



Facultad de Ingeniería
INGENIERÍA INDUSTRIAL

Trabajo de Grado – Segundo Semestre 20

**[191008] DISEÑO DE UN APLICATIVO PARA LA PROGRAMACIÓN
DE LA PRODUCCIÓN EN UNA MINA DE CARBÓN SUBTERRÁNEA DE
BOYACÁ, COLOMBIA**

**Natalia Duque Borrero ^{a,c}, Yudy Tatiana Pedraza Torres ^{a,c}, David Muñoz Castaño ^{a,c},
Cristian Camilo Vasquez Sanchez ^{a,c}**

Iván Poveda González ^{b,c}

^a Estudiantes de Ingeniería Industrial

^b Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^c Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen de diseño en Ingeniería.

This project proposes a solution for the production programming problem in a low-scale underground coal mine located in Boyaca, Colombia. Currently, the mine has a low level of production compared to similar sized mines, due to the inadequate assignment of shifts, lack of internal transport planning, high production variability, lack of planning in mining activities, among other causes.

The objective of this work is to: Design a model for production programming, aimed to an underground coal mine named Los Arrayanes S.A.S located in Boyacá, Colombia. This project follows these specific objectives: (1) Make an efficiency study that establish the real capabilities of the mine's process. (2) Design a dynamic optimization model that schedules the mine's daily production, maximizing profits during the period studied. (3) Develop an application that allows the execution of the optimization model for scheduling the mine's production. (4) Compare the programming model with the current method, for showing the benefits of making decisions with the designed application.

According to the mine requirements, the application was designed in Microsoft Excel which uses an optimization model integrated in SolverStudio and a FIFO dispatch rule algorithm in VBA. This design accomplishes the ISO 25000 standard which evaluates the quality of the software product.

For the fulfillment of the objectives, four stages were considered: efficiency study, dynamic linear optimization model, application design and results analysis. In the first stage, a description and analysis of the current process was made, the necessary data was collected and the standardization of times was made. In the second stage, a linear programming model was designed to maximize the mine monthly profits. In the third stage, was designed an application that allows the production programming. In this application are considered some restrictions as working hours, precedence of unloading, precedence between minecarts of a placement, minimum and maximum production and availability of minecarts. Finally, the efficiency of the application was evaluated considering three different scenarios and a comparison with the current situation was made.

With this research, an improvement in the production was obtained, it is near to the 13% compared to the current method, due to the times standardization. Likewise, it was possible to increase the operating profit by 26,14%. These results were obtained using the integrated optimization model.

Keywords: *Production Schedule, Underground Coal Mining, Linear Programming, Software.*

1. Justificación y planteamiento del problema.

La minería carbonífera en Colombia es una fuente de crecimiento económico. Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE (2017), la minería de carbón en Colombia contribuye en 1,20% del PIB total equivalente a 2,40 billones de pesos, de ese porcentaje: 7,25% proviene de la minería subterránea y 92,75% de la minería a cielo abierto. Según la Unidad de Planeación Minero Energética UPME (2014), la actividad minera genera 202 mil empleos directos e indirectos concentrados principalmente en los departamentos de Cundinamarca, Guajira, Cesar, Boyacá y Antioquia. De este modo, la extracción de carbón es un mercado en proyección y pilar para el desarrollo social y económico del país.

El departamento de Boyacá es uno de los mayores productores de carbón térmico y coquizable. Las principales minas de la región son artesanales y de pequeña escala que representan a pequeños productores, familias y comunidades. Las minas que operan bajo la modalidad artesanal y de pequeña escala se caracterizan por presentar bajos niveles de producción, poca inversión en la seguridad de los mineros, baja calidad en la infraestructura de exploración y otros factores que pueden llevarlas al incumplimiento de la normatividad minera (Plan de desarrollo, 2015). Por lo tanto, las minas de pequeña escala requieren investigación, tecnología y apoyo por parte de las entidades estatales que les permitan ser competitivas en el mercado.

Una de las opciones para ser más competitivas es la utilización de herramientas cuantitativas para la toma de decisiones, facilitando la operación de extracción de carbón. Estas herramientas permiten analizar de forma integral las variables inmersas al proceso minero y a su vez, les brindan información relevante para el mejoramiento de la eficiencia de las diferentes actividades desarrolladas en la mina (Castro,2014). Además, si estas herramientas emplean modelos basados en optimización podrán realizar una planificación de excelente calidad, ajustada a la incertidumbre que hoy en día pasan por alto las compañías mineras en el país (Sepúlveda & Gómez,2015).

Adicionalmente, las empresas carboníferas de pequeña escala tienen altos costos logísticos y de producción haciéndolas poco competitivas frente a empresas más tecnificadas y con mejor infraestructura. Una forma de reducir los costos operativos es la aplicación de estándares óptimos de trabajo en las principales operaciones mineras (Jáuregui,2011). De igual forma, en la medida que las empresas mineras extraigan un mayor número de toneladas de carbón podrán disminuir costos de transporte y producción (Castro,2014). Por lo tanto, si las pequeñas minas estandarizan sus operaciones y maximizan las toneladas producidas, disminuirán sus costos operativos y se adaptarán a las exigencias del mercado.

Este trabajo se llevará a cabo en una mina de carbón térmico de pequeña escala dedicada a la extracción del mineral y a la comercialización en bruto, ubicada en el municipio de Corrales en el departamento de Boyacá, Colombia. Este proyecto minero cuenta con dos bocaminas registradas, La Moneda y La Sixtina.

Situación actual de la mina caso de estudio.

Para este proyecto minero se procede a realizar una comparación con minas subterráneas de carbón de pequeña escala ubicadas en el departamento de Boyacá. La comparación se hizo con el promedio de la producción histórica de los meses comprendidos entre julio/2018 y enero/2019.



Figura 1. Comparación de los niveles de producción.
Fuente, Propia.

La mina de carbón de objeto de estudio está presentando un bajo nivel de producción comparado con minas similares de la región. Según (Ferro et al.,2011) el 85% de las minas de carbón en Boyacá corresponden a pequeños propietarios que tienen una producción mensual de hasta 1000 toneladas. Al comparar estos datos con la producción histórica de la mina de estudio, se evidencia que la producción está por debajo del promedio (**ver Figura 1**). Por lo tanto, es necesario identificar las causas de la baja productividad y así mismo, lograr una producción cercana a la que poseen minas de carbón con las mismas características.

Una vez realizada la comparación de la mina con el entorno, se procede a analizar la participación que tiene cada bocamina sobre la producción total de carbón de esta.

Producción Total en toneladas

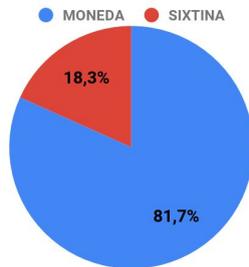


Figura 2, Participación en la producción total por bocamina..

Fuente,Propia.

En la **Figura 2** se observa que la bocamina La Sixtina tiene una baja participación en la producción correspondiente al 18,3% del total. Esto se debe a que La Sixtina se encuentra en etapa de exploración lo que hace que su enfoque esté orientado a la planeación de las diferentes excavaciones y no a la extracción de carbón en sí. Por estas razones, se decide desarrollar este proyecto en la bocamina La Moneda.

Teniendo en cuenta lo anterior, se presentará el comportamiento histórico de esta bocamina en el periodo comprendido entre julio/2018 y enero/2019, el cual está representado en la siguiente tabla.

Análisis de la producción diaria en toneladas de la bocamina La Moneda				
Mínima producción	Máxima producción	Producción promedio	Desviación estándar de la producción	Coefficiente de variación (%)
10	65	31	13,5	44%

Tabla 1, Análisis de la producción diaria de la bocamina seleccionada para el estudio..

Fuente,Propia.

En la **Tabla 1**, se puede observar que hay días en los cuales se producen hasta 65 toneladas, mientras que en otros días la producción llega a ser de tan solo 10 toneladas, esta situación genera una variación del 44% en la producción diaria de la bocamina La Moneda. En síntesis, esta alta variabilidad muestra la ineficiencia general del sistema y conlleva a determinar la razones por las cuales el proceso actual no es capaz de mantener una producción promedio diaria cercana a la máxima registrada.

Identificación de la causa raíz del problema.

Considerando que la producción de la mina de estudio es inferior al promedio del sector, es necesario identificar las causas del problema de la baja productividad. Para ello, se realizó una entrevista a los directivos y operativos de la empresa. Así mismo, se utilizó la metodología de observación directa de las operaciones realizadas al interior de la mina. A partir de la información recolectada, se elaboró un diagrama de causa-efecto en el que se agruparon las sub-causas identificadas en las M's respectivas (Simonassi,2009).

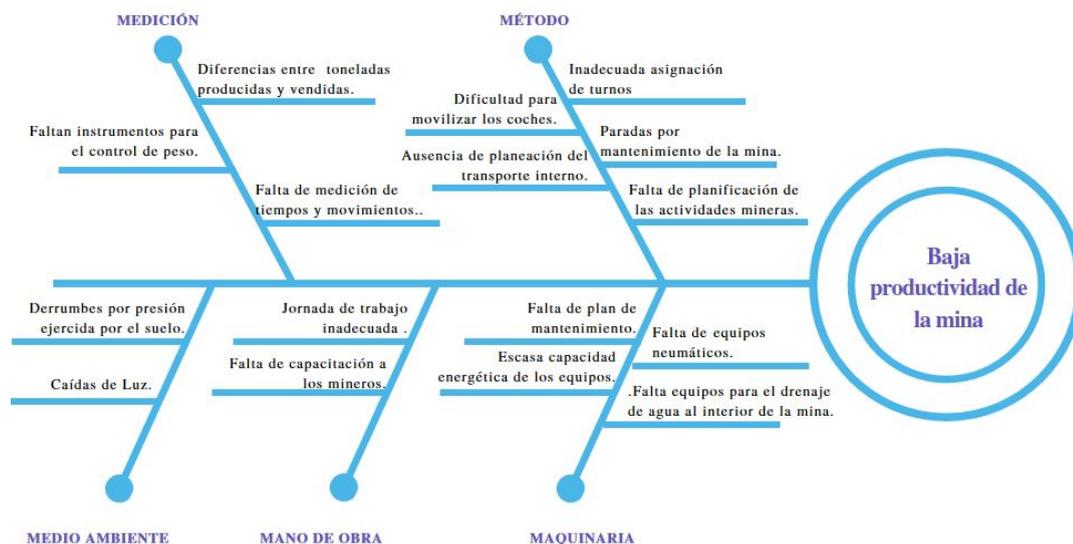


Figura 3, Diagrama de causa y efecto para el problema de la baja productividad en la mina.
Fuente, Propia.

Teniendo la clasificación de las sub-causas de la baja productividad se elaboró una matriz de calificación para determinar cuál es la causa principal del problema. Para la construcción de la matriz de calificación se tuvo en cuenta la frecuencia y el impacto de cada una de las causas, asignando una valoración entre 1 y 5 para cada criterio. Para el caso de la frecuencia se valoró siendo: 1 poco recurrente y 5 muy recurrente y para el impacto: 1 bajo impacto y 5 alto impacto. Los resultados de esta matriz se representan en el siguiente gráfico de Pareto de la **Figura 4**.

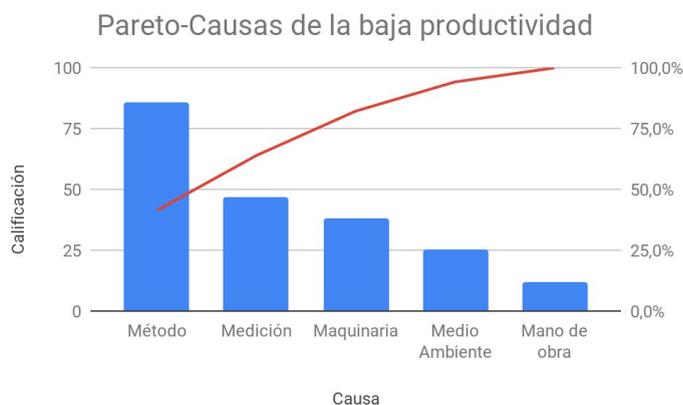


Figura 4, Diagrama de Pareto con las causas identificadas del problema.
Fuente, propia.

Del Diagrama de causa y efecto y el Pareto de la **Figura 3 y 4**, se puede concluir que el **método** es la causa que más impacto tiene en el problema de la baja productividad de la bocamina. Esto se debe a que existe: **una dificultad para movilizar los coches, la asignación de turnos es inadecuada, falta planificación de las actividades mineras, hay ausencia de planeación del transporte interno y paradas por mantenimiento.**

En primer lugar, **la dificultad para movilizar los coches** causa demoras en el transporte interno y tiempos ociosos de los mineros. En segundo lugar, se tiene una **asignación de turnos inadecuada** que provoca cruces de horario entre empleados de un mismo frente e interrupciones del proceso de extracción de carbón. En tercer lugar, no se cuenta con una **planificación de las actividades mineras** que impiden que la organización alcance la producción promedio mensual de minas similares y presente una alta variabilidad en la producción.

En cuarto lugar, **no se planifica el transporte interno** causando interferencia de los coches y demoras en la extracción del mineral. Finalmente, por condiciones de seguridad es necesario realizar **paradas por mantenimiento de la mina** que ocasionan retrasos en las operaciones mineras.

A partir de la evidencia anteriormente expuesta, permite llevar la investigación a resolver las siguientes preguntas ¿Cómo mejorar el nivel de producción de la mina de carbón? ¿ Es posible llegar a la meta esperada, es decir, producir 1000 toneladas mensuales?¹

2. Antecedentes.

La programación de la producción surge de la necesidad de tomar decisiones sobre la adquisición, utilización y asignación de recursos para satisfacer los requisitos del cliente de la manera más eficiente y eficaz. Las decisiones comunes son el nivel de la fuerza laboral, el tamaño de los lotes de producción, la asignación de horas extra y la secuencia de las ejecuciones (Graves,2002). A lo largo de los años, se han desarrollado diferentes técnicas para dar solución a dichas necesidades como lo son: Plan Maestro de Producción (MPS), Plan de Requerimiento de Materiales (MPR), Tecnología de Producción Optimizada (OPT) y Plan de Recursos de Fabricación (MRP-II) (Mula,Poler & García,2006). La **Tabla 2** presenta la definición de las técnicas anteriores según el concepto de algunos autores, considerando los cambios realizados a lo largo del tiempo para programar la producción.

Año	Técnica	Concepto	Autores
	MPS	El Plan Maestro de Producción (MPS) indica cuando y cuanta cantidad de producto terminado se debe fabricar, es una planeación a largo plazo.	(Yuan, Wang & Dong, 2010)
Entre 50's y 70's	MRP	La Planeación de Requerimientos de Materiales (MRP) determina cantidades de producción a corto plazo no solo del producto terminado, también tiene en cuenta los requerimientos de sus componentes. Sin embargo, esta técnica pasa por alto las restricciones de capacidad.	(Nahmias et al.,2007,p 347)
1986	OPT	La Tecnología de Producción Optimizada (OPT) tiene como premisa que los cuellos de botella en la producción son la base para la programación y planeación de la capacidad. Los recursos cuello de botella se programan a su máxima utilización, mientras que el resto se programan para estar en función de estos.	(Sipper & Bulfin,2004,p 591)
2002	MRP II	El sistema de planeación de los Recursos de Fabricación (MRP-II) es una herramienta para planear y controlar sus actividades de producción y actividades de apoyo (ventas y otras operaciones del negocio). El MRP-II gracias a las tecnologías de información y comunicación (TIC), evolucionó al ERP (Planificación de los Recursos Empresariales).	(Mula,Poler & García,2006)

Tabla 2, Definición de las diferentes técnicas para programar la producción a lo largo del tiempo.

Fuente,Propia.

Por otra parte, la programación de la producción en minas de carbón tiene un papel importante en el logro de los objetivos financieros y de productividad. Esta busca definir la secuencia de extracción de minerales y materiales de desecho que maximice el beneficio descontando las operaciones mineras, mientras que satisface diferentes limitaciones técnicas y de procesamiento (Khan, 2018).

Para una efectiva programación de la producción es necesario implementar modelos de toma decisiones basados en la optimización. Estos proporcionan un análisis riguroso, teniendo en cuenta la naturaleza compleja y dinámica de la producción de carbón y da como resultado una estrategia de coordinación efectiva (Sun, Zhao, Li, & Cao, 2011). Aunque programar actividades en una mina es una tarea muy compleja, por sus relaciones de precedencia, los recursos disponibles, la amplitud y extensión de los sitios de trabajo, se han desarrollado diferentes modelos de optimización (Campeau & Gamache, 2019).

Son varios los casos de aplicación de modelos de optimización para la planeación de la producción, que aunque fueron desarrollados en minas de extracción de materiales diferentes al carbón, sirven como punto de partida para la investigación. Para el año 2010 en Suecia, se planteó un modelo matemático para programar la producción de una mina de metal a corto y largo plazo. Por la cantidad de variables y restricciones de este se optó por trabajar con una heurística. Esta ofreció buenos resultados tales como: desviaciones menores al 6%

¹Para consultar los datos históricos de la producción y la matriz de calificación realizada, diríjase al **ANEXO 1**.

respecto a la demanda real del mineral en menos de un tercio de hora, tiempo considerablemente menor al que se obtendría utilizando directamente el modelo matemático (Martinez & Newman, 2011).

En el año 2012, se desarrolló un modelo de optimización el cual tenía como objetivo clave maximizar el valor actual neto (VAN) bajo las restricciones de acceso y capacidad. Este modelo no solo se encarga de decidir cuánto producir sino que también gestiona la discriminación de los residuos minerales. Para demostrar los atributos de mejora de este modelo, se implementó un estudio de caso con los datos de una mina de oro y se utilizó una simulación geoestadística para determinar cómo el mineral y el material de desecho se distribuyen dentro del frente (Kumral,2012). Otro caso de aplicación fue el diseño de un modelo de programación entera mixta para maximizar la producción de metal mediante la planeación semanal en una mina de plomo y zinc subterránea. En esta, se programan las actividades de extracción tomando como restricciones el nivel de recursos, la precedencia de actividades y capacidad de producción entre intervalos de tiempo en un horizonte entre 52 a 156 semanas (O’Sullivan & Newman, 2015).

De la misma forma, el problema de la productividad en la minería de carbón ha sido abordado a través de modelos exactos y algoritmos heurísticos. En efecto, permitieron mejorar las utilidades y obtener beneficios para el medio ambiente. Por ejemplo en China, se desarrolló y aplicó con éxito un sistema de optimización de la programación de la producción de una mina de carbón de superficie utilizando Visual Basic .NET y MATLAB. Este modelo de optimización se implementó gracias a la necesidad que se tenía de responder rápidamente a los cambios del mercado y a los requerimientos de los clientes de una manera efectiva a bajo costo. Este modelo no solo desarrolla planes de producción sino que también involucra el procesamiento del mineral y el transporte de este (Sun et al., 2011).

Para el caso de minas de carbón subterráneas también se han desarrollado modelos de programación de la producción basados en optimización. Como es el caso de King, Goycoolea, & Newman (2017) que a través de programación entera mixta, se maximizó el valor presente neto de una mina de carbón subterránea al definir intervalos de tiempo para cada actividad minera. Por consiguiente, se consideró: la precedencia, la duración de las actividades, los límites de proceso y producción. Así mismo, Yu, Zheng, Gao, & Yang (2017) a través de programación no lineal y algoritmos genéticos, lograron mejoras en las utilidades de una mina de carbón al reducir la cantidad de emisiones, al aumentar las ganancias y conseguir ahorros energéticos.

A continuación, en la **Tabla 3** se presenta el resumen de los parámetros relevantes y las funciones objetivo empleadas en los casos aplicados de programación de la producción mencionados anteriormente.

Autores	Técnicas	Parámetros Considerados	Función Objetivo	Mina
(Martinez & Newman, 2011)	-Programación Lineal. -Heurística de Sub-problemas.	-Tasa de producción mínima y máxima. -Penalización por desviación entre periodos. - Cantidad objetivo en el periodo. -Tiempo de disponibilidad.	Minimizar las desviaciones de la producción entre periodos.	Metal Subterránea
(Kumral,2012)	-Programación Lineal.	-Desperdicios generados. -Capacidad de proceso. -Recursos disponibles.	Maximizar el valor presente neto (VPN)	Oro
(O’Sullivan & Newman, 2015)	-Programación Lineal.	-Intervalos de tiempo programables. -Relaciones de precedencia. -Recursos disponibles. -Producción a razón de los intervalos.	Maximizar la cantidad de metal extraído en el horizonte.	Metal Subterránea
(Sun et al., 2011)	-Heurística en Visual Basic y Matlab.	-Capacidad de producción de las actividades. -Desechos generados. -Recursos disponibles.	Maximizar utilidades.	Carbón a cielo Abierto
(King, Goycoolea, & Newman,2017)	-Programación Lineal.	-Intervalos de tiempo programables. -Relaciones de precedencia. -Recursos disponibles. -Tiempo de ciclo de las actividades.	Maximizar el valor presente neto (VPN).	Carbón Subterránea

(Yu et al.,2017)	-Programación no lineal. -Algoritmo Genético.	-Porcentaje de carbón extraíble. -Recursos disponibles. -Ahorros por disminuir desperdicios. -Proyectos de emisiones (beneficio/costo).	Maximizar las utilidades y minimizar las emisiones.	Carbón subterránea
------------------	--	--	---	--------------------

Tabla 3, Resumen de los casos aplicados a la programación de la producción en la minería.
Fuente, Propia.

A pesar de las semejanzas de las soluciones anteriormente expuestas con el problema planteado, es necesario adaptar el modelo a las necesidades y procesos de la mina de carbón subterránea de estudio. En este contexto, el modelo de optimización integrado en el aplicativo tendrá como parámetros de entrada los tiempos de las actividades de los diferentes frentes, los recursos empleados para el funcionamiento de la mina ,relaciones de precedencia entre actividades y condiciones adicionales. El aplicativo tiene como objetivo maximizar las utilidades en el horizonte de planeación, así mismo, realizar la programación de los diferentes frentes de trabajo.

3. Objetivos.

Objetivo General.

Diseñar un modelo para la programación de la producción, dirigido a la mina de carbón subterránea Los Arrayanes S.A.S ubicada en el departamento de Boyacá, Colombia.

Objetivos específicos.

1. Realizar un estudio de eficiencia que permita establecer las capacidades reales del proceso en la mina.
2. Diseñar un modelo de optimización dinámico que realice la programación de la producción diaria de la mina, maximizando las utilidades durante el periodo estudiado.
3. Elaborar un aplicativo que permita la ejecución del modelo de optimización para la programación de la producción de la mina.
4. Comparar el modelo de programación propuesto con el método actual, para mostrar los beneficios de tomar decisiones con el aplicativo diseñado.

4. Metodología.

Para el desarrollo de la metodología se tuvieron en cuenta 4 etapas las cuales abordaban cada uno de los objetivos planteados. En la primera etapa, se realizó un estudio de eficiencia en donde se llevó a cabo la descripción del proceso actual, la recolección de datos al interior y exterior del proyecto minero, a partir de los datos recolectados se propuso una estandarización de tiempos de las actividades y el análisis de la situación actual. En la segunda etapa, se diseñó un modelo de programación lineal binaria para maximizar las utilidades mensuales de la mina. En la tercera etapa, se diseñó un aplicativo que permite la programación de la producción. Finalmente, se evaluó la eficiencia del aplicativo frente a los resultados obtenidos y a la producción histórica de la mina.

Estudio de eficiencia	Modelo de optimización dinámico	Aplicativo	Análisis de resultados
<ul style="list-style-type: none"> - Descripción del proceso actual - Diseño de formatos - Recolección de información - Cálculos de tiempos estándar - Análisis de la situación actual 	<ul style="list-style-type: none"> - Definir parámetros, restricciones y supuestos. - Diseño del modelo de programación lineal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Definición de parámetros de entrada y salida - Desarrollo del aplicativo en VBA-SolverStudio 	<ul style="list-style-type: none"> - Prueba de diferentes escenarios - Evaluación de la eficiencia del aplicativo - Beneficios del aplicativo

Figura 5, Etapas del proyecto.
Fuente, Propia

4.1 Estudio de eficiencia.

El estudio de eficiencia permite conocer el detalle de las actividades, establecer capacidades del proceso y calcular tiempos estándar. Este estudio mide el grado de eficiencia con que se emplean los recursos

humanos y otros para alcanzar los objetivos empresariales (Andrade,Rio & Alvear,2019). En ese orden de ideas, se realizó una descripción del proceso, la recolección y análisis de datos, estandarización de tiempos y definición de las capacidades del proceso con la finalidad de analizar el uso de los recursos disponibles en la situación actual.

Descripción del proceso actual.

Se presenta el proceso de extracción del carbón en la mina de estudio a través de un diagrama de bloques, en el que se muestran las principales actividades de la operación y los materiales que salen de estas (ver **Figura 6**). El proceso inicia con la actividad de arranque del mineral donde se extrae y se separa el carbón de la roca. Posteriormente, el carbón es envasado en una vagoneta, la cual es transportada hasta la tolva que se encuentra en la superficie. Por último, se descarga el mineral en el centro de acopio.

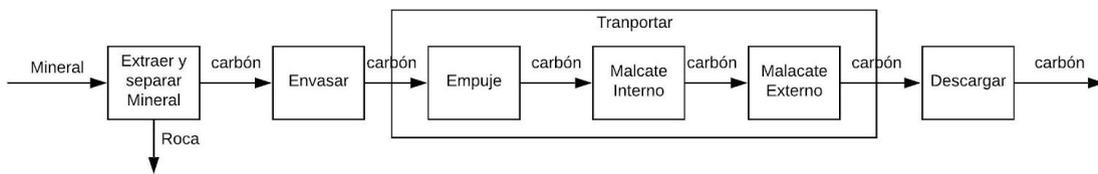


Figura 6. Diagrama de bloques para el proceso de extracción de carbón térmico.
Fuente,Propia.

La actividad de transportar se divide en tres tareas en las que intervienen máquinas y hombres. La primera tarea es ejecutada por un minero, quien se encarga de empujar la vagoneta desde el frente de explotación hasta la tornamesa donde se engancha al malacate interno. La segunda tarea la lleva a cabo el malacate interno, el cual lleva la vagoneta desde la tornamesa hasta la aguja, punto donde se engancha con el malacate externo. La última tarea la efectúa el malacate externo, que se encarga de sacar la vagoneta hasta la tolva de almacenamiento ubicada en la superficie. Los puntos de enganche y los malacates están ubicados en la única ruta de salida, por lo que, las vagonetas provenientes de los frentes deben pasar por allí una a una.

Diseño de formatos y recolección de información.

Teniendo en cuenta el proceso descrito anteriormente, se diseñaron dos formatos para la recolección de información. El primero recopila los tiempos de transporte ejecutados por los malacates y los tiempos de descargue en la zona de acopio. El segundo recolecta los tiempos de extracción, envase y empuje de la vagoneta por frente. A continuación, se observan los dos formatos utilizados (**Ver Figura 7 y 8**).

N Medición	Fecha	Transporte Malacate Interno	Transporte Malacate externo	Descargue
		Duración (min)	Duración (min)	Duración (min)
1				
2				
3				
4				

Figura 7, Formato de tiempos de transporte de malacates y descargue.
Fuente,Propia.

Frente										
N Medición	Fecha	EXTRAER				ENVASAR			TRANSPORTE DE EMPUJE	
		¿Pico o martillo?	Hora Inicio	Hora Fin	Duración (min)	Hora Inicio	Hora Fin	Duración (min)	Distancia (m)	Duración (min)
1										
2										
3										
4										

Figura 8, Formato de tiempos de extracción, envase, y empuje de la vagoneta..
Fuente,Propia.

La información se recolectó en diferentes visitas a la mina realizada entre julio/19 y octubre/19 en las cuales se midieron los tiempos de las actividades y recursos utilizados en los cuatro frentes activos denominados guía sur, guía norte, sobreguía norte y sobreguía sur.

Adicionalmente, para cada actividad ejecutada por frente se recolectó una muestra mayor o igual a 30 datos. Se escogió esta cantidad teniendo en cuenta que el teorema del límite central establece que, al tener una muestra lo suficientemente grande, es decir más de 30 datos, las medias muestrales se distribuirán normalmente (Alvarado & Obagi ,2008,p77).²

Cálculo de Tiempos Estándar

Según la Organización Internacional del Trabajo (OIT) la medición de tiempos es un conjunto de técnicas diseñadas para determinar el tiempo que una persona cualificada en una actividad necesita para desarrollarla. Adicional al tiempo observado, se debe considerar un suplemento de tiempo para que el trabajador pueda ocuparse de sus necesidades personales o por condiciones inherentes al trabajo (Kanawaty, 2011).

Para estimar los tiempos estándar del caso de estudio fue necesario: (1) Realizar el cálculo de los tiempos normales de las actividades que intervienen en el proceso de extracción y (2) Determinar los suplementos propios de la actividad minera bajo tierra. (3) Dar la valoración a los suplementos considerados y (4) Calcular de los tiempos estándar por actividad.

Para realizar el cálculo de los tiempos normales se utilizaron los tiempos observados en la mina, los cuales presentaban asimetría en torno a la media con un coeficiente de asimetría entre -1 y 1³. Mientras que para determinar los suplementos aplicables en el caso de estudio se tuvieron en cuenta los factores que influyen en este tipo de actividad que según (Díaz,Abril & Garzón, 2010) son: la exposición a cambios bruscos de temperatura, exposición a gases y vapores, carga física y de postura, exposición al ruido, ejecución de tareas monótonas y repetitivas o por críticas condiciones locativas. Teniendo en cuenta lo anterior, se consideraron los siguientes suplementos constantes y variables: necesidades personales, fatiga, trabajo de pie, postura anormal, uso de la fuerza o energía muscular, mala iluminación, ruido y monotonía.

Una vez definidos los suplementos a utilizar, se realizó la valoración junto al encargado de la seguridad y salud en el trabajo de la mina, donde se definieron las condiciones actuales para dar una calificación a cada factor considerado⁴. En la **Tabla 4**, se presenta la valoración final obtenida.

Suplementos constantes	
Por necesidades personales	5
Por fatiga	4
Suplementos variables	
Por trabajar de pie	2
Por postura anormal	2
Uso de la fuerza o energía muscular	3
Mala iluminación	2
Ruido	5
Monotonía	1
Total suplementos	24

Tabla 4. *Suplementos considerados para la estimación de los tiempos de las actividades.*

Fuente. *Propia.*

² Para consultar los formatos para la recolección de datos y los datos recolectados para este estudio diríjase al **ANEXO 2** y **ANEXO 3** respectivamente.

³ Para consultar la estadística descriptiva de los datos recolectados diríjase al **ANEXO 4**.

⁴Para consultar los criterios considerados para la valoración de los suplementos diríjase al **ANEXO 5**.

Finalmente, teniendo los tiempos observados, los suplementos definidos y la valoración de estos procede a hacer el cálculo de los tiempos estándar (Ver Tabla 5).

Frentes		Actividades						
		Picar	Envasar	Transportar			Total	Descargar
				Empuje	Malacate interno	Malacate externo		
Guía Sur	T. normal (min)	57,87	10,06	3,24	4,85	2,4	10,5	2,23
	T. Estándar (min)	71,75	12,47	3,25	4,85	2,4	10,5	2,76
Guía Norte	T. observado (min)	100,4	10,06	2,44	4,85	2,4	9,69	2,23
	T. Estándar (min)	124,49	12,47	2,44	4,85	2,4	9,69	2,76
Sobreguía Norte	T. observado (min)	106,87	10,06	1,22	4,85	2,4	8,47	2,23
	T. Estándar (min)	132,51	12,47	1,22	4,85	2,4	8,47	2,76
Sobreguía Sur	T. observado (min)	59,9	10,06	1,22	4,85	2,4	8,47	2,23
	T. Estándar (min)	74,28	12,47	1,22	4,85	2,4	8,47	2,76

Tabla 5. Tiempos observados y estándar de cada actividad por frente.

Fuente, Propia.

Para el cálculo de los tiempos estándar del transporte, se consideró la distancia desde cada frente a la tornamesa, la velocidad de empuje promedio y los tiempos de transporte de los malacates. Para esta actividad no se incluyeron los suplementos ya que al ser operaciones realizadas por máquinas, su tiempo de proceso es constante en el tiempo.

Análisis del proceso actual.

Para analizar el proceso actual, se estudió un periodo de tiempo desde agosto a octubre del 2019, donde se explotaron únicamente los 4 frentes activos mencionados anteriormente. Durante este periodo, se obtuvieron los recursos disponibles de la mina, gastos administrativos, los costos fijos y variables en los que está incurrir. Entre los recursos disponibles se incluye: el consumo de madera, consumo de combustible y mineros mínimos para el funcionamiento de la mina. Entre los costos fijos de producción se tiene el costo de la seguridad social por minero, del combustible y el mantenimiento de los equipos. Finalmente, los costos variables corresponden al costo de la madera y el pago por destajo de las actividades.⁵

Mes	Indicador			
	R. Combustible (coche/gal)	R. Costo Fijo X Coche (\$/Coche)	Prod. Frente (coche/mes)	Utilidad Operacional (\$)
Agosto.	1.49	23,325	104.25	10,900,671
Septiembre	1.44	26,633	88.25	8,059,933
Octubre	1.59	21,105	116.5	13,216,133
Promedio	1,51	23,867	103	10,725,579

Tabla 6. Indicadores de desempeño diseñados para la medición de la capacidad actual.

Fuente, Propia.

⁵ Para consultar el análisis de la situación actual diríjase al ANEXO 6.

Además, se diseñaron los siguientes indicadores de desempeño para medir el grado de eficiencia actual de la mina:

- El indicador de rendimiento de combustible muestra la relación de la cantidad de coches extraídos por cada galón de combustible utilizado para el funcionamiento del compresor, que alimenta los martillos neumáticos de cada frente.
- El indicador de costo fijo por coche relaciona los costos fijos y gastos administrativos de la mina por las toneladas extraídas.
- El indicador de productividad por frente mide la producción promedio por frente en la mina.
- Finalmente, se tiene el indicador de utilidad operacional para medir las ganancias del proceso de extracción de carbón.

De acuerdo con los resultados presentados en la **Tabla 6**, el mes de octubre presenta la mayor utilidad operacional, así como un mejor rendimiento del combustible del compresor, de los costos fijos y de la producción promedio por frente respecto a los otros meses en estudio. Esto se debe a que en este mes hubo mayor producción de carbón, dando una mejor utilización de los recursos disponibles.

4.2 Modelo de optimización dinámico.

Se realizó un modelo de programación lineal binaria con el objetivo de maximizar las utilidades de la empresa a través de la programación de la producción a corto plazo. Este modelo se compone de parámetros, variables de decisión y restricciones que determinan el tiempo de inicio de transporte de los coches de cada frente, los frentes de trabajo que se deciden explotar y la producción diaria de la mina.

Los parámetros que recibe este modelo son: los tiempos de proceso de actividades (extracción, envasado, transporte y descargue), el precio, los costos fijos y costos de extracción del carbón por frente, así como la producción mínima y máxima de los frentes explotados. Adicionalmente, se establece la hora máxima de operación de la mina. Como el modelo de optimización considera tiempos determinísticos se decidió hacer la planificación diaria, pues en dado caso que los tiempos de ejecución de las actividades no cambien y que el número de frentes se mantuviese constante, la programación en los siguientes días laborales del mes sería la misma.

Los supuestos tenidos en cuenta para el modelo de optimización son los siguientes: (1) los coches de cada frente están disponibles para ser transportados después de que han sido envasados. (2) La actividad de extracción inicia desde el momento cero, es decir, desde el inicio de la jornada laboral. (3) la madera como recurso se considera ilimitada ya que es de fácil acceso para la mina.

Este problema de programación lineal se asemeja a un Single Machine Scheduling with Release Times. Este tipo de problemas permiten representar una secuencia de actividades en serie, o reagrupar todo un conjunto de ellas para simplificar su complejidad. De igual forma, consideran un instante de llegada r_j (o fecha de llegada) anterior al cual no es posible comenzar su operación (Torres, Arboleda & Frein, 2002). En el caso de estudio, se agruparon las actividades de transporte y descarga para convertirlos en una sola máquina. Por otra parte, los instantes de llegada corresponden al momento en donde un coche está disponible después de que la actividad de extracción y envasado se ha completado.

A continuación, se muestra el modelo matemático para la programación de la producción de la mina en estudio:

Conjuntos.

Notación	Conjuntos
$I=\{1,2,3,\dots,I\}$	Frentes o zonas de trabajo exploradas en la mina.
$J=\{1,2,3,\dots,J\}$	Coches a programar

$T=\{1,2,3,\dots,T\}$ Periodos de la jornada laboral (min).

Parámetros

Notación	Parámetros
Pcarbon	Precio de venta del carbón (\$/ton).
Cextraer_i	Costo de extracción del carbón en el frente $j \in J$ (\$/coche).
Cenvasar	Costo de envasar el carbón (\$/coche).
Cdescargar	Costo de descargar (\$/coche).
Cfijos	Costos fijos por frente explotado (\$).
CfijosGeneral	Costos fijos generales y gastos administrativos de la mina.
CEnergia	Costo de la energía para operar el compresor que alimenta los equipos en la mina(\$).
Textraer_i	Tiempo de extracción del frente $i \in I$ (min/ton).
Tenvasar	Tiempo de envasado(\$).
Ttransporte_i	Tiempo de transporte desde el frente $i \in I$ a la zona de acopio (min/ton).
Tdescargue	Tiempo de descargue en la zona de acopio (min/ton).
Tfin	Periodo final de la jornada laboral (min).
Cmin_i	Producción mínima del día en el frente $i \in I$.
Cmax_i	Producción máxima del día en el frente $i \in I$.
CMadera	Consumo de madera (u/coche).
PMadera	Precio de la madera (\$/u).

Variables de decisión.

Notación	Parámetros
W_{ijt}	Binaria, 1 si el coche de carbón $i \in I$ del frente $j \in J$ inicia a transportarse en el periodo $t \in T$. 0, en otro caso.
X_i	Binaria, 1 si el frente $i \in I$ inicia a extraer en el día. 0, en otro caso.
Y_{ij}	Binaria, 1 si el coche $i \in I$ del frente $j \in J$ se descarga. 0, en otro caso.

Función Objetivo.

Maximizar las utilidades de la mina en la jornada laboral.

$$\text{Max } Z : \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (P_{\text{carbon}} - C_{\text{envasar}} - C_{\text{descargar}} - C_{\text{extraer}_i} - P_{\text{Madera}} * C_{\text{madera}}) * Y_{ij} - \sum_{i \in I} C_{\text{fijos}} * X_i - C_{\text{Energia}} - C_{\text{fijoGeneral}}$$

Restricciones

$$\sum_{t \in T} W_{ijt} \leq 1 \quad \forall i \in I / \forall j \in J$$

(1)

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k=t-T_{\text{descargue}}-2*T_{\text{transporte}_i}+1}^t W_{ijk} \leq 1 \quad \forall t \in T$$

(2)

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} \geq C_{\text{min}} * X_i \quad \forall i \in I$$

(3)

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} \leq Cmax * X_i \quad \forall i \in I$$

(4)

$$Tfin - 2 * Ttransporte_i - Tdescargue$$

$$\sum_{t=R_{ij}} W_{ijt} \geq Y_{ij} \quad \forall i \in I / \forall j \in J$$

(5)

$$\sum_{t \in T} W_{ijt} \leq Y_{ij} \quad \forall i \in I / \forall j \in J$$

(6)

$$\sum_{t \in T} t * W_{ijt} \geq \sum_{t \in T} t * W_{i,j-1,t} - M * (1 - Y_{ij}) \quad \forall i \in I / \forall j \in J : j > 1$$

(7)

$$\sum_{l \in J : l < j} Y_{il} \leq Y_{ij} \quad \forall i \in I / \forall j \in J : j > |J|$$

(8)

El problema de programación de la producción sigue las restricciones: (1) La cual señala que cada coche proveniente de cada frente puede iniciar a transportarse una única vez. La (2) indica que solo un coche puede ser transportado (ida y vuelta) y descargado a la vez. La (3) obliga a que la producción esperada al final del día sea superior o igual al volumen de producción mínimo del frente dado que se decidió explotarlo. La (4) limita la producción al máximo del día. La (5) indica el tiempo mínimo y máximo de inicio del transporte por coche correspondiente al release time y periodo máximo de descarga respectivamente. La (6) indica que cuando un coche no será descargado la actividad de transporte no debe ejecutarse. Finalmente, las restricciones (7) y (8) dan precedencia entre los coches de un mismo frente.

4.3 Diseño del Aplicativo.

Después de tener el modelo de optimización, se diseñó un aplicativo en la herramienta de Microsoft Excel que entrega la programación diaria de la producción de la mina, así como también los resultados en el horizonte de planeación definido por el usuario. El aplicativo ofrece dos métodos de solución, el primero es un modelo de optimización y el segundo es una regla de despacho FIFO (First In First Out). Para el desarrollo de este aplicativo se utilizaron los complementos Visual Basic for Applications y SolverStudio.⁶

Los dos métodos de solución respetan las siguientes restricciones:

- Horario de trabajo: 9 horas al día.
- Programación generada únicamente en los frentes activos.
- Precedencia de las actividades de explotación: Extracción, envase, transporte y descargue
- Solo un coche podrá ser transportado a la vez.
- Precedencia entre los coches de un mismo frente.
- Producción mínima y máxima por frente.

Modelo de optimización.

Para poder ejecutar el modelo de optimización desarrollado en el capítulo anterior en Microsoft Excel fue necesario hacer uso del complemento SolverStudio utilizando el lenguaje de programación GLPK. Se decidió usar este complemento ya que permite crear y editar el modelo de optimización sin salir de la

⁶ El aplicativo en microsoft excel se encuentra en el ANEXO 6.

herramienta, se puede vincular fácilmente los datos de la hoja de cálculo a conjuntos, parámetros, constantes y variables utilizadas en el modelo, así como devolver la respuesta a la hoja de cálculo.

Regla FIFO.

Como segundo método de solución para programar la producción se utilizó la regla de despacho FIFO (First In First Out) que establece que los trabajos son atendidos en el orden en que van llegando (Mathur, K., & Solow, D. 1996). Para el caso de estudio en el proyecto minero, la regla de despacho FIFO se implementó en el aplicativo teniendo como criterio que: el primer coche disponible sea transportado hacia la tolva. El algoritmo que ejecuta esta regla de despacho fue programado en Visual Basic for Applications.

Escenarios del aplicativo.

Debido a que el aplicativo permite la programación dinámica de los frentes activos así como de los tiempos de ejecución de las actividades, se han generado diferentes escenarios de prueba. Estos escenarios permiten definir la producción mínima, real e ideal de la mina con los recursos que actualmente dispone. A continuación, se presenta la descripción de los escenarios:

Escenario Optimista: Este escenario permite definir la producción ideal de la mina al asumir que los recursos disponibles están a su máximo rendimiento ignorando tiempos ociosos, fallas en máquinas u otros imprevistos. Para este caso, se empleó los tiempos mínimos de las actividades del proceso de extracción de carbón.

Escenario Estándar: Este escenario permite definir la capacidad de producción de la mina con los recursos y condiciones actuales, que a su vez, corresponde al nivel máximo de eficiencia del proceso. Para este caso, se realizó pruebas con los tiempos estándar hallados en el estudio de eficiencia.

Escenario Pesimista: Este escenario brinda la producción mínima de la mina, debido a que considera que las actividades se realizan a su máximo tiempo de proceso.

5. Componente de Diseño en ingeniería.

5.1. Declaración de Diseño.

Se desarrolló un aplicativo que realiza la programación de la producción de la mina de carbón subterránea en estudio, ubicada en el departamento de Boyacá, Colombia. Para llegar a esto, se realizó un estudio de eficiencia, se diseñó un modelo de optimización y un algoritmo adaptado a las necesidades y restricciones de la mina. Además de programar la producción, el aplicativo muestra indicadores de desempeño tales como: rendimiento de costos fijos por coche, utilidad, rendimiento de combustible del compresor, producción por frente, tiempo de espera por frente y tiempo de ciclo por frente. Los indicadores mencionados anteriormente permitieron identificar oportunidades de mejora en la situación actual de la mina.

5.2 Proceso de Diseño.

Como este aplicativo se desarrolló en Microsoft Excel cuenta con cuatro hojas las cuales se distribuyen de la siguiente forma: Datos de entrada, ejecución de los métodos de solución, dashboard de resultados e instrucciones de uso.

Datos de entrada.

Esta hoja debe ser diligenciada por el usuario, ya sea para ingresar los datos por primera vez o realizar una actualización de los mismos. El usuario ingresa los frentes explorados e indica el estado de los mismos

(Activo o inactivo), el tiempo de las actividades, los costos variables y fijos involucrados. Adicionalmente, el usuario puede suministrar la fecha fin del horizonte de planeación.

Los tiempos que ingresa el usuario son los observados, sin embargo, el aplicativo le proporciona la opción de que a dichos tiempos se le adicione los suplementos y de esa forma contar con los tiempos estándar para programar la producción. A continuación se muestra una visual de esta hoja en la **Figura 9**.

Figura 9, Hoja “Datos de entrada” del aplicativo diseñado.
Fuente, Propia.

Después de ingresar los datos, el usuario debe seleccionar el método de solución (modelo matemático o regla FIFO) para programar la producción haciendo uso de los botones ubicados en esta hoja. También se encuentra otro botón denominado “Factibilidad”, el cual genera una tabla de verificación de cumplimiento de las restricciones. Los botones del aplicativo y la tabla de verificación se encuentra en la **Figura 10**.

Figura 10, Botones de ejecución del aplicativo y tabla de verificación de restricciones.
Fuente, Propia.

Ejecución de los métodos de solución.

Cuando el usuario escoja el método de solución, los parámetros de entrada se cargaran automáticamente en esta hoja. Si el usuario decide emplear la regla de despacho el aplicativo ejecutará el código de VBA, por el contrario, si escoge el modelo matemático el aplicativo correrá el modelo de optimización integrado en el complemento SolverStudio. Después de la ejecución del aplicativo se imprimen los resultados en las siguientes tablas.

Resumen Diario				
Ganancia	\$	1,326,000	Produccion (coche)	17
CostosFijos	\$	195,054	Total Espera (min)	241
Costos Variables	\$	153,287	Utilidad (\$)	977,659
Nombre del Frente	Produccion dia(coche)	Total Espera (min)	T. Espera(min/coche)	T ciclo (min/coche)
Sobreguia Norte	8	31	3.88	67.50
Guia Norte	5	171	34.20	108.00
Guia Sur	4	39	9.75	135.00

Figura 11, Resumen diario de la programación de la producción generada.

Fuente, Propia.

Resumen Horizonte de Planeación	
Produccion (coche)	51
Frentes Explotados	3
Ganancia Carbón	\$ 3,978,000
Costos Fijos	\$ 1,469,499
Costos Variables (\$)	\$ 1,320,000
Utilidad(\$)	\$ 1,188,501
Rendimiento Costo Fijo X coche (\$/Coche)	\$ 28,813.71
Productividad x Frente (coche)	17.00
Rendimiento Combustible (coche/gal)	1.45
Tiempo de Ciclo Promedio (min/coche)	31.76
Tiempo de Espera Promedio (min/coche)	13.76

Figura 12, Resumen Horizonte de Planeación de la programación de la producción generada.

Fuente, Propia.

Frente/Coche	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sobreguia Norte	146	278	411	0	0	0	0	0	0	0
Guia Norte	168	337	480	0	0	0	0	0	0	0
Sobreguia sur	103	208	247	319	390	462	0	0	0	0
Guia Sur	85	190	229	301	372	444	516	0	0	0

Figura 11, Tabla de tiempos de inicio de transporte por frente explotado.

Fuente, Propia.

En la **Figura 10**, se muestra el resumen diario que incluye: el número de coches extraídos por cada frente, la espera acumulada, los tiempos promedio de espera y tiempo de ciclo, además de las ganancias, costos y utilidad de la mina. En la **Figura 11**, se observa el resumen del horizonte de planeación que contiene: la producción, número de frentes explotados, utilidad y los indicadores de desempeño. Finalmente, en la **Figura 12** se presenta los tiempos de inicio de transporte de cada coche discriminado por frente.

Dashboard de Resultados.

A partir de los datos impresos en las tablas de las figuras anteriores, el aplicativo genera en esta nueva hoja un dashboard que permite visualizar de forma gráfica los indicadores de desempeño utilizados y un diagrama de Gantt dinámico que muestra la secuencia de las actividades por cada frente explotado en la jornada laboral. En la **Figura 13** se muestra el dashboard diseñado.

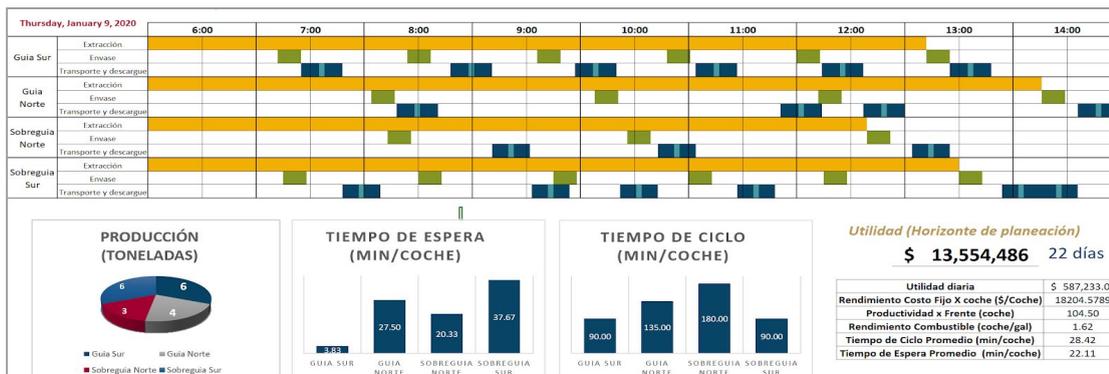


Figura 13, Dashboard de resultados con los indicadores de desempeño incluidos en el aplicativo.

Fuente, Propia.

Manual de Instrucciones.

En la **Figura 14**, se presenta la hoja del aplicativo que contiene las instrucciones de uso.

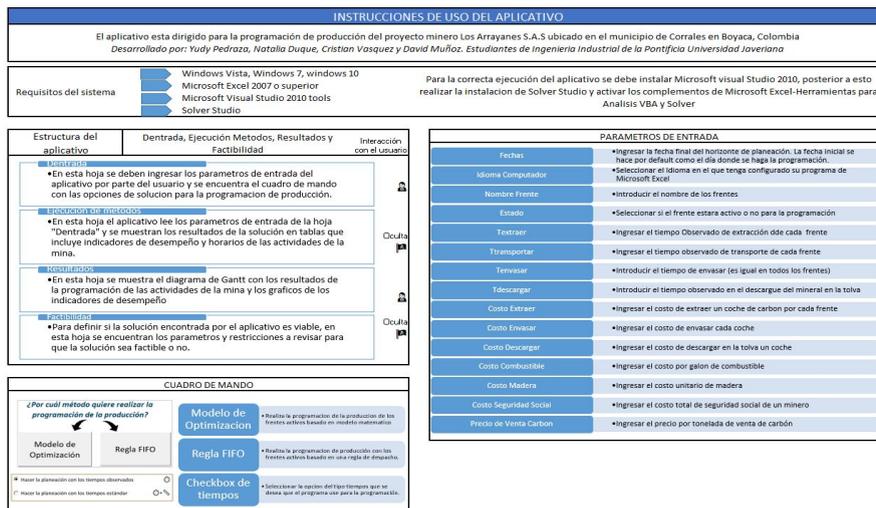


Figura 14. Instructivo de uso para el aplicativo.
Fuente, Propia.

5.3 Requerimientos de desempeño.

A continuación, se presentan los requerimientos definitivos identificados en el desarrollo del aplicativo:

- El aplicativo debe tener un tiempo de ejecución menor a 15 minutos.
- El aplicativo define la cantidad de toneladas de carbón programadas para un día.
- El aplicativo define horarios de trabajo para los diferentes frentes y mineros.
- El aplicativo muestra un análisis de los recursos consumidos y costos para la producción programada.
- El aplicativo debe ser entendido y usado por el usuario final.

Para el requerimiento de los horarios de trabajo, el aplicativo entrega los horarios de cada actividad por cada frente en un diagrama de gantt, en el cual el usuario puede visualizar el tiempo de inicio y final de cada una de estas actividades por coche extraído.

5.4 Pruebas de rendimiento.

Para verificar el cumplimiento de los requerimientos de desempeño definidos para el aplicativo, se realizaron las siguientes pruebas:

- Se realizó una prueba de estrés para evaluar el rendimiento del aplicativo frente a la variación de parámetros de entrada. Donde se identificó que el modelo de optimización integrado responde a la programación dentro del estándar hasta 4 frentes activos. Mientras que el método de la regla FIFO responde ante los cambios en menos de un segundo de ejecución.
- Se generó un tablero de control que permite visualizar de manera gráfica y dinámica la programación de la producción, cumpliendo así con la presentación de los resultados requeridos para el aplicativo.
- Para validar que el usuario final entendiera y comprendiera las funcionalidades del aplicativo, se diseñó un manual de instrucciones y se realizó una capacitación con los encargados de manipular el aplicativo.
- Para comparar los resultados de los indicadores de desempeño de la situación actual de la mina y la propuesta por el aplicativo, se hicieron pruebas con el modelo de optimización y la regla FIFO para medir la variación de estos indicadores.

5.5 Restricciones.

Las restricciones de diseño para este proyecto son las siguientes:

- La calidad de los datos se ve restringida por las condiciones actuales de operación de la mina.

- El tiempo de ejecución del aplicativo depende de la capacidad tecnológica que actualmente cuente la organización.
- El aplicativo asume que todos los mineros se encuentran disponibles en el horizonte de planeación, por lo que, no se considera ausentismos, incapacidades o licencias otorgadas.
- El aplicativo utiliza los recursos disponibles de la organización por lo que no pretende aumentar la capacidad de los mismos.

Adicionalmente, durante el desarrollo del trabajo de grado se plantearon las siguientes nuevas restricciones:

- Jornada de trabajo
- Precedencia de descarga de coches en tolva.
- Precedencia entre coches de un mismo frente.
- Mínima y máxima producción por frente.

Las anteriores restricciones se verifican en el aplicativo a través de un botón de factibilidad, que funciona con el cargue a una hoja de excel en donde se validan las restricciones y arroja el resultado de cumplimiento en la hoja de "Datos de entrada".

5.6 Cumplimiento del estándar.

Para la realización de este proyecto se tuvo en consideración la norma ISO 25000, conocida como SQuaRE (*System and Software Quality Requirements and Evaluation*), la cual tiene como objetivo evaluar la calidad del producto de software. Para medir la calidad del software se tienen en cuenta los siguientes factores:

- Adecuación Funcional.
- Eficiencia de desempeño.
- Compatibilidad.
- Usabilidad.
- Confiabilidad.
- Seguridad.
- Mantenibilidad .
- Portabilidad.

Teniendo en cuenta estos factores, el aplicativo proporciona una solución eficiente y organizada. Esta solución se centra en la asignación de tareas a llevar a cabo dentro de la mina, partiendo de unos datos iniciales que deben ser suministrados por el usuario. Para llegar a estos resultados, se ofrece al usuario la posibilidad de escoger la solución que él desee, sea mediante la regla FIFO o mediante el modelo matemático, dando así diferentes posibilidades para obtener los resultados esperados. Se cuenta con mensajes de error y advertencia para datos de entrada, además de bloqueo del archivo, macros y hojas de cálculos requeridas para la protección de seguridad de la información. De igual forma, el aplicativo arroja la capacidad de utilización de los recursos de la mina, mostrando el desempeño a través de los indicadores incluidos en el primer objetivo.

Este aplicativo tiene la capacidad de ser instalado en cualquier computador con sistema operativo Windows Vista, Windows 7 y Windows 10 que cuente con el programa de Microsoft Excel 2007 en adelante, con los complementos de VBA activos y Visual Studio instalado.

6. Análisis de Resultados.

Análisis estadístico

Dada la variabilidad de los frentes explotados y las dificultades para ejecutar un estudio de tiempos en una mina subterránea, es útil realizar un análisis que permita establecer relaciones de las actividades entre los frentes, especialmente en las actividades de extracción y envasado. Para ello, se realizó un análisis de varianza ANOVA unifactorial para determinar si se encontraban diferencias significativas entre las medias de los tiempos de las actividades de extracción y envasado. Para extracción, dado que la prueba arrojó un p

value<0.05 se encontraron diferencias significativas entre los frentes y a partir de una prueba Tukey se comprobó que la diferencia ocurre entre los frentes del sur y los frentes del norte. Así mismo, para envasado dado que la prueba arrojó que el p value>0.05 no se encontraron diferencias significativas, por lo tanto, los tiempos promedio de envasado entre los frentes son estadísticamente iguales.⁷

Resultados de las técnicas de solución.

A continuación en la **Tabla 7**, se presentan los resultados arrojados para la programación de la producción diaria empleando las dos técnicas de solución: Regla de despacho FIFO y modelo de programación lineal integrados en el aplicativo. Se generaron 18 ensayos a partir de la variación de los frentes y los escenarios descritos. Igualmente, se han fijado los coches programables a la capacidad máxima por frente, para que el aplicativo tome la decisión de la programación de la producción. Como número máximo se tomaron 6 frentes debido a la limitación de capacidad del compresor.

Instancia		Función Objetivo (\$)			Tiempo de Ejecución (segundos)	
Escenario	Frentes	Modelo Matemático	Regla FIFO	Gap (%)	Modelo Matemático	Regla FIFO
Pesimista	1	-35.787	-35.787	0%	0,2	0,1
	2	88.753	88.753	0%	0,3	0,1
	3	213.293	213.293	0%	0,7	0,1
	4	439.792	439.793	0%	1,4	0,2
	5	567.333	517.333	0%	10,5	0,2
	6	568.233*	439.793	22.6%	>7200	0,1
Estándar	1	63.173	63.173	0%	0,2	0,1
	2	187.713	186.713	0.53%	0,5	0,1
	3	312.253	311.253	0.32%	0,9	0,1
	4	588.233	587.253	0.17%	3,2	0,1
	5	739.673	715.773	3.23%	29,7	0,2
	6	764.253	541.753	29.11%	149,4	0,1
Optimista	1	211.613	211.613	0%	0,1	0,2
	2	530.073	530.073	0%	1	0,2
	3	800.053	800.053	0%	13,5	0,3
	4	955.493	883.113	7.57%	441	0,3
	5	956.393*	837.633	12.42%	>7200	0,3
	6	1.053.353*	814.733	22.65%	>7200	0,3

Tabla 7, Prueba de estrés del aplicativo con los escenarios Pesimista, Estándar y Optimista.
Fuente, Propia.

*Los ensayos indicados con asterisco en el modelo de optimización corresponden a resultados de óptimos locales, por lo tanto, la comparación se realizó teniendo en cuenta ese dato.

⁷ Para consultar el detalle del análisis de varianza y la prueba tukey diríjase al **ANEXO 8**.

De acuerdo con los resultados presentados, el modelo de optimización logra encontrar soluciones en menos de 15 minutos al programar hasta 6 frentes activos para el escenario estándar, 5 frentes para el escenario pesimista y 4 frentes para el caso del escenario optimista. Esto se debe a que es posible programar más coches al tener menores tiempos de proceso, lo que a su vez, incrementa el tiempo de ejecución del aplicativo. Por otro lado, el algoritmo de la regla de despacho se adapta adecuadamente a la programación dinámica, permitiendo resolver el problema en menos de un segundo.

Adicionalmente, la regla de despacho FIFO obtiene utilidades cercanas a las mostradas por el modelo de optimización. Encontrando que el gap máximo es de 29,11% respecto al óptimo. Esto sugiere que esta técnica de solución es aplicable al problema de programación de la producción de la mina de estudio.

Definición de la capacidad de la mina.

A partir del estudio de eficiencia se definieron tres escenarios: optimista, pesimista y estándar para el cálculo de las capacidades de la mina. Para el escenario optimista, tuvo en cuenta los tiempos mínimos de las actividades y se omitieron tiempos ociosos e imprevistos, este escenario presenta la capacidad teórica ideal. El escenario pesimista tomó los tiempos máximos y definió la producción mínima de la mina. Por último, el escenario estándar utilizó los tiempos con suplementos y permitió hallar la capacidad real.

Para este análisis, se consideraron 22 días hábiles del horizonte de planeación (un mes), un turno de operación, los recursos disponibles y programación generada por el modelo de optimización. Así mismo, se tuvo en cuenta los tres escenarios propuestos variando el número de frentes activos.

Frentes Activos	Producción mensual (toneladas)		
	Mínima	Real	Teórica
1	110	154	220
2	176	220	374
3	242	286	506
4	352	418	572 (3)
5	418	484(4)	572*
6	462*	506(5)	616*

Tabla 8. Capacidad mínima, real y teórica de la mina por frente activo.
Fuente, Propia.

* Los casos que tienen un número de esta forma (x) indican que la producción obtenida se logró al tener solo los x frentes explotados.

* Los casos indicados en asterisco corresponden a datos de producción de óptimos locales.

Partiendo de los resultados de la **Tabla 8**, se puede observar que la producción mínima, real e ideal con los frentes corresponde a 352,418,572 toneladas mensuales. También que la mínima producción de la mina es de 110 toneladas al tener un frente activo, mientras que teniendo las condiciones ideales se llegaría a un máximo de 616 toneladas mensuales con un turno de operación y 6 frentes activo. Finalmente se concluye que con las condiciones actuales de la bocamina La Moneda no es posible alcanzar la meta esperada de 1000 toneladas ya que esta solo puede alcanzar un máximo de 506 toneladas en condiciones reales.

Medición del impacto del método actual vs propuesto.

En primer lugar, se realizó una comparación de la producción histórica del trimestre frente a la producción obtenida con las técnicas de solución incorporadas en el aplicativo. Para calcular la producción mensual, se consideró la producción diaria de los 4 frentes activos generada por el aplicativo, los días laborados

del mes y se empleó los tiempos estándar definidos para cada frente y actividad. A continuación, en la **Tabla 9** se presenta la comparación de la producción histórica y la producción con los métodos propuestos.

Mes	Días Trabajados	Histórica	Modelo Matemático		Regla de despacho FIFO	
		Producción (ton)	Producción (ton)	Δ%	Producción (ton)	Δ%
Agosto	24	417	456	9.4	456	9.4
Septiembre	21	353	399	13	399	13
Octubre	25	466	475	1.9	475	1.9

Tabla 9, Comparación de la producción histórica vs métodos de solución con producción estándar.

Fuente, propia.

La estandarización del proceso de extracción de carbón presenta beneficios en términos de volumen de producción extraído. Como se evidencia en la **Tabla 9**, con la implementación de los métodos de solución la producción mensual 1,9% y el 13% respecto a la producción histórica.

Respecto a los indicadores de desempeño definidos en el apartado de “Estudio de eficiencia” se realizó una comparación del comportamiento promedio histórico y del aplicativo con el escenario estándar. A continuación, en la **Tabla 10** se muestra la comparación de los indicadores.

Indicadores de Desempeño	Promedio mensual histórico	Regla Fifo	Modelo de Optimización	Variación regla fifo (%)	variación modelo de optimización(%)
F.O Utilidad Operacional (miles \$)	10.725.579	13,506,359	13,529,359	25,92	26.14
Rendimiento Combustible (tonelada/gal)	1.51	1,62	1,62	7,28	7,28
Costos Fijos x Coche (\$/coche)	23867	18204,58	18204,58	-23,72	-23,72
Producción x Frente (tonelada)	103	109,25	109,25	6,06	6,06

Tabla 10, Comparación de indicadores de desempeño del método actual vs método propuesto.

Fuente, propia.

De la anterior tabla puede decirse que:

- La utilidad operacional arrojada por el modelo de optimización logra incrementarse en un 26,14% respecto al promedio histórico, mientras que la regla FIFO incrementa un 25,92%. La variación se debe a que el modelo de optimización busca maximizar las utilidades.
- Respecto al indicador del combustible se logra incrementar la producción en un 7,28% con la misma cantidad de recurso.
- Los costos fijos disminuyeron en \$5663 por coche producido equivalente al 23,72%, lo que se verá reflejado en una mayor utilidad.
- Finalmente, se observa una mayor productividad por frente activo ya que se logra incrementar este indicador en un 6,06%.

7. Limitaciones, conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones.

En el estudio de eficiencia se recolectaron datos estadísticamente significativos que permitieron identificar las variables y parámetros que intervienen directamente en la producción de la mina, información que fue utilizada posteriormente para el diseño del aplicativo.

A partir del análisis estadístico se encontró que las medias entre tiempos de extracción de una misma zona (norte o sur) son estadísticamente iguales debido a que presentó un p value inferior al 5% y diferencias significativas en la prueba Tukey. Además, se evidenció que el tiempo promedio de envasado es el mismo independientemente del frente, al tener un p value superior al 5%. Este análisis da cabida a un método para la estimación de tiempos de futuros frentes activos, dando así una respuesta a la variabilidad de la explotación de frentes y a las dificultades del estudio de tiempos en una mina subterránea.

La metodología propuesta para la estandarización de los tiempos de las actividades de la mina, consiste en adicionar suplementos a los tiempos observados. Dichos suplementos hacen parte del estudio de tiempos y movimientos y corresponden a una holgura del 24% sobre los tiempos observados. El uso de estos suplementos permite tener en cuenta factores ambientales, físicos y psicológicos a los cuales está sometido un minero en el desarrollo de su labor y que afectan directamente la producción de la mina.

Los escenarios pesimista, estándar y optimista permitieron tener un panorama más amplio sobre las capacidades de la mina. Encontrando así que al tener 4 frentes activos y un turno de operación, la producción mensual ideal es de 552 toneladas, la producción mensual real es de 418 toneladas y la producción mínima mensual es de 352 toneladas.

Ejecutando el modelo matemático con las mismas condiciones de la situación actual de la empresa se obtuvo una utilidad operacional de \$13,529,359/mes, que muestra un incremento del 26.14% respecto a la utilidad promedio generada actualmente por la mina de \$10.725.579/mes. Se logró esta mejora al reducir los costos fijos por coche en un 23,72% y un aumento de la productividad por frente de 6,06%.

La inclusión de Solver Studio en el aplicativo representa un valor agregado ya que permite: ejecutar, modificar y obtener resultados de un modelo de programación lineal sin tener que salir de la herramienta Microsoft Excel facilitando la propuesta final esperada por la empresa.

El modelo de optimización integrado en el aplicativo cumple con el requerimiento de tiempo de ejecución al tener máximo 4 frentes activos. Por esta razón, se propuso la regla FIFO como solución alterna del problema, la cual entrega soluciones con gap máximo del 29,11% en menos de un segundo de ejecución.

Con la estandarización de los tiempos y la programación generada por el aplicativo, se obtuvo una mejora de hasta el 13% en la producción comparado con el método actual. Lo anterior se debe a que al programar la producción con el aplicativo: se elimina la interferencia de coches, se realiza una mejor distribución de los horarios de acuerdo a la necesidad de la mina y se pueden definir metas de explotación por frente.

El aplicativo diseñado tiene la capacidad de ser dinámico, por lo que brinda al usuario la posibilidad de variar los frentes activos y modificar parámetros de tiempos y costos cada vez que lo requiera. Adicionalmente, el aplicativo permite visualizar los indicadores de desempeño diseñados y la programación detallada de las actividades de la mina sirviendo como herramienta cuantitativa para una toma de decisiones precisa y eficaz.

Recomendaciones.

Al analizar los resultados de este proyecto se encontró que no es posible llegar a la meta esperada de 1.000 Ton/mes con las condiciones actuales, razón por la cual se recomienda implementar 2 turnos de operación con 5 frentes en explotación, con lo que se alcanzaría una producción mensual de 1012 toneladas.

A pesar de que el aplicativo tiene posibilidad de entregar la planeación de la producción generada a partir del modelo matemático, se recomienda al usuario generar la solución con la regla de despacho cuando los frentes activos sean superiores a 4, ya que el tiempo de ejecución del modelo superaría las dos horas. Además se recomienda hacer uso de los tiempos estándar para tener una planeación más acertada.

Para dar continuidad al proyecto se recomienda realizar el control de la producción, de esta forma se podría dar seguimiento al cumplimiento de la planeación de la producción otorgada por este proyecto. Así mismo, esta investigación se puede escalar a la bocamina que durante el desarrollo de este estudio se encontraba en fase exploratoria.

Limitaciones.

Los datos históricos de la mina analizados en el desarrollo de trabajo de grado, recolectados en el periodo de agosto a octubre de 2019 presentan variaciones respecto a los datos estudiados en proyecto de grado, obtenidos entre julio de 2018 y enero de 2019. Estas variaciones se deben a las condiciones cambiantes de la mina originadas por: planificación de exploración minera, cierre de frentes por agotamiento en sus reservas de carbón y por cambios en las políticas organizacionales.

8. Anexos o Apéndices

Nº	Nombre del Anexo	Formato	Relevancia
1	Producción histórica y matriz de calificación	xlsx	4
2	Formatos recolección datos	xlsx	2
3	Datos recolectados	xlsx	4
4	Estadística descriptiva	xlsx	4
5	Valoración de suplementos	xlsx	5
6	Análisis de la situación actual	xlsx	5
7	Aplicativo diseñado	xlsm	5
8	Análisis estadístico	xlsx	5
9	Video funcionamiento aplicativo	mp4	4

Referencias

Andrade, A. M., A Del Río, C., & Alvear, D. L. (2019). Estudio de Tiempos y Movimientos para Incrementar la Eficiencia en una Empresa de Producción de Calzado. *Información tecnológica*, 30(3), 83-94.

Alvarado, J. A., & Obagi, J. J. (2008). *Fundamentos de inferencia estadística*. Pontificia Universidad Javeriana.

Campeau, L.-P., & Gamache, M. (2019). Short-term planning optimization model for underground mines.

Computers & Operations Research. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.02.005>

Castro, R. (2014). Análisis documental del proceso de toma de decisiones en la minería de carbón en Colombia,(66) <http://www.unihorizonte.edu.co/revistas/index.php/TECKNE/article/download/135/130>

DANE. (2017). Análisis del Comportamiento del Pib Minero en el Tercer Trimestre De 2017.

https://www.minminas.gov.co/documents/10192/23900781/050917_pib_ii_trim_2017.pdf/60375c5e-c46b-47ad-8225-189789dbbaf7

- Díaz, J. M. O., Abril, F. G. M., & GARZÓN, J. A. G. (2010). Salud y trabajo: minería artesanal del carbón en Paipa, Colombia. *Avances en Enfermería*, 28(1), 107-115.
- Ferro, N. S., Benavides, J., Cabrera, P., Zapata, J. G., Cadena, C., Páez, M. M., ... & Devis, L. (2011). Pequeña y mediana minería de carbón del interior del país: Alternativa de comercialización y financiación a partir de la conformación de alianzas estratégicas (No. 009605). Fedesarrollo.
- Glosario Técnico Minero (2003).
<https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosariominero.pdf>
- Graves, Stephen. (2002). Manufacturing Planning and Control.
- Jáuregui, O. A. (2011). Reducción de los costos operativos en mina, mediante la optimización de los estándares de las operaciones unitarias de perforación y voladura. Lima: Pontificia universidad católica del Perú.
- Kanawaty, G. (2011). *Introducción al estudio del trabajo* (No. 65.015). OIT.
- Khan, A., & Niemann-Delius, C. (2018). A Differential Evolution based approach for the production scheduling of open pit mines with or without the condition of grade uncertainty. *Applied Soft Computing*, 66, 428–437. <https://doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1016/j.asoc.2018.02.010>
- King, B., Goycoolea, M., & Newman, A. (2017). New integer programming models for tactical and strategic underground production scheduling. *Mining Engineering*, 69(3), 37–42.
<https://doi.org/10.19150/me.7360>
- Kumral, M. (2012). Production planning of mines: Optimisation of block sequencing and destination. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 26(2), 93–103.
<https://doi.org/10.1080/17480930.2011.644474>
- Martinez, M. A., & Newman, A. M. (2011). A solution approach for optimizing long- and short-term production scheduling at LKAB's Kiruna mine. *European Journal of Operational Research*, 211(1), 184–197.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.12.008>
- Mathur, K., & Solow, D. (1996). Investigación de operaciones: el arte de la toma de decisiones. Pearson Prentice Hall
- Mula, J., Poler, R., & García, J. P. (2006). Evaluación de sistemas para la Planificación y Control de la Producción. *Información Tecnológica*, 17(1), 19–34.
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642006000100004>
- Nahmias, S., Castellanos, A. T., Murrieta, J. E. M., Hernández, F. G., Nudiug, B., Juárez, R. A., & Milanés, J. Y. (2007). *Análisis de la producción y las operaciones* (Vol. 57). McGraw-Hill Interamericana.
- O'Sullivan, D., & Newman, A. (2015). Optimization-based heuristics for underground mine scheduling. *European Journal of Operational Research*, 241(1), 248–259. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.08.020>
- Plan de Desarrollo (2015). Desarrollo Productivo. Boyacá, Colombia.
<https://www.boyaca.gov.co/images/planes/plan-de-desarrollo/pdd2016-02-D-Productivo.pdf>
- Sepúlveda, G., & Gómez, C. (2015). Implementation of strategic planning to mining in Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, (37), 20–24. <https://doi.org/10.15446/rbct.n37.48557>
- Simonassi, L. E. (2009). Capacitación Laboral: Análisis Con El Diagrama De Causas Y Efecto. *Temas de Management*, 7, 18–22.
<https://search-ebsohost-com.ezproxy.javeriana.edu.co/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=51674814&lang=es&site=eds-live>
- Sipper, D., & Bulfin, R. L. (2004). *Planeación y control de la producción* (No. TS155. S56 1998.). McGraw-Hill.
- Sun, Z., Zhao, Y., Li, Z., & Cao, Z. (2011). A coal mine production scheduling optimization system and its application. *Proceedings - 2011 7th International Conference on Natural Computation, ICNC 2011*, 4, 1889–1892. <https://doi.org/10.1109/ICNC.2011.6022568>
- Torres, J. R. M., Arboleda, C. D. P., & Frein, Y. (2002). Minimización del tiempo total de flujo de tareas en una sola máquina: Estado del arte. *Ingeniería y Desarrollo*, (12), 118-129.
- Unidad de Planeación Minero-Energética. (2014). Indicadores de la minería en Colombia, versión preliminar, (69), 1–127. https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/23966843/231118_comportamiento_pib_i_trim_2018.pdf/6578fedb-c87c-4afc-8370-f46584c318e3

Yu, S., Zheng, S., Gao, S., & Yang, J. (2017). A multi-objective decision model for investment in energy savings and emission reductions in coal mining. *European Journal of Operational Research*, 260(1), 335–347. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.12.023>

Glosario

- **Bocamina:** Sitio en superficie por donde se accede a un yacimiento mineral.
- **Malacate:** Equipo utilizado para el ascenso o el descenso de materiales (mena, roca, carbón y otros), personal o suministros, en una mina (particularmente minas subterráneas) mediante la jaula o skip. Está constituido por un tambor en el que se enrolla el cable al que está unida la jaula.
- **Coches:** En minería, carros de madera o hierro para transportar el carbón o el mineral a la superficie. El término "coche" se utiliza especialmente en las labores mineras donde el transporte es manual (tracción humana).
- **Cochado:** Extracción de un coche cargado de carbón.
- **Frente:** 1. Lugar donde explotan los minerales de interés económico. 2. Lugares donde se ejecutan las tareas de avance y desarrollo de la mina.
- **Guía:** Una galería subterránea que sigue el rumbo del cuerpo mineralizado (vena, veta, filón, manto o capa). Las guías no tienen salida directa a la superficie y están destinadas al transporte de cargas, circulación de personal, ventilación, desagüe, y conducen a los frentes de trabajo.
- **Tornamesa:** Plataforma circular giratoria que sirve para cambiar de vía a los trenes y locomotoras.
- **Aguja:** Zona de embarcación de coches en una aguja situada en el malacate.