
TÍTULO: PROTOTIPO UNIDAD MOVIL AUTONOMA PARA LA SENSIBILIZACIÓN QUÍMICA DE AGENTES DE VOLADURA TIPO EMULSIÓN EN OPERACIONES SUBTERRANEAS DE PEQUEÑO DIAMETRO CON SECCIONES REDUCIDAS DE ACCESO.
(UBS SERIE 700X).

TITLE: AUTONOMOUS MOBILE PROTOTYPE UNIT FOR CHEMICAL SENSITIZATION OF EMULSION TYPE BLASTING AGENTS IN SMALL DIAMETER UNDERGROUND OPERATIONS WITH REDUCED ACCESS SECTIONS.
(UBS SERIES 700X).

Autor: Diego Alexander Benavides Hernández¹.

Resumen: En la actualidad, las condiciones geológicas generadas por los procesos exógenos y endógenos ha permitido que el subsuelo colombiano sea atractivo para el fortalecimiento de la inversión tanto nacional como extranjera, constituyendo así uno de los motores de desarrollo económico de la nación mediante la selección de métodos de minería que económica, técnica, ambiental y socialmente se adapten a las necesidades cambiantes del mercado satisfaciendo la demanda en cuanto a la extracción de diferentes tipos de minerales. Sin embargo, los yacimientos encontrados cada vez son más difíciles de delimitar, explorar y desarrollar debido a la geología propia de los macizos rocosos y a las calidades subyacentes de los minerales extraídos, haciendo necesario para la sostenibilidad de las organizaciones la introducción de técnicas de extracción más complejas que proporcionen la mayor tasa de retorno en la inversión y que genere la estabilidad estructural de las obras durante las actividades del ciclo minero. Con el propósito de contribuir al cumplimiento de esos objetivos estratégicos de los clientes de la Industria Militar, se diseña la primera unidad móvil de fabricación in situ autónoma del país para la sensibilización química de agentes de voladura tipo emulsión en operaciones de ingeniería y/o minería subterránea de **pequeño diámetro con secciones reducidas**, la cual mediante un sistema de despacho controlado por PLC (*Controlador lógico programable*), garantiza el monitoreo de los parámetros de cargue y la precisión en la adición de aditivos químicos bajo condiciones de presión, caudal y temperatura de forma segura.

Abstract: At present, the geological conditions generated by exogenous and endogenous processes have allowed the Colombian subsoil to be attractive for the strengthening of both national and foreign investment, thus constituting one of the engines of economic development of the nation through the selection of Mining methods that economically, technically, environmentally and socially adapt to the changing needs of the market, satisfying the demand for the extraction of different types of minerals. However, the deposits found are increasingly difficult to delimit, explore and develop due to the geology of the rocky massifs of the national territory and the underlying qualities of the extracted minerals, making it necessary for the sustainability of organizations to introduce more complex techniques for extraction processes that provide the highest rate of return on investment and that generate the structural stability of the works during the mining cycle activities. In order to contribute to the fulfillment of these strategic objectives of the clients of the Military Industry, the first mobile autonomous manufacturing unit in the country is designed for the chemical sensitization of emulsion-type blasting agents in engineering and / or mining operations **underground of small diameter with reduced sections**, which by means of a dispatch system controlled by PLC (*Programmable Logic Controller*) guarantees the monitoring of the loading parameters and the precision in the addition of chemical additives under safe conditions of pressure, flow and temperature.

Palabras claves: Agente de Voladura, UBS, Minería Subterránea, Emulsiones Explosivas, Sostenibilidad.

Keywords: Blasting Agent, UBS, Underground Mining, Explosives Emulsions, Sustainability.

¹Ingeniero Químico, Msc. Gerencia de producción y Operaciones, Profesional Grupo de Ingeniería, Fábrica de Explosivos Antonio Ricaurte, Sibató Cundinamarca, dbenavid@indumil.gov.co.

1. INTRODUCCIÓN.

Con un PIB de USD 271.460 millones (2020) Colombia se clasifica como la cuarta economía más grande de América Latina, después de Brasil, México y Argentina reflejando una política de desarrollo económico estable de la cual el sector minero representa alrededor del 2% del PIB generando una importante fuente de empleos directos e indirectos a través de un amplio encadenamiento de todos sus procesos productivos posicionando su economía como una de las más competitivas y atractivas de la región.

Su ubicación geográfica ha permitido el desarrollo de dieciséis (16) tratados comerciales, doce (12) acuerdos internacionales suscritos para la protección de la inversión y doce (12) acuerdos de doble tributación, incrementando así las oportunidades de inversión, las condiciones comerciales con más de 60 países y logrando que el componente de inversión extranjera sea favorable y determinante para atender las necesidades latentes del mercado internacional en cuanto a la producción y exportación de minerales como el carbón (*metalúrgico, térmico y antracitas*), metálicos (*níquel, cobre, hierro*), metales preciosos (*oro, plata, esmeraldas*) y materiales para el desarrollo de las actividades propias de la industria nacional entre otros (*materiales de construcción*).

Actualmente, el territorio nacional cuenta con 114 millones de hectáreas de las cuales solo el 5% se encuentran tituladas para la actividad minera y cuyo porcentaje está distribuido de acuerdo con:

- ε Fase de exploración 2,3%.
- ε Construcción y montaje 1,6%.
- ε Desarrollo de procesos de explotación 1,1%.

Adicionalmente, los 9.602 títulos mineros que se encuentran vigentes en el territorio nacional comprenden 312 tipos de minerales clasificados en ocho (8) grandes grupos de acuerdo con el uso propio de cada mineral y a sus componentes de explotación. Asimismo, la formación geológica del territorio colombiano en la cordillera de los Andes diversifica los incomparables ambientes geológicos permitiendo la prospección, exploración subterránea y posterior explotación de minerales metálicos.

Complementando la información mencionada, se resalta que Colombia se sitúa como el sexto productor de industria aurífera de Latinoamérica, ya que para el año 2020 generó una producción de 47,6 toneladas de oro incrementando así en un 30% los resultados obtenidos durante el 2019, lo cual llevó a identificar que el territorio nacional cuenta con importantes y potenciales yacimientos de este mineral sobretudo en la región Andina y Pacífica donde las fases de exploración han

permitido el descubrimiento de depósitos de oro de clase mundial (*Marmato, Gramalote, Buriticá, Remedios, Amalfi y Segovia entre otros*), apalancando en los próximos cinco (5) años que el país se posicione dentro de los quince (15) mayores productores mundiales de oro. A continuación, se presenta la distribución de los kilogramos de oro producido en Colombia por cada departamento.



Imagen 1. Producción de oro en Colombia.

De igual manera, se encuentran importantes depósitos esmeraldíferos en la zona centro país, ubicando a Colombia como el mayor productor de esmeraldas de alta calidad en el mundo.

Con respecto al cobre, Colombia es un país poco explorado para este tipo de yacimientos; sin embargo, existen importantes manifestaciones del mineral en los departamentos de Córdoba, Chocó, Antioquia y Nariño. Su alto potencial cuprífero de acuerdo a los estudios de exploración realizados, permitiría incrementar su producción por encima del 1.000% posicionando al país como uno de los 25 principales productores en los próximos 5 años. A continuación, de acuerdo al sistema integral de gestión minera desarrollado por la Agencia Nacional de Minería (ANM), se observan la distribución de los diferentes minerales en el territorio nacional.



Imagen 2. Producción de minerales en Colombia.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

Gracias a los recursos minerales existentes en el territorio colombiano, la necesidad de importarlos para la fabricación de un amplio número de productos es mínima, salvaguardando de esta manera la estabilidad de precio e inflación propios del mercado. Sin embargo, acceder a estos minerales en operaciones subterráneas de pequeño diámetro requiere de una inversión auto sostenible que permitan el desarrollo de la operación minera, razón por la cual ha sido necesaria la formalización, regulación e implementación de diferentes registros de comercialización que promuevan el desarrollo de una minería responsable mediante el monitoreo, inspección y control de la estabilidad tanto física como química del yacimiento.

La Industria Militar en cumplimiento con su pensamiento organizacional, cultura corporativa y responsabilidad social con sus grupos sociales objetivo, ha desarrollado soluciones de ingeniería para atender las necesidades de consumo de agentes de voladura tipo emulsión sensibilizadas químicamente, por lo que actualmente cuenta con diez (10) unidades de bombeo para tunelería (*UBT hidráulicas y eléctricas*) con capacidades de almacenamiento de emulsión matriz que oscilan entre los 1.300 kg y 1.500 kg, las cuales por su dimensionamiento no permiten realizar el cargue mecanizado de emulsiones explosivas a granel en secciones reducidas. En este sentido, en la actualidad un amplio sector de clientes realiza el cargue de explosivos en sus áreas de forma manual utilizando agentes de voladura como ANFO y explosivos encartuchados como Indugel Plus AP, Indugel Plus PM y Emulind-E para la extracción de minerales, lo cual requiere de alta disposición de mano de obra, tiempos prolongados de exposición y elevados controles asociados a los costos de escolta, almacenamiento y/o voladuras secundarias, razón por la cual es determinante para el mejoramiento de los ciclos de perforación y voladura (*P&V*) la introducción de equipos mecanizados que agilicen el desarrollo de las actividades de forma controlada y segura.

3. DETALLES DEL SISTEMA.

Es un sistema automatizado a través de un lazo de control cerrado que permite garantizar la gasificación química del agente de voladura y realizar el cargue mecanizado a fondo de barreno especialmente diseñado para secciones pequeñas de túneles y galerías de desarrollo horizontal.

La programación del lazo de control es monitoreada y ajustada por el personal técnico in situ en función de las condiciones del terreno y la temperatura de la emulsión matriz. La adecuada precisión en la dosificación de los aditivos permite la cinética del proceso de gasificación mediante la regulación de velocidad de formación de burbujas de N₂ gaseoso que al

ser comprimidas adiabáticamente producen el fenómeno de puntos calientes obteniendo emulsiones con densidades de copa que pueden variar entre 1,15 g/cm³ ± 0,05 g/cm³ durante un periodo de gasificación que varía entre 15 min y 20 min generando un esponjamiento promedio del 15% del material explosivo cargado.

4. RESULTADOS.

Para dar alcance a la visión estratégica de la Industria Militar propuesta para el año 2030, donde se contempla la consolidación de la organización como referente regional e innovador en el suministro de productos de alta calidad y tecnología, fue necesario realizar el diseño de una unidad de móvil autónoma de sensibilización que permitiera en el corto plazo ampliar el portafolio de servicios de suministro mecanizado de agentes de voladura in situ para los clientes de minería subterránea de pequeño diámetro con secciones reducidas de acceso en Colombia.

Dicho prototipo cuenta con una capacidad de almacenamiento de 300 kg permitiendo la sensibilización de agentes de voladura tipo emulsión (*W/O*) en diámetros de perforación que oscilan entre 1" y 4" y longitudes de barrenación de hasta 5 m. La producción in situ con cargue mecanizado al barreno se adapta a las condiciones particulares de los diseños de voladura de los clientes con una tasa de entrega nominal entre 15 kg/min y 30 kg/min garantizando el bombeo del producto sensibilizado a una distancia superior a los 30 m de donde puede acceder el equipo.

La complejidad de los yacimientos subterráneos para la extracción de minerales hace necesario que los controles para el sostenimiento de los túneles de acceso y de producción sean más precisos e imprescindibles que los que se desarrollan en los túneles viales evidenciándose condiciones ambientales agresivas como temperaturas superiores a 40 °C y niveles muy altos de humedad, razón por la cual el equipo debe permitir a los clientes no solo obtener fragmentaciones homogéneas en las secciones cargadas, sino generar el menor daño posible a la roca circundante disminuyendo los tiempos de exposición y mitigando así las condiciones de seguridad sub-estándar que finalmente puedan materializarse en posibles derrumbes, daños a maquinaria, personal y/o equipos impactando negativamente los indicadores (*KPI's*) que evalúan la gestión empresarial de los clientes en cada uno de sus procesos.

Basado en lo anterior, el uso de una unidad móvil de sensibilización química de emulsiones explosivas cargadas mecánicamente con unidades de bombeo, permite proporcionar una oferta de valor a los clientes a través de las siguientes ventajas competitivas:

- **Seguridad Industrial y Salud en el Trabajo.**

1. Durante las etapas de almacenamiento, transporte, transferencia y bombeo se manipula un producto no sensible.
2. La emulsión cargada tiene baja sensibilidad a la fricción y al impacto.
3. Menores características de gases post-voladura por adecuado balance de oxígeno, que ocasiona baja emisión de CO y NOx, disminuyendo hasta en un 30% los tiempos de ventilación forzada.
4. Menor riesgo ergonómico por uso de manguera para el cargue mecanizado.
5. Menor necesidad de mano de obra directa.
6. La sensibilización química de la emulsión será controlada por el PLC, según las características del medio durante el suministro (*Temperatura y pH*).
7. La estructura del equipo cuenta con puntos de anclaje, así como elementos que permitan su izamiento para ser transportado en un sistema de rieles y/o en camioneta con tracción 4x4 de forma segura.

- **Especificaciones técnicas.**

1. Permite la manipulación de un producto con inherente resistencia al agua.
2. Mejora el factor de eficiencia energética con respecto a los explosivos encartuchados, obteniéndose una fragmentación homogénea en toda la sección cargada y un grado de avance superior al 95% con un factor de acoplamiento del 100 % en función del comportamiento geomecánico y la caracterización de los macizos rocosos.
3. Permite la disminución de los ciclos de perforación y voladura (*P&V*) y de densidad de barrenación, lo que deriva en mejores rendimientos del ciclo minero y en disminución de costos globales.
4. La estructura de soporte integra mecánica y electrónicamente todos los sistemas que conforman la unidad de bombeo para el ingreso del equipo a zonas de acceso con inclinaciones entre 45° y 60°.
5. No se genera pérdida de producto durante la operación de cargue mecanizado.
6. Menor daño a la roca circundante por la variación de densidad de acuerdo a la dureza y calidad del terreno.
7. Reducción promedio del 45% del volumen actual que ocupan las unidades de bombeo en tunelería (*UBT*).

- **Operación.**

1. Permite el cargue mecanizado a fondo de barreno en secciones reducidas de difícil acceso de hasta 9 m².
2. El equipo se puede adaptar a voladuras de producción, techo, contorno y banqueo.
3. Manejo de alta confiabilidad en preservación ambiental.
4. El controlador lógico programable del equipo, regula las variables de operación en función de la presión, la temperatura y la totalización parcial y acumulativa tanto de materias primas como de producto terminado.
5. El equipo cuenta con transmisores de presión, sensores de temperatura, sensores de flujo y disco de ruptura para garantizar las condiciones de seguridad durante la operación de mezclado, bombeo y cargue.
6. El equipo garantiza el cargue mecanizado de agente de voladura a fondo de barreno con dos (2) operadores (*Equipo y Manguera*).
7. Permite disminuir hasta un 15% la cantidad de perforaciones, manteniendo el rendimiento de avance de las secciones cargadas.

5. IMPACTO INSTITUCIONAL.

Los clientes del sector de extracción de minerales en Colombia no solo son estratégicos para cumplir a conformidad con las políticas, lineamientos, estrategias y prioridades establecidas por el Gobierno Nacional, sino que son determinantes para el desempeño de los objetivos gerenciales planteados en la organización a través del plan estratégico correspondiente al cuatrienio 2019 – 2022.

Los lineamientos estratégicos de la estructura organizacional que se impactan con el desarrollo y la adquisición de este equipo son:

☞ **Modernización institucional:** Fortaleciendo los procesos productivos mediante el desarrollo de soluciones de ingeniería innovadoras que atiendan con calidad y oportunidad los requerimientos y necesidades de las partes interesadas.

☞ **Alianzas estratégicas:** A través de la creación de nuevas capacidades en cuanto a la prestación de servicios técnicos que aumenten la eficiencia de las etapas del ciclo de perforación y voladura (*P&V*) de los clientes.

☞ **Gestión del talento humano y del conocimiento:** A través del desarrollo de programas de capacitación que permitan fortalecer las competencias del personal para la prestación de

servicios especializados de asesoría y evaluación técnica de cargue mecanizado de emulsiones explosivas en operaciones subterráneas.

- ⊗ **Seguridad en los procesos:** Mediante el diseño y la adquisición de equipos de vanguardia que mejoren la integridad de los sistemas productivos y los procesos de la cadena de valor, a través de la aplicación de soluciones ingenieriles inherentemente seguras (*SIS*).

6. CONCLUSIONES.

- ⊗ El dimensionamiento del equipo facilita cautivar nuevos segmentos de mercado garantizando el cargue de agentes de voladura tipo emulsión bajo especificación técnica.
- ⊗ El desarrollo del prototipo permite en el corto plazo la transformación organizacional de clientes que utilizan explosivos encartuchados para sus procesos de voladura en operaciones subterráneas de secciones reducidas.
- ⊗ El equipo garantiza la operación segura, eficiente y con alta productividad de cargue mecanizado mediante la variación de densidad de acuerdo a la dureza de la roca y las necesidades particulares de cada diseño de voladura.

7. RECOMENDACIONES.

- ⊗ Debido a la baja capacidad de la tolva de almacenamiento de emulsión matriz (300 kg) y los tanques de almacenamiento de aditivos y agua para el anillo de lubricación, es necesario garantizar niveles de consumo de agente de voladura óptimos para promover la rentabilidad de la operación de servicio de cargue mecanizado.
- ⊗ Con el desarrollo del prototipo se determinarán los elementos de entrada necesarios para satisfacer las expectativas de consumo de diferentes sectores de desarrollo económico, razón por la cual se recomienda realizar un registro del conocimiento adquirido a través de las lecciones aprendidas para permitir a la organización la formulación de estrategias de posicionamiento en el mercado basado en las condiciones geológicas y de operación de los clientes.

8. TRABAJO FUTURO.

- ⊗ De acuerdo a la metodología para la gestión de la investigación, desarrollo e innovación descrita en el documento **IM OC SGT PR 003 Rev.9** una vez fabricado y validado el prototipo se realizará a través del diseño de la ingeniería al detalle la

evaluación técnica, jurídica y económica que permita la asignación de recursos para la compra de unidades que atiendan las necesidades de servicio de cargue al barreno para secciones reducidas de minería subterránea del país.

- ⊗ Definir con la Subgerencia Comercial (*SGC*) los objetivos y estrategias de introducción y posicionamiento del equipo, con el propósito de atender las necesidades de consumo de agentes de voladura para la extracción de minerales subterráneos mediante la creación, desarrollo e innovación de nuevos servicios técnicos especializados.
- ⊗ Definir con Subgerencia técnica (*SGT*) las necesidades de ajuste de formulación de agentes de voladura tipo emulsión y las condiciones logísticas y de operación necesarias para garantizar el servicio de cargue mecanizado bajo especificación técnica.

9. AGRADECIMIENTOS.

- ⊗ A la Industria Militar por la asignación de recursos que permitan desde el procedimiento de investigación y desarrollo (*DID*), la introducción de soluciones de ingeniería innovadoras con dispositivos inherentemente seguros (*DIS*) para satisfacer las necesidades del mercado.
- ⊗ Al acompañamiento de la Dirección FEXAR, División de Producción (*DVP*) y áreas de apoyo durante la fase de investigación y vigilancia tecnológica que permitieron el diseño, desarrollo y posterior ejecución del equipo.
- ⊗ El presente proyecto de investigación y desarrollo fue estructurado, validado y liderado desde el *Grupo de Ingeniería* de la **Fábrica de Explosivos Antonio Ricaurte**.

10. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Statista. (2021). Producto interno bruto por país en América Latina y el Caribe en el 2020: <https://es.statista.com/estadisticas/1065726/pib-por-paises-america-latina-y-caribe/>
- [2] Agencia Nacional de Minería (2021) Así es nuestra Colombia Minera: <https://www.anm.gov.co/?q=Asi-es-nuestra-Colombia-minera>
- [3] Agencia Nacional de Minería (2021) Así es nuestra Colombia Minera: Colombia logró en 2020 la producción de oro más alta de los últimos cuatro años <https://www.anm.gov.co/?q=colombia-logro-en-2020-la-produccion-de-oro-mas-alta-de-los-ultimos-cuatro-años>

[4] Oyarzun (2011). Introducción a la geología de minas https://eprints.ucm.es/id/eprint/13269/1/Libro_Geologia_Minas.pdf

[5] Banco de la república. Informe de política monetaria https://repositorio.banrep.gov.co/bitstream/handle/20.500.12134/10012/IPM_ABR%202021.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[6] Statista. (2021). Países líderes en la producción de oro a nivel mundial. <https://es.statista.com/estadisticas/635361/paises-lideres-en-la-produccion-de-oro-a-nivel-mundial/>

[7] Servicio geológico colombiano (2021) Recursos minerales de Colombia Vol. 1. <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSerias/Documents/recursos-minerales-de-colombia-vol-1.pdf>

[8] EITI Colombia (2021). Iniciativa para la transparencia de las industrias extractivas en Colombia-Títulos Minería. <https://www.eiticolombia.gov.co/es/datos-del-sector/>

[9] Ministerio de Minas y Energía (2018) Realidades de la minería en Colombia. https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24062340/041218_cartilla_mitos_realidades_mineria_2018.pdf/07e4445a-bcf1-4919-895a-eb2d84a89dd8

[10] Industria Militar. Plan estratégico 2019-2022 y plan de acción 2020. <https://www.indumil.gov.co/wp-content/uploads/2020/01/PLAN-ESTRAT%C3%89GICO-2019-2022-Y-PLAN-DE-ACCI%C3%93N-2020.pdf>

[11] Industria Militar (2019). IM OC SGT PR 003 Rev. 9. Procedimiento de investigación, desarrollo e Innovación.

[12] Departamento de explotación de recursos minerales y obras subterráneas (2013) Perforación y voladura de rocas en minería Industria http://oa.upm.es/21848/1/20131007_PERFORACION_Y_VOLADURA.pdf