

## RESUMEN EJECUTIVO

En esta guía, se describen prácticas recomendadas para el uso de BEV (vehículos a batería) en minería subterránea. Con ella, se pretende brindar orientación y un análisis general sobre los beneficios, las desventajas y la planificación necesarios para diseñar e implementar una flota de BEV en una mina existente o nueva.

### CASO DE NEGOCIO

La conversión a una mina completamente eléctrica ofrece muchas ventajas. Sin embargo, como todas las nuevas adaptaciones, existen desafíos asociados con la integración de un nuevo sistema o tecnología.

Tema	Consideraciones principales
Ingresos	Diferencias en la productividad y el rendimiento para acomodar los BEV. Posible desarrollo de yacimientos minerales tradicionalmente no rentables.
Costo del capital	Costos de infraestructura eléctrica en el sitio para distribuir potencia para las operaciones. Cambios relacionados con el diseño de la mina, como la cantidad y el tamaño de las galerías y los pozos.
Costo operativo	Las opciones de estrategias de carga y alimentación pueden impulsar los costos operativos. Por lo general, reducen los costos relacionados con la ventilación.
Salud, seguridad, medioambiente y comunidad	Mejores condiciones en el área de trabajo en términos de vibración, ruido, calidad del aire, temperatura y humedad. Menos emisiones medioambientales.

### DISEÑO Y OPERACIONES DE LA MINA

Las principales consideraciones a la hora del diseño y las operaciones de la mina incluyen la acomodación de cambios asociados con los métodos de carga eléctrica, la ventilación y el enfriamiento, el ciclo y los planes de la mina, los riesgos y los requerimientos de mantenimiento y operaciones.

Tema	Consideraciones principales
Diseño e infraestructura de la mina	Las restricciones operativas clave de los BEV incluyen un rango limitado, el tiempo necesario para cargar y cambiar baterías, los tiempos estimados del ciclo y las distancias desde las estaciones de carga. Se requieren cambios en la planificación y el plan para integrar las restricciones de los BEV y ajustarse a los planes mineros. Los factores asociados con el sistema de manipulación de minerales y lastre que deben tenerse en cuenta incluyen los requerimientos del OEM (fabricante de equipo original), la ley del mineral y las condiciones del sitio. El sistema de frenado regenerativo mientras se transporta cuesta abajo debe evaluarse con el perfil operativo del BEV para colocar los lugares de carga de manera óptima y reducir los tiempos de carga.
Áreas de mantenimiento	Se recomienda utilizar diseños típicos para optimizar el flujo de trabajo de talleres con áreas de mantenimiento para soldar, manipular neumáticos o lubricar. Se necesitan espacio e infraestructura para probar, mantener, descargar, cargar y almacenar baterías.
Traslado del personal y estacionamiento	Acceso por pique: se debe tener en cuenta el traslado entre la entrada a la mina y el BEV para acomodar la carga y la seguridad del personal. Acceso por rampa: es muy recomendable el traslado en grupos con fines de eficiencia.
Equipos eléctricos móviles	Las consideraciones de diseño y operación varían según el tipo de equipos. Por ejemplo, los equipos conectados con cable generalmente requieren infraestructura para el cable, mientras que, en el caso de los camiones, se podría enfocar más en el sistema de frenado regenerativo.

<b>Infraestructura de carga</b>	<p>Para diseñar la infraestructura de carga se requiere un diseño general de la mina y su desarrollo. Las consideraciones generales incluyen las siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Restricciones operativas como la infraestructura apropiada y las implicancias en los costos de los métodos de carga (carga interna [on-board], carga externa [off-board], cambio de batería o alternativas).</li> <li>• Ciclo y planes de la minería con respecto al tiempo de carga eléctrica en comparación con el tiempo operativo.</li> </ul>
– Filosofía de carga	<p>El punto de partida debería ser el diseño de la mina y el mapa operativo de los vehículos. Entre las consideraciones se incluyen las siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La normalización de los métodos de carga y las interfaces de conexión en comparación con métodos híbridos o mixtos, según el tamaño de la flota y los tipos de equipos.</li> <li>• El itinerario y el plan de transporte y los métodos para acomodar las rampas ascendentes.</li> </ul>
– Diseño de la estación de carga	<p>Las consideraciones incluyen el espacio físico, la preparación del área de carga para la instalación, la distancia y el estacionamiento, el cambio de batería, la distribución de potencia y la carga rápida.</p>
– Oportunidad de carga	<p>La carga se produce durante el tiempo fuera de servicio natural o impuesto por el proceso del BEV y no reduce la productividad.</p>
<b>Ventilación y enfriamiento</b>	<p>En los diseños del sistema de ventilación y enfriamiento en una mina eléctrica, se tienen en cuenta los parámetros de temperatura, polvo y velocidad del aire. Sin embargo, debido a la eliminación de diésel, es posible que no sean necesarios algunos aspectos de los criterios asociados con las regulaciones del DPM (material particulado diésel). Se deben consultar las regulaciones locales para obtener detalles específicos. Las consideraciones clave durante el desarrollo del diseño y la planificación de la ventilación incluyen las siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• tamaño, lugar y cantidad de ductos de ventilación;</li> <li>• calor;</li> <li>• disipación de gases de voladura;</li> <li>• monitoreo;</li> <li>• recirculación controlada;</li> <li>• presencia de gases (p. ej., radón);</li> <li>• polvo.</li> </ul>
– Carga térmica	<p>A pesar de la reducción del calor en los BEV, existen factores que contribuyen a que se genere calor, que incluyen la eficiencia, el índice de funcionamiento y el gradiente. El calor de otras fuentes (por ejemplo, el clima de verano en superficie, la autocompresión, el macizo rocoso, el agua subterránea) también contribuye a la carga térmica general. Estas fuentes no dependen del tipo de equipos utilizado, pero aun así el sistema de ventilación y enfriamiento de la mina debería poder controlarlas.</p>
– Polvo	<p>La consideración de los caudales de aire de ventilación puede contribuir a la eliminación de contaminantes de polvo; sin embargo, también puede crear nuevos riesgos si el caudal de aire es muy alto o muy bajo.</p>
– Radón	<p>Si se encuentran cantidades significativas de radón del yacimiento mineral, podrían necesitarse caudales de aire más grandes para controlarlo. Además, generalmente se necesita excavar más pozos de ventilación en las minas con radón que en las minas que no tienen radón.</p>
<b>Batería y seguridad en caso de incendio</b>	<p>Los BEV pueden tener baterías con elementos químicos y diseños variados, los cuales deben tenerse en cuenta específicamente en caso de un incidente que dañe la estructura de las baterías o haga que el BEV se incendie. El plan de emergencia es una consideración clave en caso de incendio de la batería. El OEM debe entregar los escenarios de incendio y las medidas de seguridad especiales según los tipos de baterías que proporciona. La guía general incluye los siguientes aspectos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se deben considerar el estado de los equipos y los planes de monitoreo para brindar prevención y detección temprana.</li> <li>• Se deben planificar estaciones de refugio en los niveles de producción y desarrollo en cada zona de minería para mitigar los riesgos.</li> <li>• Se debe asegurar que se entiendan los elementos químicos de la batería y las técnicas de extinción del fuego para el BEV. Se deben consultar las regulaciones locales para obtener detalles específicos.</li> <li>• En flotas mixtas, es probable que el personal de emergencia deba identificar rápidamente los elementos químicos de la batería interna de un BEV determinado y elegir la técnica de extinción apropiada.</li> <li>• Es posible que los incendios y el daño estructural conlleven a una operación de limpieza.</li> </ul>
<b>Capacitación</b>	<p>Todo el personal que trabaje con o en un BEV debe estar adecuadamente capacitado. Según la función del personal, se necesitan diferentes requerimientos de capacitación (por ejemplo, es probable que se deba entrenar a operarios sobre los nuevos criterios de inspección, los procedimientos de emergencia, los procedimientos de prueba y los procedimientos de arranque de los equipos).</p>

<b>Evaluación de riesgos</b>	<p>La evaluación de riesgos es un paso clave en la planificación operativa. Se deben tener en cuenta los siguientes riesgos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Riesgos económicos (por ejemplo, mayores gastos de capital en infraestructura, reemplazo anticipado de la batería).</li> <li>• Riesgos de producción (por ejemplo, la recuperación del vehículo descargado, impacto de la tasa de producción).</li> <li>• Riesgos para la salud y la seguridad (por ejemplo, incendio o explosión, choque eléctrico, falla de arco eléctrico).</li> <li>• Riesgos medioambientales (por ejemplo, cabezales de la batería gastados que son tóxicos para el medioambiente).</li> </ul>
------------------------------	--

## DISEÑO DE LOS VEHÍCULOS A BATERÍA

El diseño de un BEV comprende varios componentes diferentes y debería integrar una marcada relación entre el diseño del motor eléctrico y otros componentes del BEV.

Tema	Consideraciones principales
<b>Sistema de frenos</b>	<p>El freno reostático debería poder disipar la potencia del freno.</p> <p>El sistema de frenado regenerativo con baterías requiere una capacidad de reserva de la batería en la cual la energía se pueda devolver a la batería por medio de la línea de suministro.</p> <p>El sistema de la batería y el motor de tracción afectan los límites y la escasez de los frenos regenerativos.</p> <p>Un motor de tracción eléctrico necesita un suministro eléctrico para mantener a un vehículo estacionario contra una fuerza externa.</p>
<b>Sistema eléctrico de HVDC (corriente continua de alta tensión)</b>	<p>Se deben llevar a cabo estudios sobre el modelado del sistema, la corriente de falla y el arco eléctrico para confirmar que el BEV está diseñado de acuerdo con los principios de electricidad y que todos los componentes eléctricos pueden resistir el rango completo de tensión y corriente a las que se someten, y para calcular la energía incidente que estaría presente en caso de una falla de arco eléctrico.</p> <p>La protección contra sobrecorriente y sobretensión son fundamentales para evitar lesiones, que la batería se incendie y genere un daño irreparable al BEV.</p> <p>Los sistemas de monitoreo del aislamiento y la falla a tierra deben monitorear la energía de alta tensión entre el sistema eléctrico y el chasis del vehículo, y deben advertir al personal si existe un riesgo de choque eléctrico.</p>
<b>Sistemas de baja tensión y de control</b>	<p>Los sistemas de distribución de baja tensión y de control deben diseñarse evitar modos operativos o secuencias que generen una condición de falla o la falla de un componente, lo cual crearía un peligro.</p> <p>Debe usarse un circuito cerrado de enclavamiento de alta tensión para evitar la exposición directa a alta tensión.</p> <p>Debe incluirse una función de detención de emergencia en el diseño del BEV.</p> <p>Las interfaces del operario deben incluir señales visibles y sonoras para advertir al personal que un vehículo está en marcha y si existen alertas de seguridad críticas.</p> <p>Las evaluaciones de los riesgos deben incluir la identificación y el análisis de cualquier control de firmware o software que afecte directamente las funciones críticas o los riesgos identificados.</p>
<b>Áreas de mantenimiento y servicio de los equipos</b>	<p>Es posible que se requieran procedimientos especiales para los paquetes de baterías con el fin de bajar el potencial general hasta un valor de servicio aceptable.</p> <p>Se deben tener en cuenta la disposición y la manipulación de los componentes, los compartimentos y las cubiertas, las áreas de servicio, la señalización y las etiquetas para el diseño de las áreas de mantenimiento y servicio.</p> <p>Los OEM deben brindar planes y procedimientos recomendados para inspeccionar y mantener los BEV y sus componentes.</p>
<b>Interferencia eléctrica y de radio</b>	<p>Los BEV deben diseñarse conforme a las normas de compatibilidad electromagnética para no afectar los equipos o los dispositivos cercanos.</p>
<b>Transmisión</b>	<p>La configuración del motor de un BEV subterráneo depende del tipo y el tamaño del vehículo. Los detalles específicos clave que se deben considerar con respecto a los BEV incluyen los motores radiales o axiales, las bombas hidráulicas y el sistema de enfriamiento.</p>
<b>Choque eléctrico y vibración</b>	<p>Los BEV deben diseñarse para que cumplan con los perfiles de choque eléctrico y vibración del área de trabajo en la que se planea utilizarlos.</p>
<b>Seguridad en caso de incendio</b>	<p>El sistema debe diseñarse para ayudar a garantizar que el fuego en un vehículo no se propague a la batería.</p>

## SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA (BATERÍAS)

El sistema de almacenamiento de energía recargable (batería) es crucial para las operaciones de los BEV. La capacidad de almacenamiento de la batería (densidad de energía) limita el rango en el cual el BEV puede desplazarse o realizar su función entre cargas y es el principal obstáculo a la hora de la implementación, en particular en minería debido al peso elevado del vehículo y los requerimientos de energía.

	Tema	Consideraciones principales
REQUERIMIENTOS DE FUNCIONAMIENTO	BMS (sistema de gestión de baterías)	El BMS debe integrarse en el diseño del BEV para poder comunicarse con la infraestructura de carga y los subsistemas de apagado de emergencia.
	Gestión y pruebas térmicas	El BMS monitorea la temperatura, lo cual puede prevenir situaciones peligrosas y daños a la batería en caso de condiciones de temperatura alta.
	Rendimiento del ciclo y vida útil de la batería	Deben definirse las condiciones y los perfiles de uso, y se pueden aplicar procedimientos de pruebas adicionales a los sistemas para calcular mejor la vida útil de la batería.
	Apagado automático	El apagado automático del sistema debe diseñarse y evaluarse para que cumpla con las normas de seguridad pertinentes.
	Compartimento del sistema	El OEM proporciona las especificaciones de protección, como los requerimientos de ventilación y los puntos de levante designados, para el compartimento del sistema de la batería.
	Consideraciones de temperatura extrema	Dado que las baterías tienen rangos de temperaturas óptimas, es fundamental minimizar la cantidad de tiempo que permanecen fuera de ese rango para maximizar el rendimiento.
	Almacenamiento	El fabricante o el OEM de la batería debe definir por completo las condiciones de almacenamiento, como el rango de temperaturas y la vida útil de los componentes con y sin SOC (estado de carga) y los chequeos del buen estado de la batería.
	Final de la vida útil	Las baterías deben retirarse del servicio y descartarse de acuerdo con las leyes locales, o el personal capacitado puede repararlas para su uso extendido. Las tres opciones que se deben tener en cuenta son el descarte como desecho, el reciclaje y una segunda vida útil.
REQUERIMIENTOS DE SEGURIDAD	Condiciones peligrosas	Las condiciones peligrosas clave incluyen la carga y descarga a temperatura baja, la sobretensión o subtensión, la sobretemperatura, el cortocircuito externo e interno, el calentamiento externo, las reacciones químicas, la trituración mecánica, el choque eléctrico, la penetración y la rotura de una celda, lo cual provoca la liberación de líquidos o gases inflamables o tóxicos.  Entre los métodos clave para prevenir condiciones peligrosas, se incluyen los siguientes: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Datos del sensor que le indican a la unidad de control del BEV que realice una acción correctiva y que emita una alarma si la temperatura de la batería se encuentra fuera del rango operativo seguro.</li> <li>• Protección, uso y manipulación mecánicos apropiados de la batería.</li> </ul>
	Peligros en caso de incendio	Las baterías pueden verse comprometidas debido a condiciones físicas o peligrosas que producen un aumento en la temperatura, lo cual genera una fuga térmica y producción de gases inflamables y tóxicos.  El monóxido de carbono y el fluoruro de hidrógeno son riesgos especialmente peligrosos en incendios subterráneos debido a que ambos pueden propagarse por las zonas de minería.
	Extinción del fuego y respuesta ante este	La detección temprana del incendio de una batería y una respuesta práctica y eficaz ante incendios pueden evitar que los incidentes sean más graves. El agente extintor debe poder contener y enfriar el fuego generado en la batería y evitar que vuelva a encenderse.
	Transporte	Se deben consultar las regulaciones sobre transporte para transportar de manera segura los sistemas de baterías, BEV y piezas de repuesto que contienen baterías. Las baterías dañadas o sospechosas deben transportarse de acuerdo con las regulaciones aplicables.

## SISTEMAS Y MÉTODOS DE CARGA

Un sistema de carga de BEV generalmente consiste en un transformador reductor y de aislamiento, un sistema de rectificación o un suministro de CC (corriente continua) variable y un controlador del índice de carga. Algunas operaciones en minas dependerán de la disponibilidad de baterías completamente cargadas; por ende, es fundamental contar con un diseño adecuado en el sistema de carga.

	Tema	Consideraciones principales	
SISTEMAS DE CARGA	Consideraciones de seguridad	El cargador debe cumplir con las normas de seguridad regionales y debe diseñarse para que evite descargas eléctricas, peligros mecánicos y riesgos físicos.	
	Instalación del cargador	El cargador debe ser compatible con diferentes condiciones y con el tipo de almacenamiento de energía y la química utilizados, y debe estar dimensionado para el índice de carga apropiado.	
	Sistemas de potencia entrante	Se recomienda un estudio de la potencia para el diseño eléctrico subterráneo en general junto con varias otras consideraciones.	
	Funcionamiento y controles	Dos componentes clave son la visibilidad de control del operario y los terminales de apagado de emergencia.	
	Comunicaciones y monitoreo	Estos sistemas deben poder gestionar la carga, informar y monitorear la infraestructura de carga, notificar eventos al personal pertinente y priorizar cuál vehículo cargar y a qué nivel de potencia (si aplican restricciones a la carga o a la configuración de carga).	
MÉTODOS DE CARGA	Carga interna (on board)	Puede ser una buena opción para flotas mixtas o si no es posible tener una infraestructura fija adicional.	
		<i>Ventajas</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay una infraestructura de carga aparte.</li> <li>• Flexibilidad de la ubicación de carga.</li> <li>• Tiempo fuera de servicio reducido.</li> </ul>	<i>Desventajas</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El peso y el tamaño adicionales de los cargadores pueden limitar el tamaño y el rango de la batería.</li> <li>• Desafíos de diseño a la hora de colocar el cargador en los equipos.</li> <li>• Los equipos de carga están expuestos a condiciones extremas.</li> <li>• Menor capacidad de potencia.</li> </ul>
	Carga externa (off board) de baterías internas	Puede ser una buena opción si se requieren cargadores de alta potencia o si se opera una flota de BEV grande.	
		<i>Ventajas</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menos equipos a bordo.</li> <li>• Tamaño y peso reducidos.</li> <li>• Cargadores en ubicaciones sin contaminantes.</li> <li>• Los BEV pueden compartir cargadores.</li> </ul>	<i>Desventajas</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se necesita una infraestructura fija (especialmente compleja en minas grandes).</li> <li>• El BEV debe moverse a una ubicación específica para cargarlo.</li> <li>• Se necesitan baterías con alta capacidad de potencia.</li> </ul>
	Carga externa de baterías externas (cambio)	Puede ser una buena opción si se requieren recorridos largos cuesta arriba, especialmente si se implementan BEV en minas existentes. Este método también comparte algunas ventajas con la carga externa de baterías internas.	
	<i>Ventajas</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es posible que mejore la productividad (por ejemplo, que no tenga que retirarse del servicio para la carga).</li> <li>• Se requiere menos potencia del cargador.</li> <li>• Menos requerimientos de infraestructura (por ejemplo, estacionamiento designado).</li> </ul>	<i>Desventajas</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se necesitan mecanismos e infraestructura adicionales, ya sea de manera interna o externa para facilitar el cambio (extracción y montaje).</li> <li>• Se necesitan muchos cargadores y baterías.</li> <li>• Hay menos flexibilidad y puede ser difícil de normalizar.</li> <li>• La gestión del inventario de baterías puede ser un desafío.</li> </ul>	
Híbrido	Una combinación de disposiciones internas y externas puede ofrecer algunos beneficios para ambos casos.		
Cargadores propios externos	Los OEM pueden desarrollar y suministrar cargadores propios externos. Las pruebas y las implementaciones a escala pequeña podrían beneficiarse de la sencillez de no necesitar manipular múltiples sistemas.		

## TIPOS DE INTERFACES DE CARGA Y CONEXIÓN

Las interfaces de carga y conexión pueden variar según el método de carga elegido, la región y el diseño de los equipos. La normalización se recomienda tanto como sea posible.

Tema	Consideraciones principales
<b>Carga interna de la interfaz de suministro de CA (corriente alterna)</b>	<p>En las normas IEC 62196-1, IEC 62196-2 y IEC 62196-3, se definen los tipos de conectores, los cuales pueden variar según la región.</p> <p>La interfaz generalmente se utiliza para la consideración y la carga a un índice bajo.</p> <p>Se recomienda utilizar un cable de salida largo fácil de reemplazar.</p>
<b>Interfaz de carga externa con operación manual</b>	<p>Generalmente, se requieren múltiples conectores de CC (corriente continua).</p> <p>Las dos versiones de sistemas de carga combinados, CCS-tipo 1/combo 1 y tipo 2/combo 2, son las más utilizadas en la minería.</p> <p>Para cargadores con un cable para conectarse a un BEV, se recomienda tomar precauciones para evitar daños.</p>
<b>Interfaz de carga externa automatizada</b>	<p>Los posibles beneficios con respecto a las interfaces manuales incluyen ahorro de tiempo, más comodidad, confiabilidad y disponibilidad a futuro.</p> <p>Las posibles desventajas incluyen un mayor costo inicial, más peso y más complejidad debido a la cantidad de componentes.</p> <p>Los tipos de interfaces de carga automatizada incluyen sistemas pantógrafo montados sobre la infraestructura, sistemas de pernos y enchufe (hembra) cerrados y sistemas inductivos.</p>
<b>Cambio de la batería e interfaz de carga</b>	<p>Se recomienda utilizar un conector duradero para acomodar muchos ciclos de conexión y desconexión.</p> <p>El conector debe poder entregar los requerimientos de alta potencia para baterías que se deben cargar a índices muy rápidos.</p> <p>La interoperabilidad es un desafío clave.</p>

## NORMAS DE RENDIMIENTO

Una vez que la mina eléctrica está funcionando, se deberían recopilar y analizar datos para evaluar su rendimiento. El ciclo de trabajo puede ser más complejo que en vehículos a diésel porque se debe evaluar la forma en la que los equipos obtienen la energía (es decir, el método de carga). La carga y el cambio de la batería también pueden afectar la disponibilidad y el uso.

Tema	Consideraciones principales
<b>Rendimiento de los equipos</b>	<p>Los parámetros de rendimiento de los equipos incluyen requerimientos generales, evaluación del rendimiento de los equipos, sistemas de frenado regenerativos, especificaciones, impacto de los neumáticos y la calzada sobre el rendimiento de los BEV y la generación de calor.</p> <p>Las consideraciones de rendimiento clave incluyen las siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La capacidad para lograr la misma salida o una mejor para un ciclo de trabajo determinado como una unidad diésel comparable.</li> <li>• Los requerimientos de energía para llevar a cabo el ciclo de trabajo y la cantidad de dichos ciclos que la batería puede durar antes de que se requiera cargarla.</li> <li>• El tiempo necesario para cargar o cambiar la batería.</li> </ul>
<b>Rendimiento de la batería</b>	<p>Las consideraciones incluyen la determinación de la vida útil de la batería, la vida útil del ciclo, el buen estado, los índices de carga y descarga, la DOD (profundidad de descarga) y la estimación de la temperatura de carga.</p>
<b>Rendimiento del cargador</b>	<p>Es importante comprender el momento en que se debe cargar, la ubicación de las estaciones de carga y las posibles consideraciones de carga según la disponibilidad de potencia en la mina.</p>