a la vez que representa una fuerte inyección de capital debido a la necesidad de resolver retos de tipo técnico, económico y cultural. Con un buen plan de acción, las empresas pueden maximizar la información y convertir las nuevas tecnologías en una ventaja para garantizar una mayor seguridad y eficiencia desde el lugar de trabajo.

3.5. Efecto de la Optimización de Datos sobre la Seguridad en la Minería

Con la aplicación de las herramientas tecnológicas en el sector minero, se obtienen grandes beneficios, siendo los más representativos los que se relacionan (77).

Reducción de los accidentes de trabajo: La detección preventiva de situaciones de riesgo permite reducir los accidentes y se traduce en bienestar de la persona trabajadora.

Mejora de la eficiencia operativa: La automatización y la digitalización de los procesos permiten gestionar la seguridad de forma más eficaz.

Adecuación normativa: Realizar la adecuación a las regulaciones internacionales es una de las mejoras que se logran.

Decisiones basadas en datos: Se puede gestionar de no sólo de manera más eficaz, sino también fundamentada sobre las evidencias precisas.

3.6. Tecnologías clave para la supervisión y gestión de los procesos mineros

Las tecnologías son un elemento clave para el control y el manejo de los procesos mineros. Desde los sensores y el monitoreo remoto, hasta la automatización de los equipos y la analítica, a continuación, se verán las formas en que las tecnologías aumentan la efectividad y la precisión de las operaciones mineras:

- **Sensores y monitoreo remoto:** los sensores son una fuente de información permanente, o en tiempo real, sobre datos importantes (temperatura, presión, nivel de agua, etc.). Permiten el control adecuado, y la rapidez de reacción, ante las condiciones variables de la mina (78).
- **Automatización de los equipos:** la automatización de la maquinaria y de los equipos permite un control más preciso de las operaciones mineras. Desde coches autónomos hasta sistemas automatizados de perforación y voladura, etc. (78).
- **Analítica:** el análisis, basado en los grandes volúmenes de datos generados en la mina, conduce a la identificación de patrones, a la optimización de los procesos y a la enunciación de decisiones informadas. Mejora la eficiencia de los procesos y la planificación de la producción (78).

- **Sistemas de gestión integrados:** la integración de sistemas de gestión centralizados permite un control más sincronizado del seguimiento de toda la actividad y de los recursos de la mina, como así también facilitan las decisiones y la optimización de los procesos (78).

3.7. Contribución de la automatización y la digitalización en el sector minero.

La automatización y la digitalización están revolucionando para bien la industria de la minería. Desde una mejora de la seguridad en el trabajo hasta el incremento de la productividad, la optimización de la eficiencia en cuanto al consumo de energía, así como también la disminución del impacto medioambiental (79).

Seguridad: la automatización puede contribuir, al sustituir actividades peligrosas llevadas a cabo por personas con equipos y sistemas automáticos, a disminuir la probabilidad de accidentes y de lesiones en el trabajo, lo cual ayudará a la mejora de la seguridad en el sector minero (79).

Productividad: la automatización conlleva una mayor eficiencia en las operaciones mineras gracias a que se suprimen los errores humanos y se optimizan los procesos. Ello revierte en un aumento de la productividad, así como también de la capacidad de producción de las canteras (79).

Eficiencia energética: la implementación de tecnologías más avanzadas y de sistemas integrados de gestión hace posible optimizar los suministros energéticos en la explotación minera. La cual ayuda a la disminución del uso de la energía y de los costes asociados, así como también a reducir el impacto medioambiental (79).

Cuidados del medioambiente: la automatización y la digitalización pueden ayudar a minimizar el impacto medioambiental de la industria minera. Por optimizar los procesos se genera menos residuos, se llevan a cabo unas gestiones de los recursos más eficientes y se reduce la huella medioambiental de los trabajos (79).

3.8. Factores que fomentan la automatización en la minería

La automatización en la minería está sustentada por factores que fomentan su incremento y adopción. Desde los avances de las tecnologías hasta el mejoramiento de la rentabilidad y la eficiencia, la atención a la demanda de seguridad laboral y la competitividad del mercado (80).

A continuación, expondremos cómo estos factores fomentan el crecimiento y la adopción de la automatización en la minería.

Avances tecnológicos: El avance y disponibilidad de las tecnologías avanzadas disponibles como la inteligencia artificial, las últimas tecnologías en Internet de las Cosas, la robótica y el advanced data analytics han hecho posible una automatización más efectiva y competitiva en el sector de la minería (80).

Mejora de la rentabilidad y eficiencia: La automatización proporciona una mejora de rendimiento económico y de la eficiencia en las operaciones mineras posibilitando la disminución de los costes, el aumento de la productividad y la optimización del uso de los recursos (80).

Demanda de seguridad laboral: la seguridad laboral es un aspecto a considerar en el sector de la minería. La automatización permite sustituir

tareas peligrosas que realizan las personas, sustituyéndolas por sistemas y equipos automatizados, lo que fomenta un entorno laboral más seguro (80).

Competitividad y demanda del mercado: La automatización puede ayudar a las empresas mineras a seguir siendo competitivas en un exigente mercado global. La mejora de la eficiencia, la productividad y la calidad de las operaciones mineras a través de la automatización es una exigencia tanto de los clientes como de los inversores (80).

3.9. Clasificación de las Herramientas Digitales:

Plataformas de Sistema de Gestión Documental

Las plataformas del sistema de gestión documental son las que facilitan el manejo de toda la documentación relacionada con la seguridad laboral; desde la información de los informes de incidentes a las auditorías y los registros de seguridad. Estas herramientas son imprescindibles para facilitar la recopilación y gestión de datos en tiempo real. Un claro ejemplo son SharePoint y Google Workspace, que poseen plataformas en la nube (80).

Tableros de Control

Los tableros de control permiten visualizar las herramientas de forma representativa de datos en tiempo real, como son las operaciones de la mina, la seguridad del personal, las condiciones de los instrumentos y el estado del medio ambiente. Los tableros de control más comunes son los de las plataformas de Big Data e IoT, que sirven para monitorizar la evolución de los indicadores de seguridad en una única vista (80).

Aplicaciones Móviles

Las aplicaciones móviles permiten al trabajador y al supervisor acceder la información sobre seguridad desde cualquier ubicación, lo que ayuda en la comunicación, gestión de incidentes y toma de decisiones en el campo. Las aplicaciones móviles más utilizadas son SafetyCulture y GoCanvas (80).

3.10. Comparación de los pros y contras:

Plataformas de Sistema de Gestión Documental

Pros:

Ayuda con la centralización de la documentación.

Documentos y datos pueden ser fácilmente recuperados y accedidos.

Reduce la posibilidad de error humano, lo que aumenta el flujo de trabajo administrativo.

Contras:

Requiere capacitar al personal para una implementación eficiente.

Puede causar sobrecarga si no está bien integrado con otros sistemas.

Tableros de Control

Ventajas:

Permiten monitorear en tiempo real.

Ayudan a identificar patrones de riesgos para tomar decisiones anticipadas.

Se integran fácilmente con otras tecnologías como IoT y Big Data.

Desventajas:

Necesitan infraestructura tecnológica robusta.

Puede ser costoso de implementar y mantener.

Aplicaciones Móviles

Ventajas:

Acceso remoto a información de seguridad.

Mejora la comunicación entre empleados y sus supervisores.

Facilita la recopilación de datos en el campo.

Desventajas:

Dependencia de la cobertura móvil o de internet.

Los dispositivos móviles pueden ser vulnerables a daños en entornos de trabajo duros.

3.11. La herramienta más adaptada en el contexto minero y de mantenimiento predictivo:

Una plataforma de gestión documental es la más apropiada para un contexto minero y de mantenimiento predictivo, ya que puede integrar toda la documentación relacionada con seguridad laboral y permitir su actualización en tiempo real. Su vinculación con otros dispositivos digitales como los tableros de control y las aplicaciones móviles se puede acceder de forma más granulada, lo que aumenta la precisión de la información fundamental para la toma de decisiones. Esta herramienta también contribuye en el control de los riesgos y mejora la efectividad en el manejo de las emergencias, que es vital en el entorno crítico de la minería (80).

La integración de herramientas del IoT, Big Data e incluso IA, permite un avance significativo en la optimización de las operaciones de mantenimiento predictivo. La seguridad operativa disminuye los riesgos al realizar un análisis predictivo de los equipos para prever fallos.

3.12. Consideraciones finales

El empleo de sistemas que se han demostrado como válidos para la obtención de datos por parte de los sistemas de gestión de procesos es cada vez más importante para que la toma de decisiones en tiempo real y las previsiones futuras sean las correctas para las empresas mineras (80).

Los datos avanzados y los análisis constituyen verdadero valor añadido para las operaciones mineras en tanto que le permiten observar obstáculos y advertir en qué puntos podría haber problemas en un futuro próximo y así poder evitarlos (80).

Esta obtención de datos a través de sensores permite la captación de datos, a la vez que la generación de informaciones permite que las empresas tomen decisiones de manera más rápida e informado para ayudarles a la aglutinación de operaciones eliminando las ineficiencias (80).

El aforismo que es "la información es el poder" es cierto cuando se aplica a la industria minera. Si la dirección recibe información exacta y en tiempo real acerca de lo que ocurre con sus operaciones, puede llevar las riendas de su rendimiento. Esto resulta útil especialmente para detectar cuándo puede haber el fallo de las máquinas antes de que suceda esto, a su vez que permite averiguar la causa raíz, evitar desprevénidos tiempos de paro y ahorrar mucho tiempo y dinero a las empresas (80).

Aportar a las empresas información orientativa de la localización de los equipos de operación también ayuda a eliminar cuellos de botella respecto estos, lo cual se traduce en menores tiempos de inactividad, puede incluir el

uso de tecnologías como el tráfico y, en concreto, sistemas de gestión de flotas (80).

Además de lograr la eficiencia cuando se trata de las máquinas móviles, los datos y los análisis forman una parte integral en cuanto a poder identificar patrones y formaciones geológicas e incluso los métodos en el establecimiento del valor del mineral y de los métodos de extracción.

3.13. Conclusiones

La utilización de herramientas tecnológicas para la optimización de los datos en la seguridad minera resulta fundamental para la prevención de riesgos. La buena implementación de las tecnologías permite mejorar la seguridad laboral y la optimización de la gestión de la información en las empresas de mantenimiento predictivo. La digitalización no solo incrementa la eficiencia, sino que, también termina siendo un factor clave en la mejora de la cultura de seguridad en el interior de las organizaciones. La continuidad de la evolución digital en el tiempo, la integración de ésta en los sistemas de seguridad laboral terminará siendo un argumento determinante en la consecución de disminuir los accidentes laborales, mejorar el estado de la salud ocupacional o generar un entorno de trabajo seguro para todos los trabajadores.

Por otro lado, automatizar procesos e integrar sistemas digitales hacen posible la comunicación entre los diferentes niveles organizativos de tal forma que se facilita una respuesta rápida y directa a los incidentes producidos. Ello, a su vez, se traduce en una reducción del número de

accidentes laborales, así como un mejor estado de salud ocupacional y bienestar de los trabajadores.

Por último, los sistemas informáticos y las herramientas digitales permiten generar informes y llevar a cabo auditorías sobre el estado de la seguridad laboral en tiempo real, de forma que las organizaciones puedan ceñirse a normativa de seguridad y a estándares nacionales e internacionales. Un incremento de la eficacia en la comunicación de este tipo también implica un ahorro en costes asociados a la reducción del número de incidentes laborales y sanciones, así como elevar el prestigio de la empresa en el sector minero.

En conclusión, la evolución digital en la gestión de la seguridad laboral en el sector minero es un proceso que es inevitable y a la vez, necesario. La implementación de tecnologías no sólo reviste la relevancia de mejorar la eficacia operativa; al igual que la anterior, permite unas condiciones de trabajo más seguras y sostenibles tanto para trabajadores como para la empresa.

IV. CONCLUSIONES

La investigación que se realizó permitió verificar el impacto provocado por las herramientas tecnológicas dentro de la optimización de datos de los sistemas de gestión de la seguridad en el trabajo en el sector minero, con especial mención de las empresas que se dedican al mantenimiento predictivo de los activos.

Respecto al objetivo general, se han identificado diferentes herramientas digitales que mejoran la recolección, procesamiento y análisis de datos en los sistemas de gestión de la seguridad en el trabajo, identificando tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), el Big Data y la Inteligencia Artificial y los sistemas de gestión integrados como fundamentales para la automatización de la mejora de los procesos de seguridad, disminuyendo los errores provocados por los trabajadores y optimizando la eficacia operativa.

En lo que respecta al primero de los objetivos específicos, se expusieron las características básicas de estos medios tecnológicos, resaltando su capacidad para recoger datos en tiempo real, su compatibilidad con materiales y dispositivos muy variados, su aptitud para realizar análisis predictivos de riesgos y sus informes automatizados; cualidades que otorgan a las empresas mineras mejores criterios para tomar decisiones y adoptar acciones preventivas a su debido tiempo.

Por último, ante el segundo de los objetivos específicos, se identificaron las características básicas de los datos del sistema de gestión de seguridad laboral que pueden mejorarse gracias al uso de tecnologías, dados que los registros de incidentes, la evaluación de riesgos, el seguimiento de las condiciones ambientales, una atención a la utilización de Equipos de Protección Personal

(EPP) y la capacitación del personal en cuestiones de seguridad. La optimización de estos datos facilita la identificación de patrones de riesgo, contribuye a la reducción de accidentes laborales y mejora la toma de decisiones estratégicas para reforzar la seguridad en el entorno minero.

V. RECOMENDACIONES

Es recomendable que las empresas de mantenimiento predictivo de la actividad minera implementen paulatinamente herramientas digitales innovadoras como, por ejemplo, sistemas de gestión integrados, IoT, Big Data e Inteligencia Artificial que favorezcan la obtención, el tratamiento y el análisis de datos en la gestión de seguridad laboral para mejorar la toma de decisiones y disminuir riesgos laborales.

Se recomienda una adecuada implementación de las herramientas tecnológicas requiere la capacitación del personal para hacer uso de estas tecnologías digitales. Por ello se recomienda implementar planes de formación sobre el manejo de software de la gestión de seguridad, el análisis datos y la lectura e interpretación de informes que generan estas tecnologías.

Las empresas deben desarrollar sistemas de monitoreo de seguridad en tiempo real para poder valorar las condiciones de seguridad en el entorno laboral. La exposición a datos y la utilización de plataformas de análisis de datos e IoT permitirá determinar situaciones de riesgo de manera oportuna, contribuyendo a la disminución de incidentes y mejorando la seguridad ocupacional.

Se recomienda la automatización de aquellos procesos en la gestión de la seguridad que son primordiales, por ejemplo, los procesos de registro de incidentes, los procesos de evaluación de riesgo, el control del uso de Equipos de Protección Personal (EPP), etc. Aumentará la eficacia de la optimización de los datos, minimizará errores humanos y favorecerá la eficacia de la gestión de la seguridad.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Martínez J, Ruiz F. Automatización en la gestión de seguridad laboral. *Occup Saf Eng J.* 2020;18(3):45-52.
2. OECD. *Digital transformation in industrial safety.* Paris: OECD Publishing; 2020.
3. Sánchez R, Torres P. Retos en la seguridad ocupacional en minería. *Mining Ind Saf J.* 2018;5(2):12-20.
4. Medina R. Plataformas digitales para la gestión laboral. *J Safety Sci.* 2021;29(5):215-223.
5. Pérez F, Ramírez S. Digitalización y SGST en minería. *SciTech Mining.* 2021;12(1):56-63.
6. Silva G, Fuentes L. Eficiencia en el uso de herramientas tecnológicas en minería. *Mining Saf Rev.* 2017;4(3):89-97.
7. Hernández J, Bravo C. Innovación tecnológica en seguridad laboral. *Tech Innov Manag J.* 2022;15(7):101-115.
8. Gómez M, López H. Optimización de sistemas de gestión mediante tecnología. *Ind Digit Tech J.* 2019;6(4):34-42.
9. García V, Montoya E. Responsabilidad social corporativa y seguridad en el trabajo. *Corp Soc Respons J.* 2020;9(1):20-30.
10. World Health Organization (WHO). *Occupational health and safety strategies.* Geneva: WHO; 2021. Available from: www.who.int.

11. Gómez-Pérez L, Ortiz A. Seguridad y salud en la minería: Análisis de casos prácticos. *Global Mining Safety Studies*. 2020;14(2):99-113.
12. Muñoz J, Delgado A. Gestión avanzada de seguridad ocupacional. *J Ind Digit Safety*. 2023;21(1):14-29.
13. Torres P, Jiménez M. Minería y digitalización en la región andina. *Mining Digit Res*. 2021;4(6):101-119.
14. WHO. Best practices in mining safety. Geneva: WHO; 2020.
15. Núñez G, Fernández H. Tecnologías emergentes para seguridad en minería. *Emerg Ind Tech*. 2020;19(3):25-37.
16. Paredes L, Soto C. Implementación de SGST en minería. *Latin Am Saf Eng J*. 2019;8(2):67-78.
17. Méndez A, Castro R. Supervisión efectiva en minería: un enfoque tecnológico. *Mining Innov Rev*. 2021;5(1):12-25.
18. Rodríguez E, Vega F. Análisis de la sobrecarga laboral en SSOMA. *Occup Health Rev*. 2018;3(5):89-98.
19. Blanco M, Ochoa R. Herramientas digitales para optimización del SGST. *J Dig Min Saf*. 2021;10(2):35-48.
20. Gutiérrez A, Rivas P. Digitalización en el sector minero: Retos y oportunidades. *Mining Fut Rev*. 2020;7(4):14-22.
21. López A, Navarro S. Estrategias de automatización en seguridad laboral. *Ind Safety Dig*. 2022;11(6):71-84.
22. Calderón B, Ruiz T. Innovaciones tecnológicas para prevención de riesgos. *Risk Manage J*. 2019;12(3):44-60.

23. Smith J, Lee K. Real-time data management in occupational safety. *Int J Saf Sci.* 2022;18(8):88-102.
24. Jiménez F, Torres R. Automatización en la gestión de riesgos: un enfoque práctico. *Journal of Safety and Productivity.* 2020;12(5):223-31.
25. Martínez JD, Ruiz CE. Automatización de procesos en la gestión de seguridad y salud ocupacional: beneficios y desafíos. *Journal of Occupational Health.* 2020;18(3):123-32.
26. Organización Internacional del Trabajo (OIT). Prevención de accidentes laborales en la minería: un enfoque integrado. Informe Técnico. Ginebra; 2022.
27. Gómez SA, Herrera L. Digitalización de la minería: una herramienta clave para la sostenibilidad y seguridad. *Mining Science.* 2021;34(6):456-70.
28. Másmela Olivar R, Jiménez Rodríguez EA, Rozo Moreno PA. Herramientas digitales para la seguridad y salud en el trabajo: revisión sistemática. *Publ Investig [Internet].* 2021 Nov 20 [cited 2025 Jan 15];15(4). Available from: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/article/view/5601>.
29. Ballester Andrés JE, Torregrosa Najjar VJ. Seguridad PRL, herramienta en línea para organizar la coordinación de actividades empresariales basada en un modelo "cloud computing": generador de informes y agenda digital. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Zaragoza; Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia [Internet]. 2018 [cited 2025 Jan 15]. Available from: <https://www.riarte.es/handle/20500.12251/414>.

30. Castillo Y, Otavo Camargo DA, Rivera Solano HL. Diseño de software de seguridad y salud en el trabajo basado en las normas OHSAS 18001 Decreto 1072. Bogotá: Universidad Cooperativa de Colombia; 2019.
31. Díaz M. La negociación colectiva como medio fundamental de reconocimiento y defensa de las nuevas realidades derivadas de la industria 4.0. *Relac Laborales Derecho Empleo* [Internet]. 2018 [cited 2025 Jan 15];6(1). Available from: http://ejcls.adapt.it/index.php/rlde_adapt/article/view/557.
32. Fontcuberta L. Noticias desde la Agencia Europea para la Salud y la Seguridad en el Trabajo. *Arch Prev Riesgos Labor*. 2020;23(1):106-7.
33. Guavita J. Diseño de un sistema de información para el registro de no conformidades del SG SST aplicables al sector hotelero [thesis]. Bogotá: Corporación Universitaria Minuto de Dios; 2018.
34. Henao S. Estrategia de comunicación para la implementación de un sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo [thesis]. Cali: Universidad del Valle; 2016.
35. Medina SN. Diseño de una aplicación móvil para la gestión de los riesgos laborales para una compañía de entretenimiento [thesis]. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas; 2019.
36. Murcia J, Sanmiguel Amaya HJ. Diseño e implementación del sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo de acuerdo al Decreto 1072 de 2015 para la empresa Gama Colombia SAS [thesis]. Bogotá: Universidad Santo Tomás; 2017.

37. Observatorio Europeo de Riesgos. Estudio prospectivo sobre los riesgos nuevos y emergentes para la seguridad y salud en el trabajo asociados a la digitalización en 2025 [Internet]. Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo; 2018 [cited 2025 Jan 15]. Available from: <https://osha.europa.eu/es/publications/summary-foresight-new-and-emerging-occupational-safety-and-health-risks-associated-digitalisation-2025/view>.
38. Rey M, Gómez J, López A, Fernández J. Virtual Fence System Based on IoT Paradigm to Prevent Occupational Accidents in the Construction Sector. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(13):6839. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18136839>.
39. Salah K. *The Era of Internet of Things*. Springer, editor. Switzerland; 2019. Available from: https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES.
40. Celik A, Salama K, Eltawil A. The Internet of Bodies: A Systematic Survey on Propagation Characterization and Channel Modeling. *IEEE Internet Things J*. 2022;9(1):321-45. DOI: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.12912752.v2>.
41. Barker TT. Finding Pluto: An Analytics-Based Approach to Safety Data Ecosystems. *Saf Health Work*. 2021;12(1):1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2020.09.010>.
42. Khan M, Khalid R, Anjum S, Khan N, Cho S, Park C. Tag and IoT based safety hook monitoring for prevention of falls from height. *Autom Constr*. 2022;136(2):104153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104153>.
43. Kitchenham B, Pretorius R, Budgen D, Brereton OP, Turner M, Niazi M, et al. Systematic literature reviews in software engineering – A tertiary study. *Inf*

Softw Technol. 2010;52(8):792-805. DOI:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.infsof.2010.03.006>.

44. Wan B, Muhammad R. An Event Reporting and Early-Warning Safety System Based on the Internet of Things for Underground Coal Mines: A Case Study. *Appl Sci.* 2017;7(9):925. DOI: <https://doi.org/10.3390/app7090925>.
45. Arenas Campos GE, Díaz Muñoz GA, Ordoñez Sánchez BL, Triana Cárdenas PI. Diseño de herramienta tecnológica bidireccional para el sistema de gestión, seguridad y salud en el trabajo SG-SST. (Tesis de grado). Corporación Universitaria Minuto de Dios, Bogotá.
46. Ballester Andrés JF, Torregrosa Najjar VJ. Seguridad PRL, herramienta on line para organizar la coordinación de actividades empresariales basado en un modelo "cloud computing", generador de informes y agenda digital. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Zaragoza. Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia. <https://www.riarte.es/handle/20.500.12251/414?show=full>.
47. Castillo Melo YD, Otavo Camargo DA, Rivera Solano HL. Diseño de software de seguridad y salud en el trabajo basado en las normas OHSAS 18001 Decreto 1072. Universidad Cooperativa de Colombia, Bogotá.
48. Díaz JM. La negociación colectiva como medio fundamental de reconocimiento y defensa de las nuevas realidades derivadas de la industria 4.0. *Relaciones Laborales y Derecho del Empleo*, 6(1). http://ejcls.adapt.it/index.php/rlde_adapt/article/view/557.
49. Fontcuberta L. Noticias desde la Agencia Europea para la Salud y la Seguridad en el Trabajo. *Archivos de Prevención de Riesgos Laborales*, 23(1), 106-107.

50. Guavita Moreno J. Diseño de un sistema de información para el registro de no conformidades del SG SST aplicables al sector hotelero. (Tesis de grado). Corporación Universitaria Minuto de Dios, Bogotá.
51. Henao Osorio S. Estrategia de comunicación para la implementación de un sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo. (Tesis de grado). Universidad del Valle, Cali.
52. Martin Medina SN. Diseño de una aplicación móvil para la gestión de los riesgos laborales para una compañía de entretenimiento. (Tesis de grado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
53. Murcia Amorocho J, Sanmiguel Amaya HJ. Diseño e implementación del sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo de acuerdo al Decreto 1072 de 2015 para la empresa Gamac Colombia SAS. (Trabajo de grado). Universidad Santo Tomás, Bogotá.
54. Observatorio Europeo de Riesgos (2018). Estudio prospectivo sobre los riesgos nuevos y emergentes para la seguridad y salud en el trabajo asociados a la digitalización en 2025. Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo. <https://osha.europa.eu/es/publications/summary-foresight-new-and-emerging-occupational-safety-and-health-risks-associated-digitalisation-2025/view>.
55. Riaño M, Navarrete E, Valero I. Evolución de un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo e Impacto en la Accidentalidad Laboral: Estudio de Caso en Empresas del Sector Petroquímico en Colombia. Cienc

- Trab. 2016;55:68-72. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-24492016000100011>.
56. Leso V, Fontana L, Iavicoli I. The occupational health and safety dimension of Industry 4.0. *Med Lav.* 2018;109(5):327-38. DOI: <https://doi.org/10.23749/mdl.v109i5.7282>.
57. Bavaresco R, Arruda H, Rocha E, Barbosa J, Li G. Internet of Things and occupational well-being in industry 4.0: A systematic mapping study and taxonomy. *Comput Ind Eng.* 2021;161(9):107670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107670>.
58. Lu H, Guo L, Azimi M, Huang K. Oil and Gas 4.0 era: A systematic review and outlook. *Comput Ind.* 2019;111:68-90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.06.007>.
59. Meng X, Chan A. Current States and Future Trends in Safety Research of Construction Personnel: A Quantitative Analysis Based on Social Network Approach. *Int J Environ Res Public Heal.* 2021;18(3):883. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18030883>.
60. Barata J, Rupino P. Safety Is the New Black: The Increasing Role of Wearables in Occupational Health and Safety in Construction. En: Springer, editor. 22nd International Conference, BIS 2019. Sevilla, Spain; 2019. p. 526.
61. Tabatabaee S, Mohandes S, Rabnawaz R, Mahdiyar A, Arashpour M, Zayed T, et al. Investigating the Barriers to Applying the Internet-of-Things-Based Technologies to Construction Site Safety Management. *Int J Environ Res Public Heal.* 2022;19(2):868. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19020868>.

62. Rey M, Gómez J, López A, Fernández J. Virtual Fence System Based on IoT Paradigm to Prevent Occupational Accidents in the Construction Sector. *Int J Environ Res Public Heal.* 2021;18(13):6839. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18136839>.
63. Salah K. *The Era of Internet of Things*. Springer, editor. Switzerland; 2019.
64. Kitchenham B, Pretorius R, Budgen D, Brereton OP, Turner M, Niazi M, et al. Systematic literature reviews in software engineering – A tertiary study. *Inf Softw Technol.* 2010;52(8):792-805. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.infsof.2010.03.006>.
65. Wan B, Muhammad R. An Event Reporting and Early-Warning Safety System Based on the Internet of Things for Underground Coal Mines: A Case Study. *Appl Sci.* 2017;7(9):925. DOI: <https://doi.org/10.3390/app7090925>.
66. Madahana M, Nyandoro O, Ekoru J. Intelligent comprehensive occupational health monitoring system for mine workers. En: *IFAC PapersOnLine*. Elsevier Ltd;2020. p. 16494-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.751>.
67. Jacksha R, Raj K. Assessing the Feasibility of a Commercially Available Wireless Internet of Things System to Improve Conveyor Safety. *Mining, Metall Explor.* 2021:567-74. DOI: <https://doi.org/10.1007%2Fs42461-020-00325-3>.
68. Sinha A. IT-enabled safety management framework in Indian mines. *Jmmf.* 2022 [acceso 04/06/2023];69(12):439-44. Disponible en: <https://www.informaticsjournals.com/index.php/jmmf/article/view/29378>.

69. Rob A, Sharifuzzaman S. The Role of IoT in Digitalizing Mining Sector of Bangladesh. En: 5th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT) Military Institute of Science and Technology (MIST). IEEE; 2021.
70. Jha A, Verburg A, Tukkaraja P. Internet of Things e Based Command Center to Improve Emergency Response in Underground Mines. Saf Health Work. 2022;13(1):40-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2021.10.003>
71. Singh N, Kumar V, Chaudhary G, Kaluri R, Victor N, Lakshmana K. IoT enabled HELMET to safeguard the health of mine workers. Comput Commun. 2022;193(6):1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.06.032>.
72. Yang X, Yu Y, Shirowzhan S, Li H. Automated PPE-Tool pair check system for construction safety using smart IoT. J Build Eng. 2020;32(5):101721. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101721>.
73. Thirugnanasammandamoorthi P, Choi J. Improvements on Integrated Health and Safety Management System based on Wi-Pose to increase Productivity. In: 2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). IEEE. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTC52510.2021.9620868>.
74. Ramesh G, Kumar A, Khan M, Kiran G, Singh B. Electronic Sniffing Mask-A Smart Drainage Worker Safety System. En: International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering. 2021. p. 674-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/icacite51222.2021.9404751>.

75. Seong S, Park S, Ahn YH, Kim H. Development of an integrated fatigue measurement system for construction workers: a feasibility study. *BMC Public Health*. 2022;22(1):1-12. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12889-022-13973-5>.
76. Kaupins G, Coco M. Perceptions of Internet-of-Things Surveillance by Human Resource Managers. *SAM Adv Manag J*. 2017 [acceso 25/06/2023];82(2):53-68. Disponible en: <https://bit.ly/4ea0M7K>.
77. Marques G, Pitarma R. mHealth: Indoor Environmental Quality Measuring System for Enhanced Health and Well-Being Based on Internet of Things. *Sens Actuator Networks*. 2019;8(3):43. DOI: <https://doi.org/10.3390/jsan8030043>.
78. Ayala Orihuela GG, Palacios Parillo FY. Herramientas de Gestión para la Optimización del Minado Subterráneo. *Rev. ciencia y tecn [Internet]*. 17 de septiembre de 2024 [citado 13 de marzo de 2025];20(3):11-22. Disponible en: <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/PGM/article/view/6051>.
79. Bastidas M, Jiménez Y. Optimización de Residuos Mineros de Carbón para el Mejoramiento de Suelos Viales. *Rev Inf Tecnol [Internet]*. 2019 [citado el 12 de marzo de 2025]; Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000400249>.
80. Canahua N. Implementación de la metodología TPM-Lean Manufacturing para mejorar la eficiencia general de los equipos (OEE) en la producción de repuestos en una empresa metalmecánica. *Ind Data [Internet]*. 2021 [citado el 12 de marzo de 2025]; 24(1):49-76. <https://doi.org/10.15381/idata.v24i1.18402>.