ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.1569

Evaluation Model of Work Fatigue Causes in Underground Mining Drivers Using the PDCA Cycle

Vilchez-Guerrero, Carlos Jeanfranco[1]; Diaz-Huaina, Guillermo Nicanor [2]; Vasquez-Olivera, Yaneth Charito [3]; Raymundo-Ibañez, Carlos[4]

[1,2,3,4]Ingeniería de Gestión Minera, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru, *u201815524@upc.edu.pe, pcgmgdia@upc.edu.pe, pcgmyvas@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe*

***Abstract*– Work fatigue is a critical risk factor in underground mining, particularly among transport drivers, due to long working hours, lack of sleep, and the monotony of routes. These factors compromise worker safety and operational efficiency. To address this issue, an occupational health and safety management system was designed using the PDCA cycle (Plan, Do, Check, Act), which provides a structured framework to identify and mitigate fatigue-related risks. In the context of the Ticrapo mining project, located in Huancavelica, Peru, strategies such as scheduled breaks, task rotation, and continuous monitoring of drivers' conditions were implemented. These actions, supported by surveys and historical incident analyses, allowed for the prioritization of critical areas and adjustments to safety measures. As a result, significant reductions in fatigue-related incidents and improvements in drivers' working conditions were achieved. This management model not only enhances safety at the Ticrapo mining project but also offers a replicable approach for other mining operations facing similar challenges, contributing to the sector's sustainability and productivity.**

***Keywords*—Occupational safety, Work fatigue, PHVA cycle, Underground mining, Transport drivers.**

Modelo de Evaluación de las Causas de la Fatiga Laboral en Conductores de Minería Subterránea Utilizando el Ciclo PDCA

Vilchez-Guerrero, Carlos Jeanfranco[1]; Diaz-Huaina, Guillermo Nicanor [2]; Vasquez-Olivera, Yaneth Charito [3]; Raymundo-Ibañez, Carlos[4]
[1,2,3,4]Ingeniería de Gestión Minera, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru, *u201815524@upc.edu.pe, pcgmgdia@upc.edu.pe, pcgmyvas@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe*

Abstract*– La fatiga laboral es un factor de riesgo crítico en la minería subterránea, especialmente entre los conductores de transporte, debido a las largas jornadas de trabajo, la falta de sueño y la monotonía de las rutas. Estos factores comprometen la seguridad de los trabajadores y la eficiencia operativa. Para abordar este problema, se diseñó un sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional utilizando el ciclo PDCA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar), el cual proporciona un marco estructurado para identificar y mitigar los riesgos relacionados con la fatiga. En el contexto del proyecto minero Ticrapo, ubicado en Huancavelica, Perú, se implementaron estrategias como pausas programadas, rotación de tareas y monitoreo continuo de las condiciones de los conductores. Estas acciones, respaldadas por encuestas y análisis históricos de incidentes, permitieron priorizar áreas críticas y ajustar las medidas de seguridad. Como resultado, se lograron reducciones significativas en los incidentes relacionados con la fatiga y mejoras en las condiciones laborales de los conductores. Este modelo de gestión no solo mejora la seguridad en el proyecto minero Ticrapo, sino que también ofrece un enfoque replicable para otras operaciones mineras que enfrentan desafíos similares, contribuyendo a la sostenibilidad y productividad del sector.

Palabras clave —Seguridad ocupacional, Fatiga laboral, Ciclo PHVA, Minería subterránea, Conductores de transporte.

I. INTRODUCCIÓN

La fatiga laboral es un estado de agotamiento físico, mental o emocional que afecta negativamente el desempeño y la seguridad de los trabajadores, especialmente en la minería subterránea. Factores como largas jornadas laborales, entorno minero y monotonía en las tareas incrementan significativamente este riesgo. En el proyecto minero Ticrapo, ubicado en el departamento de Huancavelica, Perú, estos desafíos son particularmente evidentes debido a las condiciones extremas del entorno y las demandas operativas. Las condiciones extremas de trabajo, sumadas a la geografía montañosa y el aislamiento de la mina, exponen a los conductores de transporte a riesgos elevados, donde la fatiga laboral es uno de los principales factores que contribuyen a la ocurrencia de incidentes.

En investigaciones recientes [1], estudios recientes destacan que más del 50% de los trabajadores mineros experimentan altos niveles de fatiga, afectando su capacidad de atención, tiempos de reacción y toma de decisiones, lo que incrementa la probabilidad de accidentes. Además, las investigaciones han identificado que turnos laborales prolongados, posturas incómodas y estrés ambiental son las principales causas de la fatiga, subrayando la necesidad de estrategias específicas para su gestión. Además, se ha observado que el 54.55% de los trabajadores en minería subterránea presentan niveles elevados de fatiga [2], siendo más comunes en aquellos con más de cinco años de antigüedad y jornadas laborales superiores a 12 horas. Estos hallazgos resaltan la importancia de abordar la fatiga como un factor crítico para mejorar tanto la seguridad como la productividad en la minería.

Por otro lado, los avances tecnológicos recientes han permitido la implementación de métodos de detección de fatiga basados en señales fisiológicas (2023) [3] Se ha desarrollado un sistema de detección de fatiga mediante electroencefalografía combinado con redes neuronales convolucionales, que ha demostrado una alta precisión en la identificación temprana de estados de fatiga. Además, los modelos predictivos de resistencia máxima en tareas físicas han sido fundamentales para optimizar las condiciones laborales [1], reduciendo la carga física y los riesgos de trastornos musculoesqueléticos en minería subterránea. Estas innovaciones tecnológicas, junto con la implementación de ciclos de mejora continua como el PHVA, han sido clave para mitigar riesgos y mejorar las condiciones laborales [4].

La principal novedad de este trabajo reside en el diseño de un sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional específicamente adaptado a los conductores de transporte en minería subterránea, basado en el ciclo Planificar, Hacer, Verificar y Actuar (PHVA). Este enfoque permite una identificación y mitigación continua de los factores que contribuyen a la fatiga laboral, optimizando tanto la seguridad como la eficiencia operativa. A través de la aplicación del ciclo PHVA, se logró una mejora continua en las condiciones de trabajo de los conductores, lo que ha reducido significativamente los incidentes relacionados con la fatiga y ha aumentado la productividad general del proyecto minero. Esta metodología ofrece un marco replicable para otras operaciones mineras que enfrentan desafíos similares.

II. ESTADO DEL ARTE

En la minería subterránea, la fatiga laboral ha sido reconocida como un factor crítico que afecta tanto la seguridad como la productividad de las operaciones mineras. Estudios recientes han demostrado que un 54.55% de los trabajadores mineros experimentan altos niveles de fatiga, lo que aumenta el riesgo de accidentes en tareas críticas dentro de las minas [5]. La fatiga es particularmente pronunciada en los operadores de maquinaria pesada quienes, debido a las condiciones extremas de trabajo, como la exposición al calor y el ruido, están más propensos a experimentar fatiga física y mental [6].

Asimismo, se ha investigado cómo la fatiga afecta la toma de decisiones en situaciones de riesgo. Un estudio señala que la fatiga mental en los mineros está directamente relacionada con una mayor predisposición a asumir riesgos en entornos laborales peligrosos, lo que incrementa la probabilidad de accidentes [7]. Este fenómeno se ha observado en diferentes experimentos de simulación, donde los mineros fatigados presentaron decisiones más conservadoras, pero con mayor probabilidad de error [8].

Los avances en tecnología han permitido el desarrollo de sistemas de monitoreo en tiempo real para gestionar la fatiga laboral en minería subterránea. han propuesto un sistema basado en IoT que utiliza dispositivos portátiles para monitorear los signos vitales de los mineros, como el ritmo cardíaco y la temperatura corporal, ayudando a prever estados de fatiga antes de que se produzcan accidentes [9]. Este enfoque ha mostrado ser eficaz para reducir incidentes relacionados con la fatiga, ya que permite una respuesta temprana ante condiciones peligrosas.

Además, el desarrollo de modelos predictivos para prevenir la fatiga laboral ha avanzado significativamente. Se ha desarrollado un nomograma para predecir el riesgo de problemas de salud mental en mineros, basado en variables como el agotamiento y el desequilibrio esfuerzo-recompensa, proporcionando una herramienta útil para la identificación temprana de riesgos [10]. Esta herramienta ha demostrado ser eficaz para reducir los niveles de fatiga mental y, en consecuencia, disminuir los accidentes relacionados con errores humanos.

El ciclo PHVA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar) ha sido identificado como una herramienta eficaz para la gestión de la fatiga laboral y los riesgos asociados. La implementación del ciclo PHVA en minas subterráneas ha permitido una mejora en la seguridad ocupacional, reduciendo el impacto de factores psicosociales que contribuyen a la fatiga [4]. Esta metodología facilita la identificación continua de riesgos y la implementación de medidas correctivas para mejorar las condiciones de trabajo.

En términos de mitigación de la fatiga física, el uso de modelos predictivos ha permitido evaluar el tiempo máximo de resistencia de los mineros en tareas físicas exigentes, proporcionando datos precisos para ajustar los turnos de trabajo y prevenir trastornos musculoesqueléticos [6]. Este tipo de modelos ha demostrado ser fundamental en la optimización de la gestión de la fatiga en entornos de alto riesgo.

Los problemas de fatiga en la minería están directamente vinculados con factores ergonómicos, como la postura durante el trabajo y la exposición a ambientes subterráneos de baja iluminación y ruido elevado [11]. Estas condiciones no solo afectan la capacidad física de los mineros, sino que también influyen en su estado cognitivo, aumentando el riesgo de errores operativos.

Por último, estudios recientes sobre las pausas laborales han mostrado que descansos más frecuentes y cortos pueden ayudar a mitigar los efectos negativos de la fatiga en el rendimiento de los trabajadores. La implementación de pausas cortas, pero regulares, en ambientes controlados de temperatura puede mejorar tanto la recuperación física como el estado cognitivo de los mineros [12].

La integración de estas soluciones tecnológicas y metodológicas es clave para abordar el desafío persistente de la fatiga en minería subterránea, donde los riesgos inherentes al trabajo se ven exacerbados por las duras condiciones laborales. La aplicación de sistemas avanzados de monitoreo, combinados con modelos de gestión como el ciclo PHVA, ofrece un enfoque prometedor para reducir los accidentes laborales y mejorar la salud ocupacional de los trabajadores.

III. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este estudio sigue el ciclo PHVA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar) para diseñar un sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional enfocado en los conductores de transporte del proyecto minero Ticrapo.

Permite un proceso de mejora continua en el que se identifican los factores contribuyentes a la fatiga laboral, se implementan medidas correctivas y preventivas, y se evalúa la efectividad de estas medidas. Finalmente, se aplican ajustes para asegurar una mejora sostenida en la seguridad y bienestar de los trabajadores [13]. La investigación aborda cuatro objetivos específicos que guían cada una de las fases del ciclo PHVA.

El proceso de la metodología se describe de manera didáctica en la siguiente figura.

El proceso comienza con la recolección y análisis de los registros históricos de accidentes laborales de la empresa en 2024, lo que permitirá identificar aquellos incidentes donde la fatiga fue un factor relevante. Posteriormente, se elaborará una matriz detallada que documente los factores específicos de fatiga observados en estos incidentes. Además, se diseñará y aplicará una encuesta estructurada a los conductores de transporte para obtener su percepción sobre los factores que contribuyen a su fatiga en el trabajo diario. A través del análisis de los resultados de las encuestas, se identificarán los factores de fatiga más críticos que requieren intervención prioritaria.

Paralelamente, se implementará un plan de recolección de datos utilizando escalas validadas, como el Índice de Fatiga y la Escala de Somnolencia de Karolinska, estas herramientas se aplicarán en diversas zonas de trabajo (extracción, transporte

de materiales, carga y descarga, zona administrativa) para cuantificar los niveles de fatiga [14]. Los datos obtenidos permitirán identificar las áreas de trabajo donde la fatiga tiene un mayor impacto, priorizando así las intervenciones preventivas y correctivas en las zonas más críticas.

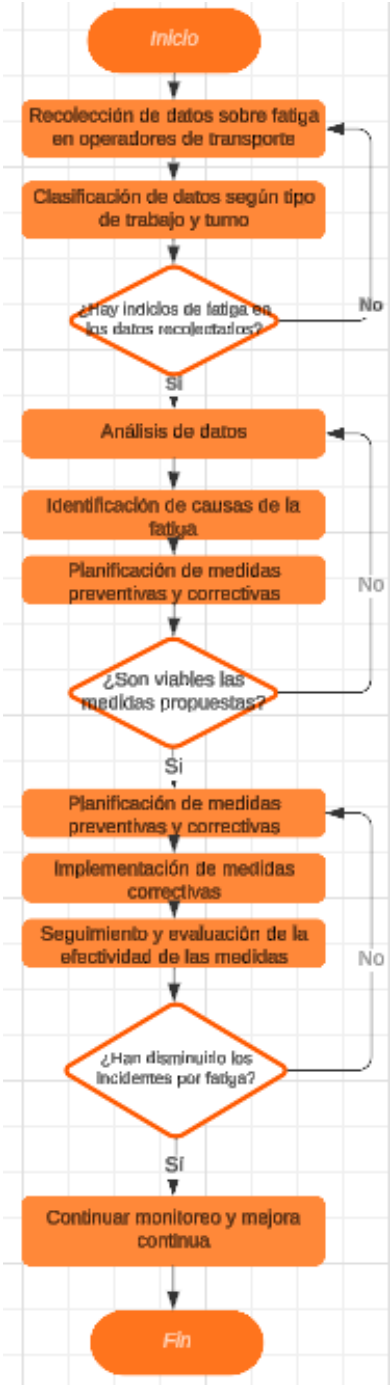

Figura 1. Metodología propuesta del sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional de los conductores de transporte en minería subterránea mediante el método Planificar, Hacer, Verificar y Actuar (PHVA).

Tabla 1. Escala de Karolinska

Tasa	Descripciones verbales
1	Extremadamente alerta
2	Muy alerta
3	Alerta
4	Bastante alerta
5	Ni alerta ni somnoliento
6	Algunos signos de somnolencia
7	Somnoliento, pero sin esfuerzo por mantenerse despierto
8	Somnoliento, algo de esfuerzo por mantenerse despierto
9	Muy somnoliento, gran esfuerzo por mantenerse despierto, luchando contra el sueño

Este estudio empleó una metodología orientada a la identificación y gestión de factores de fatiga en conductores de transporte de minería subterránea, tomando como caso el proyecto minero Ticrapo. Para lograr una gestión sistemática y precisa, se utilizó el ciclo de mejora continua PHVA, ampliamente validado en la industria minera y adaptable a la gestión de riesgos en operaciones subterráneas [15].

Como primer paso se identificaron los factores que contribuyen a la fatiga laboral de los conductores, se realizó un análisis detallado de los registros históricos de accidentes laborales de 2024. Este análisis se enfocó en detectar incidentes en los que la fatiga fue un factor relevante, proporcionando datos sobre la frecuencia y características de estos eventos. Los incidentes identificados se documentaron en una matriz que incluía el número del incidente, la fecha, una breve descripción, los factores de fatiga observados, la causa principal y observaciones adicionales. Esta matriz no solo facilitó la organización de los datos, sino que también permitió el análisis de patrones que pudieran ser consistentes con la presencia de fatiga, proporcionando un conocimiento profundo sobre las causas subyacentes que afectan el desempeño de los conductores en minería subterránea. Según estudios recientes, la metodología PDCA es eficaz en la identificación y mitigación de riesgos, y su uso en minería contribuye a un entorno laboral más segura [16].

Posteriormente, para validar y ampliar la información recopilada, se aplicó una encuesta estructurada a los conductores de transporte. Esta encuesta fue diseñada para explorar la percepción de los conductores sobre los factores de fatiga en su trabajo diario, abarcando factores clave como las condiciones del entorno de trabajo, la duración de las jornadas laborales, y la calidad de los períodos de descanso. Con los datos obtenidos, se llevó a cabo un análisis de frecuencia para priorizar los factores más significativos, los cuales se abordaron en fases posteriores del proyecto. Además, se realizaron entrevistas estructuradas con los conductores, lo que permitió verificar y complementar los hallazgos, asegurando que los factores identificados fueran relevantes y

comprendidos por los trabajadores, fortaleciendo así la precisión de la investigación [17].

Se busca priorizar los niveles de fatiga en diferentes áreas de trabajo, se seleccionaron tres zonas operativas clave: la zona de extracción, la zona de transporte de materiales y el área de carga y descarga. Estas áreas fueron seleccionadas debido a sus características únicas y las demandas físicas impuestas a los conductores. Para cuantificar los niveles de fatiga, se implementaron herramientas de evaluación estandarizadas, como el Índice de Fatiga y la Escala de Somnolencia de Karolinska [18]. El Índice de Fatiga permitió medir los niveles generales de cansancio acumulado de los conductores en cada zona, mientras que la Escala de Karolinska, una medida subjetiva de somnolencia que va de "Muy alerta" a "Muy somnoliento", proporcionó una evaluación de la percepción de alerta de los conductores en tiempo real [19].

Para asegurar la calidad de los datos y la consistencia de la aplicación, se estableció un cronograma de recolección durante una semana. La aplicación se organizó de manera que cada conductor completara los cuestionarios autoadministrados al inicio y final de cada turno, lo que permitió captar los niveles de fatiga a lo largo de la jornada laboral. Este enfoque no solo optimizó la recopilación de datos, sino que también permitió la identificación de tendencias en la fatiga diaria, que se analizaron comparativamente entre áreas para identificar aquellas con niveles de fatiga más altos. Este análisis es fundamental para desarrollar intervenciones precisas en las zonas con mayores riesgos de fatiga, tal como se recomienda en otros estudios sobre la implementación de PHVA en contextos mineros [16].

El estudio consistió en aplicar el ciclo PHVA para gestionar de manera continua los indicadores de fatiga en los conductores. Este proceso cíclico comenzó con una fase de planificación en la que se identificaron los principales riesgos y se asignaron recursos específicos para las intervenciones de seguridad. Durante la fase de "Hacer", se implementaron capacitaciones y controles, abarcando prácticas de descanso programado, rotación de tareas, y monitoreo constante del estado de los conductores. La fase de "Verificar" incluyó auditorías de cumplimiento y análisis de datos recolectados, lo cual proporcionó una medida objetiva de la efectividad de las acciones implementadas. Finalmente, en la fase de "Actuar", se realizaron ajustes basados en los resultados de las auditorías y en la retroalimentación de los conductores, promoviendo mejoras continuas. El ciclo PHVA ha demostrado ser eficaz en la gestión de entornos de trabajo en condiciones adversas, y su uso en este contexto asegura que las intervenciones se mantengan actualizadas y adaptadas a las necesidades del entorno [20].

Evaluar la eficacia del sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional, se aplicaron evaluaciones exhaustivas a través del ciclo PHVA para analizar el impacto de las medidas implementadas. Se realizaron auditorías y se analizaron los datos de fatiga antes y después de la implementación del sistema, permitiendo una comparación clara de los niveles de riesgo. Esta fase de evaluación es clave para verificar que las acciones correctivas logren los objetivos de reducción de fatiga y para ajustar las prácticas de manera efectiva en respuesta a los resultados obtenidos [21]. Estudios previos han confirmado la efectividad de la metodología PHVA en entornos mineros, destacando su capacidad para estructurar y optimizar la gestión de riesgos en operaciones subterráneas [22].

IV. CASO DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde al Proyecto Minero Ticrapo, ubicado en el departamento de Huancavelica, Perú, una zona montañosa caracterizada por terrenos accidentados y vías de acceso complejas. Este proyecto opera principalmente como una mina subterránea, donde el transporte de mineral se realiza mediante camiones a lo largo de rutas peligrosas, con condiciones climáticas variables y condiciones extremas de altitud (ver Figura 2).

Resalta también la ubicación del distrito dentro del departamento, facilitando la visualización de las conexiones viales en una zona montañosa, esencial para el transporte en proyectos mineros. El Proyecto Minero Ticrapo, ubicado en el departamento de Huancavelica a 3,800 metros de altitud, enfrenta desafíos logísticos debido a su geografía montañosa. El acceso es por la Carretera Panamericana y un camino sin pavimentar, resaltando la necesidad de transporte seguro por las rutas sinuosas del terreno.

Figura 2. La imagen proporcionada obtenida de la página del Ministerio de Transportes muestra el mapa vial del distrito de Ticrapo, Huancavelica.

Geología del Proyecto Minero

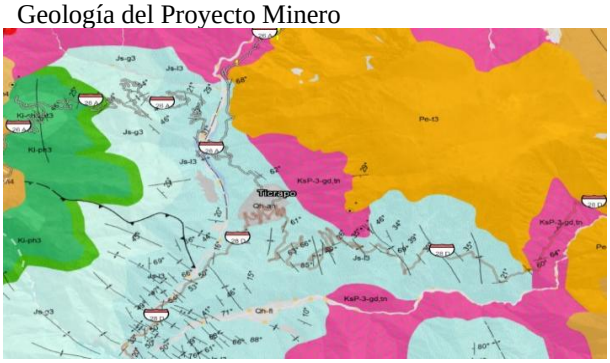

Figura 3. Mapa geológico de Ticrapo de INGEMMET

El distrito de Ticrapo, en el departamento Huancavelica, presenta una geología variada con formaciones sedimentarias, ígneas y volcánicas, afectadas por procesos tectónicos que han generado fallas y pliegues. Esto ha dado lugar a una rica mineralización de zinc, plomo y plata, impulsando la minería subterránea (ver Figura 3).

El mapa geológico muestra diversas unidades, como rocas sedimentarias del Jurásico y formaciones volcánicas del Grupo Yura. La tectónica activa y la compleja estructura mineral favorecen la acumulación de recursos, aunque también representan desafíos logísticos y operacionales para la minería en la zona.

Mineralización y Desarrollo del Proyecto

El proyecto minero Ticrapo se dedica a la extracción de zinc, plomo y plata, minerales esenciales cuya explotación y transporte están en fases iniciales de implementación progresiva, con miras a incrementar la producción. A medida que avanza el desarrollo, la optimización de rutas y la consolidación de la infraestructura subterránea se convierten en aspectos críticos para garantizar el transporte eficiente del mineral desde las galerías hasta la superficie. Este proceso enfrenta importantes desafíos derivados de las condiciones geográficas y operativas, como rutas aún en habilitación, altitudes elevadas y climas extremos, lo que exige una constante adaptación de los sistemas de transporte y una planificación estratégica de los turnos laborales para maximizar la eficiencia y la seguridad.

Transporte de Mineral en el Proyecto

Dentro del proyecto, El sistema de transporte en el proyecto Ticrapo es un componente crítico para la continuidad de las operaciones, permitiendo el traslado del mineral desde las galerías subterráneas hasta las zonas de procesamiento en superficie. Aunque las rutas internas están en proceso de optimización, su adecuación constante es esencial para mejorar la seguridad y reducir los tiempos de transporte, factores clave para la productividad futura.

Los conductores, seleccionados por su experiencia en la operación de vehículos pesados y conocimiento de normas de seguridad, enfrentan condiciones desafiantes debido a la estrechez de los caminos, curvas pronunciadas y variaciones climáticas extremas que aumentan los riesgos de accidentes y fatiga durante las jornadas extendidas. Además, los cambios bruscos de temperatura propios de la altitud afectan tanto el desempeño de los vehículos como de los trabajadores, consolidando al equipo de transporte como una pieza fundamental en la cadena operativa del proyecto, incluso en esta fase inicial.

Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional

El Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional del proyecto Ticrapo se fundamenta en el ciclo PHVA, permitiendo una gestión continua y adaptativa de los riesgos laborales, especialmente en el transporte subterráneo. En la etapa de Planificación, se identifican riesgos clave como la fatiga laboral, las condiciones climáticas extremas y los extensos turnos de trabajo, desarrollándose estrategias preventivas que incluyen la regulación de horarios, descansos adecuados y capacitación constante en seguridad. Además, se han incorporado tecnologías de monitoreo en tiempo real para evaluar las condiciones laborales, proporcionando información precisa sobre los riesgos a los que están expuestos los conductores, fortaleciendo así las medidas de protección y prevención.

Durante las fases de Verificación y Actuación del ciclo PHVA, se revisan de manera continua los incidentes y el cumplimiento de las medidas de seguridad implementadas, ajustando los protocolos en respuesta a los resultados obtenidos. Este enfoque permite priorizar acciones correctivas, como la mejora de la infraestructura vial dentro de la mina y la implementación de rotaciones en las tareas para reducir la monotonía y el estrés que afectan a los conductores. La gestión basada en PHVA en el SGSSO de Ticrapo se plantea como una estrategia integral para garantizar un entorno de trabajo seguro y saludable, promoviendo el bienestar de los trabajadores y optimizando la eficiencia operativa en un proyecto de minería subterránea.

V. VALIDACIÓN

Se analizaron 35 incidentes relacionados con la fatiga laboral del proyecto minero presentados en 2024. En el 20% de los casos, la fatiga fue la causa principal, mientras que en el 80% restante se identificó como un factor secundario significativo. Los tipos de incidentes más comunes fueron la pérdida de control del vehículo, retrasos en la toma de decisiones y errores en la navegación de rutas. Para organizar estos hallazgos, se elaboró una matriz que clasificó los factores observados, revelando que las horas de trabajo prolongadas estuvieron presentes en el 60% de los incidentes, la falta de sueño en el 45% y la monotonía en las rutas en el 30%. Esta estructura permitió analizar los factores críticos de manera sistemática y proponer acciones de mitigación específicas.

Se realizó un estudio combinando encuestas y entrevistas estructuradas para evaluar los factores de fatiga laboral en conductores de minería subterránea durante los meses de agosto y septiembre. Las encuestas, aplicadas a 10 conductores, revelaron que el 70% identificó las horas de trabajo prolongadas como el principal factor de fatiga, seguido por la falta de sueño (50%) y la monotonía en las rutas (30%) (ver Figura 5). En términos de frecuencia, el 50% de los encuestados reportaron sentir fatiga "a menudo" durante sus turnos, mientras que un 20% la experimentaba "siempre". Además, el 40% señaló no contar con tiempo suficiente para descansar entre turnos, intensificando los efectos de la fatiga y afectando su rendimiento en el transporte subterráneo.

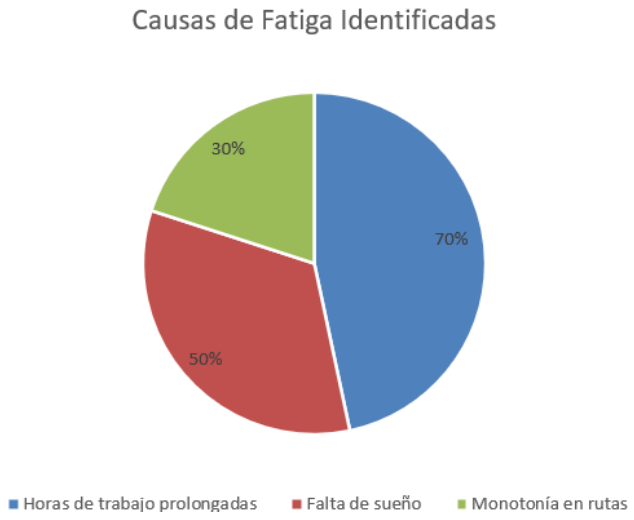

Figura 4. Distribución de las causas de fatiga identificadas en conductores de minería subterránea.

Por otro lado, las entrevistas estructuradas realizadas posteriormente confirmaron los resultados obtenidos en las encuestas. Los conductores destacaron de manera consistente que las largas jornadas laborales y la insuficiencia de descanso entre turnos son los principales factores que contribuyen a su agotamiento.

La concordancia entre los datos cuantitativos obtenidos de las encuestas y los hallazgos cualitativos de las entrevistas refuerza la relevancia de abordar estos factores en el Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional. Las intervenciones propuestas, como descansos programados, rotación de tareas y diversificación de rutas, buscan reducir significativamente los riesgos asociados a la fatiga laboral, mejorando la seguridad y el bienestar de los conductores en las operaciones mineras de Ticrapo. Tras la recolección de datos y la aplicación de escalas estandarizadas en el Proyecto Minero Ticrapo, se analizaron los niveles de fatiga en las distintas áreas de trabajo utilizando el Índice de Fatiga y la Escala de Somnolencia de Karolinska (Figura 5).

Los resultados específicos muestran que el Área 1, correspondiente a la Zona de Extracción, presentó los niveles más altos, con un promedio de 7.3 en el Índice de Fatiga y 7.5 en la KSS, lo que indica que los conductores en esta área trabajan en condiciones de alerta reducida debido a las largas jornadas y las altas exigencias físicas de la labor minera (ver Figura 5).

Área de Trabajo	Promedio Índice de Fatiga	Promedio KSS	Desviación Estándar
Zona de extracción	7.3	7.5	0.8
Zona de transporte	6.0	6.2	0.6
Área de carga y descarga	5.7	5.8	0.5

Figura 5. Niveles de fatiga en cada área de trabajo.

El Área 1 es la más crítica en términos de fatiga, por lo tanto, se sugiere enfáticamente que, al ser esta la zona más afectada, se desarrollen estrategias específicas como la optimización de horarios, pausas programadas y medidas para aliviar las demandas físicas, priorizando así la salud de los conductores y la sostenibilidad del proyecto minero.

En comparación, el Área 2, destinada al Transporte de Materiales, registró una fatiga moderada, con promedios de 6.0 en el Índice de Fatiga y 6.2 en la KSS. Aunque los niveles de esfuerzo físico son menores en esta zona, la fatiga se acumula debido a los largos trayectos y la monotonía, afectando la concentración de los conductores (ver Figura 6).

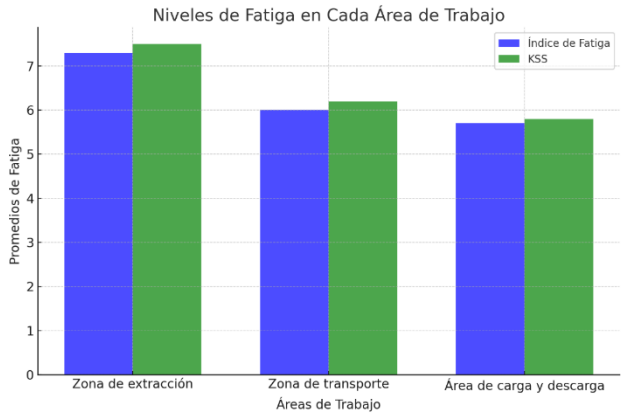

Figura 6. Histograma de los niveles de fatiga en cada área estudiada.

Por su parte, el Área 3, enfocada en Carga y Descarga, mostró índices de fatiga más bajos, con promedios de 5.7 y 5.8 respectivamente, lo cual se atribuye a la rotación de actividades que permite alternar tareas y reducir el impacto de la fatiga.

El histograma desarrollado muestra claramente que las Áreas 1 y 2 son las zonas críticas que requieren intervenciones urgentes, tales como descansos programados y monitoreo constante de fatiga, para mejorar las condiciones de trabajo y minimizar los riesgos en estas áreas operativas. Aquí, la valoración del instrumento utilizado no solo confirma la relevancia de los hallazgos, sino que responde de manera directa a la necesidad de abordar la fatiga como tal. Este enfoque instrumental, además de identificar los niveles y causas de fatiga, se posiciona como una estrategia fundamental para priorizar acciones específicas, asegurando que las intervenciones estén basadas en evidencia sólida y orientadas a las necesidades reales de cada área.

El sistema de gestión de fatiga mediante el ciclo PHVA en el Proyecto Minero Ticrapo. En la fase inicial, se realizó un diagnóstico inicial de las áreas de trabajo con mayor incidencia de fatiga mediante entrevistas breves y cuestionarios de evaluación. Esta etapa permitió identificar zonas críticas y asignar recursos clave, como herramientas de evaluación y personal de apoyo, asegurando una base sólida para las fases posteriores (ver Figura 7).

Durante la fase de Ejecución, se aplicaron cuestionarios al inicio y al final de los turnos, complementados con observaciones directas en las áreas priorizadas. Además, se implementaron pausas activas y ajustes en los turnos de trabajo en tiempo real, logrando una participación significativa de los conductores y puntualidad en las actividades. En la fase de Verificación, los datos recopilados se compararon con niveles previos de fatiga, usando el Índice de Fatiga y la Escala de Somnolencia de Karolinska, observando una reducción notable en los niveles de fatiga en las zonas críticas, lo cual validó la efectividad de las medidas aplicadas.

Fase del Ciclo PHVA	Actividades Clave	Indicadores de Éxito	Recursos Necesarios	Responsables	Plazo
Planificación	Identificación de factores de riesgo de fatiga y selección de áreas de mayor impacto	Factores de riesgo correctamente identificados; áreas seleccionadas con datos previos	Datos históricos de fatiga, herramientas de diagnóstico	Equipo de seguridad, analistas de datos	1 semana
Hacer (Ejecución)	Implementación de encuestas rápidas de fatiga y ajustes de turnos de prueba	Completitud de encuestas; ajustes aplicados sin interrupción operativa	Formularios de encuestas, horario ajustable	Supervisores, conductores	1 semana
Verificar (Control)	Revisión de datos de fatiga post-ajustes y evaluación del estado de alerta en los conductores	Datos muestran reducción en niveles de fatiga; estado de alerta mejorado	Software de análisis, reportes de monitoreo	Gerencia de seguridad, analistas	1 semana
Actuar (Mejora)	Implementación de turnos definitivos y programas de descanso adaptados; planificación de capacitaciones	Optimización de turnos, menor reporte de fatiga, mejor adherencia a descansos	Recursos de capacitación, planificación de turnos	Supervisores	1 semana

Figura 7. Estándar de aplicación del Ciclo PHVA - Gestión de la Fatiga en Conductores

En la fase de Actuar, se implementaron ajustes permanentes basados en los resultados de la verificación. Las pausas programadas fueron reforzadas, los turnos ajustados de forma continua y se capacitó al personal en prácticas preventivas de fatiga.

Este enfoque de mejora continua asegura que el sistema de gestión de la fatiga permanezca adaptado a las necesidades del proyecto, promoviendo de esta forma un entorno seguro y sostenible para los conductores. La aplicación integral del ciclo PHVA no solo redujo significativamente los niveles de fatiga, sino que también mejoró las condiciones laborales, incrementando la seguridad y el bienestar de los trabajadores en la operación subterránea.

Para evaluar la eficacia del sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional en el Proyecto Minero Ticrapo, se aplicaron indicadores clave de desempeño y técnicas de verificación continua, abarcando cada fase del ciclo PHVA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar). En la fase de Planificación, se identificaron los riesgos principales asociados a la fatiga en el entorno subterráneo, estableciendo metas como la reducción de incidentes por fatiga en un 20% (ver Figura 8). A través de análisis en campo, revisión de reportes previos y asignación de recursos específicos, se diseñó una estructura que permitió una implementación clara y organizada del sistema de seguridad.

Las actividades incluyeron visitas a áreas de trabajo, donde se documentaron condiciones que podrían contribuir a la fatiga, así como la definición de objetivos específicos y la distribución de responsabilidades.

Paso	Actividad	Descripción Detallada	Responsable	Recursos	Indicadores de Éxito	Plazo
Identificación de Riesgos	Análisis de riesgos en campo	Visitar las áreas de trabajo para observar condiciones que puedan causar fatiga laboral y documentarlas.	Jefe de Seguridad	Observación directa	Informe de riesgos	1 semana
Evaluación de Incidentes	Revisión de reportes de accidentes	Revisar reportes de accidentes previos relacionados con fatiga para identificar patrones de riesgo.	Coordinador de Seguridad	Base de datos simplificada	Patrones de riesgo identificados	1 semana
Definir Objetivos	Establecimiento de metas de seguridad	Definir metas específicas como reducir los incidentes relacionados con fatiga en un 20%.	Gerencia de Seguridad	Documentación	Metas de reducción de incidentes	1 semana
Asignación de Recursos	Designación de recursos y responsables	Asignar personal y recursos mínimos necesarios para la implementación de medidas de seguridad básicas.	Gerente de Proyecto	Recursos básicos	Recursos asignados	1 semana

Figura 8. Fase de Planificación: Identificación de Riesgos y Establecimiento de Objetivos

En la fase de Hacer, se llevaron a cabo talleres de capacitación y se implementaron controles básicos, como el monitoreo de descansos obligatorios y el uso de equipo de protección (ver Figura 9). Se realizaron encuestas semanales de percepción de fatiga, que evidenciaron una disminución del 15% en la percepción de fatiga entre los trabajadores, lo que indicó un aumento en la conciencia de la importancia de los descansos y el uso adecuado de los equipos de seguridad.

Paso	Actividad	Descripción Detallada	Responsable	Recursos	Indicadores de Éxito	Plazo
Capacitación	Taller de seguridad y gestión de fatiga	Realizar un taller sencillo sobre los riesgos de fatiga y prácticas seguras en el trabajo.	Coordinador de Capacitación	Material educativo básico	Participación del personal	1 semana
Implementación de Controles	Supervisión ligera en áreas críticas	Asegurar que los trabajadores tomen descansos en turnos largos y usan el equipo de seguridad.	Supervisores de Área	Observación en campo	Cumplimiento de las medidas de seguridad	Continua
Monitoreo Inicial	Encuesta de percepción de fatiga	Realizar encuestas semanales para medir la fatiga y recopilar datos básicos sobre incidentes menores en cada área.	Jefe de Seguridad	Formularios de encuestas	Reducción de quejas por fatiga	1 semana

Figura 9. Fase de Hacer: Ejecución de Actividades y Controles de Seguridad

Los supervisores de área se encargaron de observar el cumplimiento de estas medidas, asegurando que los trabajadores tuvieran el apoyo necesario en sus turnos

extendidos, lo cual reflejó una buena aceptación y adhesión por parte del personal.

Durante la fase de Verificación, se revisó el cumplimiento de las medidas aplicadas mediante observaciones directas y análisis de los resultados de las encuestas (ver Figura 10). Esta fase mostró una reducción progresiva en las quejas relacionadas con la fatiga, particularmente en turnos largos, gracias a la adecuada aplicación de descansos y al uso del equipo de protección. La observación en campo reveló que los conductores se encontraban más conscientes de las normas de seguridad, y el análisis de las encuestas indicó una disminución constante en los niveles de fatiga reportados. Estos hallazgos validaron que las medidas de control implementadas estaban contribuyendo de manera efectiva a mejorar el entorno de trabajo.

Paso	Actividad	Descripción Detallada	Responsable	Indicadores de Éxito	Plazo
Revisión de Cumplimiento	Observación de uso de medidas de seguridad	Supervisar de manera simple que los trabajadores cumplen con los descansos y el uso de equipo de seguridad.	Supervisores de Área	Observación de cumplimiento	1 semana
Evaluación de Encuestas	Análisis de resultados de encuestas de fatiga	Analizar las respuestas de las encuestas para ver cambios en la percepción de fatiga y condiciones de seguridad.	Coordinador de Seguridad	Mejoría en respuestas de fatiga	1 semana
Identificación de Mejoras	Ajuste en descansos y turnos	Basado en el análisis, ajustar tiempos de descanso en áreas con alta fatiga.	Jefe de Proyecto	Plan de acción basado en encuestas	1 semana

Figura 10. Fase de Verificación: Revisión y Análisis de Resultados

En la fase de Actuar, se introdujeron ajustes basados en la retroalimentación obtenida de los trabajadores y en los datos de verificación (ver Figura 11).

Paso	Actividad	Descripción Detallada	Responsable	Indicadores de Éxito	Plazo
Implementación de Mejoras	Ajustes en descansos y rotación de tareas	Aplicar rotaciones de turnos o descansos más frecuentes en áreas con niveles altos de fatiga.	Gerente de Operaciones	Reducción en incidentes y quejas	1 semana
Comunicación	Informe breve de resultados	Compartir los resultados del sistema de seguridad con todo el equipo en un formato de comunicación simple.	Jefe de Proyecto	Reuniones informativas realizadas	1 semana
Retroalimentación	Revisiones periódicas de cumplimiento	Continuar con observaciones y ajustes basados en las respuestas de los trabajadores y datos de campo.	Coordinador de Seguridad	Implementación de mejoras continuas	1 semana

Figura 11. Fase de Actuar: Ajustes y Mejora Continua

Entre las principales mejoras, se establecieron descansos más frecuentes y rotaciones de turnos en las áreas críticas, lo que permitió reducir las quejas por fatiga en un 5% adicional, alcanzando la meta de reducción del 20% en incidentes relacionados con el cansancio. Además, se comunicaron los resultados del sistema de seguridad a todo el equipo a través de informes breves, promoviendo una cultura de seguridad y bienestar en la operación.

VI. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio destacan que la fatiga laboral en los conductores del proyecto minero Ticrapo es un problema multifactorial influenciado por condiciones adversas propias del entorno minero subterráneo [5]. Factores como jornadas laborales prolongadas, condiciones ambientales extremas y una rotación insuficiente de turnos son las principales causas identificadas. Estas condiciones no solo afectan la seguridad de los trabajadores, sino que también comprometen la eficiencia operativa del proyecto. La evidencia recopilada respalda investigaciones previas que indican que el entorno subterráneo y las exigencias físicas inherentes a estas operaciones incrementan significativamente la probabilidad de accidentes relacionados con errores humanos [12].

Un hallazgo particularmente relevante es la correlación entre las áreas de mayor exigencia física, como la extracción y el transporte de materiales, y los niveles más altos de fatiga reportados. Esto sugiere que estas zonas requieren una atención prioritaria en la implementación de estrategias de mitigación [22]. Las medidas adoptadas, como la regulación de turnos y la programación de descansos, han demostrado ser efectivas en la reducción de incidentes, aunque persisten desafíos importantes. El monitoreo continuo mediante tecnologías avanzadas y la recopilación de datos en tiempo real se presentan como herramientas fundamentales para ajustar y personalizar las estrategias de intervención, optimizando tanto la seguridad como la productividad [23].

El uso del ciclo PHVA permitió estructurar un enfoque sistemático y continuo para la gestión de riesgos asociados a la fatiga, lo que representa una contribución significativa al estado del arte en la seguridad ocupacional minera [4]. Este enfoque no solo demostró ser eficaz en la reducción de la fatiga en áreas críticas, sino que también proporcionó una base sólida para la implementación de mejoras operativas en el futuro. La rotación de tareas y la diversificación de las actividades en áreas de alta monotonía han mostrado potencial para reducir el impacto del agotamiento físico y mental en los conductores.[24]

Desde una perspectiva más amplia, este estudio contribuye al conocimiento existente al identificar lagunas en la gestión de la fatiga laboral en la minería subterránea [11]. Los resultados ponen de manifiesto la necesidad de integrar de manera más efectiva el bienestar de los trabajadores en los sistemas de gestión de seguridad y salud ocupacional, especialmente en contextos de alta exigencia operativa.

VII.CONCLUSIONES

El ciclo PHVA en el proyecto minero Ticrapo ha demostrado ser una herramienta eficaz para disminuir significativamente la fatiga laboral entre los conductores, particularmente en áreas críticas como la extracción y el transporte. Esto ha resultado en una mejora directa en la seguridad, el bienestar laboral y la eficiencia operativa del proyecto.

Factores como jornadas laborales prolongadas, condiciones variables y tareas repetitivas fueron abordados mediante la aplicación de estrategias como descansos programados, rotación de tareas y ajustes en los turnos. Estas medidas han evidenciado una reducción notable en el riesgo de incidentes y han mejorado la percepción de seguridad y productividad entre los trabajadores.

El monitoreo constante y en tiempo real de los niveles de fatiga se identificó como una herramienta clave dentro del sistema de gestión de seguridad. Este enfoque permite ajustar de manera oportuna las estrategias de prevención, adaptándolas a las necesidades dinámicas y a las condiciones específicas de operación en un entorno minero subterráneo.

El modelo de gestión propuesto, basado en el ciclo PHVA, no solo es aplicable al proyecto Ticrapo, sino que representa un enfoque replicable para otras operaciones mineras que enfrentan desafíos similares. Esto subraya su potencial para promover un entorno laboral más seguro y sostenible, contribuyendo al avance del estado del arte en la gestión de seguridad ocupacional en minería.

REFERENCIAS

[1] [1] Y. Chen, S. Tian, y Y. Zou, “Modeling of the maximum endurance time of coal miners muscle fatigue for one-handed carrying tasks”, J Loss Prev Process Ind, vol. 80, dic. 2022, doi: 10.1016/j.jlp.2022.104895.

[2] [2] S. Rachmawati, M. Aktsari, A. Suryaningsih, H. Hawali Abdul Matin, y I. Suryadi, “Assesment Work Fatigue to Workers in Environment Underground Mining Areas Based on Fatigue Assesment Scale Questionnaires”, en E3S Web of Conferences, EDP Sciences, nov. 2020. doi: 10.1051/e3sconf/202020205013.

[3] [3] L. Xu, J. Li, y D. Feng, “Miner Fatigue Detection from Electroencephalogram-Based Relative Power Spectral Topography Using Convolutional Neural Network”, Sensors (Basel), vol. 23, núm. 22, nov. 2023, doi: 10.3390/s23229055.

[4] [4] K. Danova, V. Malysheva, L. Kolybelnikova, y S. Lohvinkov, “THE PDCA CYCLE IN THE CONTEXT OF REDUCING PSYCHO-EMOTIONAL TENSION IN THE WORKPLACE”, Municipal economy of cities, vol. 6, núm. 180, 2023, doi: 10.33042/2522-1809-2023-6-180-202-206.

[5] [5] S. Rachmawati, M. Aktsari, A. Suryaningsih, H. Hawali Abdul Matin, y I. Suryadi, “Assesment Work Fatigue to Workers in Environment Underground Mining Areas Based on Fatigue Assesment Scale Questionnaires”, en E3S Web of Conferences, EDP Sciences, nov. 2020. doi: 10.1051/e3sconf/202020205013.

[6] [6] Y. Chen, S. Tian, y Y. Zou, “Modeling of the maximum endurance time of coal miners muscle fatigue for one-handed carrying tasks”, J Loss Prev Process Ind, vol. 80, dic. 2022, doi: 10.1016/j.jlp.2022.104895.

[7] [7] A. Jia, X. Guo, y S. Tian, “Experimental study on the influence of mental fatigue on risk decision-making of miners”, Sci Rep, vol. 12, núm. 1, dic. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-14045-9.

[8] [8] L. Xu, J. Li, y D. Feng, “Miner Fatigue Detection from Electroencephalogram-Based Relative Power Spectral Topography Using Convolutional Neural Network”, Sensors (Basel), vol. 23, núm. 22, nov. 2023, doi: 10.3390/s23229055.

[9] [9] Y. Jiang, W. Chen, X. Zhang, X. Zhang, y G. Yang, “Real-Time Monitoring of Underground Miners’ Status Based on Mine IoT System”, Sensors, vol. 24, núm. 3, feb. 2024, doi: 10.3390/s24030739.

[10][10] Y. Lu, Q. Liu, H. Yan, y T. Liu, “Development and validation of a nomogram for predicting the risk of mental health problems of factory workers and miners”, BMJ Open, vol. 12, núm. 7, jul. 2022, doi: 10.1136/bmjopen-2021-057102.

[11][11] T. J. Bauerle, J. J. Sammarco, Z. J. Dugdale, y D. Dawson, “The human factors of mineworker fatigue: An overview on prevalence, mitigation, and what’s next”, el 1 de noviembre de 2022, John Wiley and Sons Inc. doi: 10.1002/ajim.23301.

[12][12] K. Uchiyama, J. King, K. Wallman, S. Taggart, C. Dugan, y O. Girard, “The influence of rest break frequency and duration on physical performance and psychophysiological responses: a mining simulation study”, Eur J Appl Physiol, vol. 122, núm. 9, pp. 2087–2097, sep. 2022, doi: 10.1007/s00421-022-04979-3.

[13][13] K. Suárez Vásquez y J. L. R. Zeña Ramos, “El ciclo Deming y la productividad: Una Revisión Bibliográfica y Futuras Líneas de Investigación”, Qantu Yachay, vol. 2, núm. 1, 2022, doi: 10.54942/qantuyachay. v2i1.21.

[14][14] N. P. da Silva, T. A. de S. Bonifácio, M. J. O. de Andrade, y N. A. dos Santos, “Tipologia circadiana de estudantes de Psicologia: Diferenças entre a qualidade de sono, sonolência excessiva e hábitos diários”, PSICO, vol. 51, núm. 3, 2020.

[15][15] K. Yu, P. Liu, L. Zhou, y R. Feng, “Research on Integration of Safety Policy System in Petrochemical Enterprises Based on Risk Hierarchical Control and Hidden Danger Investigation”, Sustainability (Switzerland), vol. 16, núm. 20, oct. 2024, doi: 10.3390/su16208746.

[16][16] H. M. Janse van Rensburg, A. G. S. Gous, J. C. Vosloo, y M. van Heerden, “Improving data management for environmental reporting in the gold mining industry”, South African Journal of Industrial Engineering, vol. 30, núm. 3, pp. 163–173, nov. 2019, doi: 10.7166/30-3-2236.

[17][17] P. Zgrzebski, M. Laskowski, y M. Danis, “Emergency Management on the Example of an Underground Copper Ore Mine”, Inzynieria Mineralna, vol. 1, núm. 1, pp. 79–86, 2022, doi: 10.29227/IM-2022-01-10.

[18][18] S. Hua y F. Liu, “A New Hybrid Teaching Model for a Psychology Course”, International Journal of Emerging Technologies in Learning, vol. 16, núm. 3, pp. 206–219, 2021, doi: 10.3991/ijet.v16i03.20457.

[19][19] R. de C. P. Santos, M. M. Oliveira, J. M. da Silva, C. L. L. Pinto, A. K. R. Segundo, y D. B. Mazzinghy, “Modular ventilation laboratory for educational purposes”, REM - International Engineering Journal., vol. 77, núm. 2, 2024, doi: 10.1590/0370-44672023770066.

[20][20] A. F. V. De Arruda y L. M. Gontijo, “Application of ergonomics principles in underground mines through the Occupational Safety and Health Management System - OSHMS OHSAS 18.001:2007”, en Work, 2012, pp. 4460–4467. doi: 10.3233/WOR-2012-0119-4460.

[21][21] R. de C. P. Santos, M. M. Oliveira, J. M. da Silva, C. L. L. Pinto, A. K. R. Segundo, y D. B. Mazzinghy, “Modular ventilation laboratory for educational purposes”, REM - International Engineering Journal., vol. 77, núm. 2, 2024, doi: 10.1590/0370-44672023770066.

[22][22] R. Da, S. Fernandes, R. Maria, y N. Luz, “INTEGRATED MANAGEMENT ANALYSIS OF PRODUCTION PERFORMANCE, MAINTENANCE, AND PDCA CYCLE: A CASE STUDY OF THE IPCC MINING PROCESS ANÁLISE DE GESTÃO INTEGRADA DE DESEMPENHO DE PRODUÇÃO, MANUTENÇÃO E CICLO PDCA: UM ESTUDO DE CASO NUM PROCESSO DE MINERAÇÃO IPCC”, 2022.

[23][23] S. feng WANG, Y. meng WU, y X. lei SHI, “Non-explosive mechanized and intelligent mining/heading in underground mine”, Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), vol. 34, núm. 1, pp. 265–282, ene. 2024, doi: 10.1016/S1003-6326(23)66397-6.

[24][24] P. Zgrzebski, M. Laskowski, y M. Danis, “Emergency Management on the Example of an Underground Copper Ore Mine”, Inzynieria Mineralna, vol. 1, núm. 1, pp. 79–86, 2022, doi: 10.29227/IM-2022-01-10.