



Vigilada Mineducación

REDEFINICIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO DE ARIS MINING MARMATO EN TÉRMINOS
DE PRODUCTIVIDAD, RENTABILIDAD Y EFICIENCIA

Redefinition of the Aris Mining Marmato operating system in terms of productivity,
profitability and efficiency

CRISTIAN DAVID ECHEVERRY SÁNCHEZ

Trabajo de Grado como requisito para la obtención del título académico de Magíster en
Administración

Asesor

Juan Esteban Escalante Gómez

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE ADMINISTRACIÓN
MAESTRÍA EN ADMINISTRACIÓN - MBA
PEREIRA
2024

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABLAS	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
JUSTIFICACIÓN	9
OBJETIVOS	10
Objetivo general	10
Objetivos específicos	10
MARCO DE REFERENCIA	11
Planeación de operaciones	11
Cadena de abastecimiento	12
Producción	13
METODOLOGÍA	15
Enfoque	15
Alcance	15
Diseño	16
Población	16
Instrumento	17
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	18
Fase 1. Identificación de la estructura actual del sistema operativo y de las áreas con mayores dificultades a nivel estructural y de cumplimiento	18
Geología	18
Planeación (Planeamiento)	19
Cadena de abastecimiento	22
Producción	23
Fase 2. Benchmarking del sistema operativo Aris Mining para identificar las áreas susceptibles de cambios o mejoras	24

Control de intervalos cortos.....	24
Identificación de cuellos de botella	28
Indicadores de gestión	31
Fase 3. Adaptación / diseño del nuevo sistema operativo a partir de las mejores prácticas identificadas	34
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	37
Fase 1. Identificación de la estructura actual del sistema operativo y de las áreas con mayores dificultades a nivel estructural y de cumplimiento	37
Fase 2. Benchmarking del sistema operativo Aris Mining para identificar las áreas susceptibles de cambios o mejoras.....	37
Fase 3. Adaptación / diseño del nuevo sistema operativo a partir de las mejores prácticas identificadas	38
CONCLUSIONES.....	39
REFERENCIAS	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del marco conceptual	11
Figura 2. Componentes diseño metodológico	15
Figura 3. Modelo geológico de estructuras principales	19
Figura 4. Comparativo de toneladas planeadas vs. reales en método mecanizado	21
Figura 5. Comparativo de toneladas planeadas vs. reales en método convencional	21
Figura 6. Disponibilidad operativa de equipos en mina	23
Figura 7. Procesos de planificación minera con enfoque de control de intervalos cortos....	25
Figura 8. Procesos en el área de planificación.....	26
Figura 9. Procesos de intervalos cortos para la definición de cronogramas.....	27
Figura 10. Procesos de inspección y retroalimentación en intervalos cortos	27
Figura 11. Arquitectura de <i>hardware</i> para el control de intervalos cortos.....	28
Figura 12. Modelo de identificación de cuellos de botella y clasificación.....	29
Figura 13. Niveles jerárquicos en sistemas de producción minera.....	30
Figura 14. Esquema general de los niveles jerárquicos de la producción de una mina.....	31
Figura 15. Curva de costo de operaciones vs. producción	32
Figura 16. Curva costo de operación vs. personal.....	32
Figura 17. Curva de producción vs. personal	33
Figura 18. Sistema de coordenadas de tres ejes	33
Figura 19. Diagrama de flujo en la operación minera	34
Figura 20. Diseño de plataforma inteligente para operaciones mineras.....	36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Seguimiento del plan de producción	20
Tabla 2.	22

RESUMEN

Este trabajo de grado se orienta a redefinir, en términos de productividad, la rentabilidad y eficiencia del sistema operativo de la empresa Aris Mining Marmato. Para tal propósito, se desarrolló una investigación con enfoque cuantitativo, alcance descriptivo y diseño no experimental, en la que se exploró, a través de una estructura de tres fases (identificación de la estructura actual + benchmarking sistema operativo + adaptación/diseño de un nuevo sistema) aspectos críticos vinculados al modelo de negocio, su desempeño y potencial de permanencia. El diagnóstico efectuado reveló que el sistema operativo de la mina (soportado por distintas áreas: Producción, Planeación, Geología, Mantenimiento, Abastecimiento) no dispone de modelos precisos de estimación de recursos, de sistemas de información, de iniciativas de monitoreo, de políticas de abastecimiento, de asignación de activos y de métricas de seguimiento concretas, que permitan identificar variaciones y planes de acción ante problemáticas, coyunturas o anomalías en la operación. Por otro lado, y a partir de la revisión de la literatura llevado a cabo, se propuso la implementación de una metodología híbrida que integre la identificación de cuellos de botellas y el control de intervalos cortos. De esta forma, se podría mejorar en las condiciones de comprensión y definición del sistema, la articulación de los recursos y planes, el seguimiento al desempeño de la operación, la centralización de datos, la formulación de métricas, el seguimiento y la formulación de ratios.

Palabras clave: Planeación de operaciones, Cadena de abastecimiento, Producción, Sector minero.

ABSTRACT

This degree work is oriented to redefine, in terms of productivity, profitability and efficiency, the operating system of the company Aris Mining Marmato. For this purpose, a quantitative approach research, descriptive scope and non-experimental design was developed, which was explored through a three (3) phases structure (identification of the current structure + benchmarking of the operation system + adaptation/design of a new system), critical aspects related to the business model, its performance and potential for permanence in market. The diagnosis carried out revealed that the mine's operating system (supported by different areas: Production, Planning, Geology, Maintenance, supply) does not have accurate resource estimation models, information system, monitoring initiatives, supply policies, asset allocation and concrete follow-up metrics to identify variations and action plans to face the problems, situations, or anomalies in the operation. On the other hand, and based on the literature review carried out, the implementation of a hybrid methodology that integrates the identification of bottlenecks and the short interval control was proposed. In this way, it would be possible to improve the conditions for understanding and defining the system, the articulation of resources and plans, the follow-up of the operation's performance, the data centralization, metrics formulation, follow-up and ratios development.

Keywords: Operations planning, Supply chain, Production, Mining industry.

INTRODUCCIÓN

La optimización en el uso de recursos y procesos constituye un determinante de competitividad y permanencia para las organizaciones (Heizer & Render, 2009). Bajo este escenario, las empresas buscan fortalecer sus capacidades críticas a nivel de generación de valor, a partir de un marco orientado a la productividad, la eficiencia y el desempeño (Yu, Ramanathan, Wang, & Yang, 2018). Estos aspectos, interrelacionados desde su propósito y foco, impactan de manera significativa el cumplimiento de los objetivos, tanto funcionales (operativos y financieros) como estratégicos de las firmas (Posteucă, 2023).

Las condiciones actuales de mercado plantean una dinámica que requiere de la implementación de mecanismos, herramientas y modelos de mejora continua (Kaizen, Six Sigma, Lean Manufacturing, entre otros), que contribuyan a la materialización de las metas definidas (Kahraman, Rogers, & Dessureault, 2020). Ante este escenario, desde el sector minero (el cual enfrenta desafíos de volatilidad, políticos y técnicos que afectan la rentabilidad del negocio) se busca explorar iniciativas que deriven en un mayor grado de eficiencia en sus sistemas productivos (en una industria caracterizada por grandes inversiones y bajos retornos).

Este trabajo de grado tiene por objeto redefinir, en términos de productividad, la rentabilidad y la eficiencia, el sistema operativo de la empresa Aris Mining Marmato. Para tal fin, se plantea a continuación el problema, la justificación y los objetivos del estudio. De manera posterior se estructura el marco conceptual y el diseño metodológico. Por último, se presentan los resultados alcanzados y las conclusiones derivadas del ejercicio investigativo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Aris Mining es una compañía minera canadiense (listada en la bolsa de valores de Toronto) dedicada, fundamentalmente, a la producción de oro (a partir de una estrategia de adquisición de proyectos mineros en operación o en fase de desarrollo cercana a la operación). En Colombia, la firma opera dos proyectos en fase productiva (Segovia, Antioquia y Marmato, Caldas), que generan un total aproximado de 230 mil onzas de oro al año. Además, participa del proyecto Soto Norte, iniciativa ubicada en el departamento de Santander y que se encuentra actualmente en etapa de desarrollo.

Como consecuencia de distintos factores, la organización se enfrenta a problemáticas de eficiencia y productividad en el plano operativo. Esta situación ha motivado el surgimiento de nuevos departamentos, enfocados en la gestión y optimización de los planes de desarrollo, producción y ejecución de la mina. Sin embargo, los esfuerzos realizados a la fecha no han logrado impactar de forma notable las condiciones de desempeño, pues se continúan presentando dificultades de cumplimiento en términos de volumen e, incluso, sobrecostos, derivados de fuertes inversiones en equipos y contratación de nuevo personal.

Teniendo en cuenta la problemática planteada y con el fin de generar mejores niveles de productividad, rentabilidad y eficiencia (los resultados alcanzados no han sido los esperados), este trabajo de grado plantea la redefinición del sistema operativo de la mina ubicada en Marmato, Caldas. De esta manera, y a través de los entregables obtenidos, se espera contribuir a la optimización en el uso de recursos y a las condiciones de creación de valor y potencial de permanencia en el largo plazo de la organización.

JUSTIFICACIÓN

En el 2022, el sector minero alcanzó cifras récord de exportaciones (20.387 USD millones, es decir, un crecimiento del 52 % frente a 2021), lo que, sumado a una tendencia alcista en los precios internacionales, incrementó la participación de esta actividad económica en el PIB nacional (en el que el 15 % de las exportaciones corresponden a la producción de oro) (Asociación Colombiana de Minería, 2023). Estas condiciones favorables de mercado han llevado a Aris Mining y a sus filiales a buscar soluciones en términos de eficiencia, capacidades y uso de los recursos, en aras de capitalizar los beneficios derivados de un entorno propicio. Bajo esta lógica, se formula el presente trabajo de grado, iniciativa orientada a redefinir, en términos de productividad, rentabilidad y eficiencia, el sistema operativo de la empresa. A continuación, se exponen algunos de los argumentos subyacentes a su desarrollo:

- *Producción:* este estudio contribuye, a través del análisis de distintos modelos operativos, a disponer de una propuesta que impacte de manera positiva los volúmenes de fabricación de la firma.
- *Capacidades:* la identificación de los principales cuellos de botella (que afectan directamente la producción y los niveles de eficiencia de los procesos operativos) permite encaminar acciones para mejorar las condiciones de desempeño, utilización y disponibilidad en los procesos críticos.
- *Costos:* la minimización de los costos asociados a los procesos productivos (vía eficiencia) contribuye a fortalecer los resultados financieros de la organización (lo que a su vez impacta sus probabilidades de permanencia en el largo plazo).
- *Eficiencia:* el mapeo de los procesos permite identificar fuentes de ineficiencia (y pérdida) en los procesos de trabajo. De esta forma, se pueden desarrollar planes que permitan un flujo de trabajo constante y en concordancia con los planes trazados.

OBJETIVOS

Objetivo general

Redefinir, en términos de productividad, rentabilidad y eficiencia, el sistema operativo de la empresa Aris Mining Marmato.

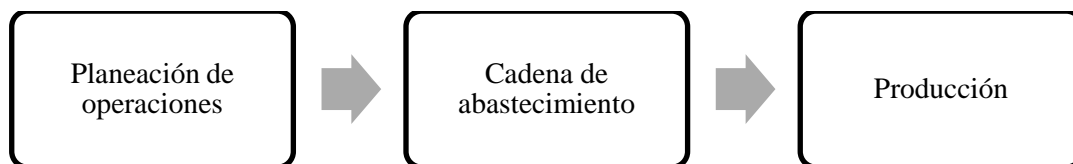
Objetivos específicos

- Identificar la estructura actual del sistema operativo de Aris Mining, así como las áreas con mayores dificultades a nivel estructural y de cumplimiento.
- Comparar el sistema operativo de la empresa Aris Mining frente a la literatura existente para la industria para la identificación de las áreas susceptibles de cambios o mejoras.
- Adaptar o diseñar un sistema operativo, a partir de las mejores prácticas identificadas en el sector en términos de productividad, rentabilidad y eficiencia.

MARCO DE REFERENCIA

Este capítulo presenta una revisión sistemática de la literatura, con el propósito de explorar diferentes términos y variables relevantes para el estudio. Los conceptos y análisis fueron desplegados de manera secuencial a partir de la siguiente estructura (ver figura 1).

Figura 1. Estructura del marco conceptual



Fuente: Elaboración propia.

Planeación de operaciones

La planeación de operaciones busca alinear las políticas y estrategias de la organización con la producción de corto plazo (Jacobs, 2022). Para tal fin, suelen considerarse distintas alternativas: (a) las estrategias de persecución (en las que se intentan lograr tasas de producción para cada periodo y que correspondan al comportamiento de la demanda para ese mismo periodo, mediante la variación de la fuerza laboral: contratación o despido, horas extras, subcontrataciones); (b) las estrategias de nivelación (plan agregado en el que se busca mantener una fuerza de trabajo constante); y (c) las estrategias mixtas (dado que las estrategias puras usualmente no suelen generar los mejores resultados, se propone el uso de planes que combinen decisiones asociadas a inventarios, personal, subcontratación, entre otros) (Krajewski, Malhotra, & Ritzman, 2013).

Las decisiones de planeación de corto, mediano y largo plazo contemplan los pronósticos de demanda como parte del proceso de balanceo entre los recursos existentes (requerimientos específicos de maquinaria, mano de obra e instalaciones) y las exigencias a nivel de mercado (a partir de tendencias, patrones, entre otros) (Goldratt, 1990; Render & Heizer, 2014). Estas proyecciones, estructuradas a partir de técnicas cualitativas y

cuantitativas, permiten planificar aspectos fundamentales en términos de oferta, como contratación, fuerza de trabajo, tasas de producción, inventarios, compras (Collier & Evans, 2019).

Los sistemas de información desempeñan un papel clave en el ámbito de la planeación de operaciones, toda vez que permiten integrar y coordinar todas las actividades relacionadas con los procesos de aprovisionamiento, producción y distribución de las firmas (Sheu & Wacker, 2001; Orlicky, Plossl, & Wight, 2003). De esta forma, se espera que los sistemas productivos logren adaptarse y ajustarse de manera ágil, estable (con calidad y con bajos niveles de variabilidad) y eficientemente a las dinámicas del mercado (Garzon Hernandez, 2018; Pérez, Torres, Castillo, & Valdés, 2021).

Cadena de abastecimiento

Las cadenas de abastecimiento o suministro involucran a los distintos participantes del canal de flujo (fabricantes, proveedores, transportadores, almacenes, minoristas e incluso clientes) (Christopher & Holweg, 2011; Chopra & Meindl, 2016). Bajo este marco, surgen metas de eficiencia y efectividad que se orientan, desde la optimización de recursos y procesos, a mejorar el desempeño y las probabilidades de permanencia de las firmas (Coyle, Gibson, Novack, & Langley, 2018). Lo anterior implica la formulación y despliegue de planes y estrategias, los cuales dependen en gran medida de las prioridades competitivas definidas, entre las que se destacan cuatro (4) tipologías específicas: eficientes (mayor eficiencia en términos de costos); (b) cobertura de riesgo (agrupa diferentes cadenas y comparte recursos para que los riesgos de interrupción del suministro también sea compartido); (c) receptivas (flexible a los cambios y necesidades de los clientes); y (d) ágiles (combina todas las estrategias para responder a la demanda cambiante mientras se minimizan los costos y los riesgos de interrupción del suministro) (Jacobs, 2022; Lee, 2002; Sanders, 2012).

La administración efectiva de estas cadenas requiere también de la identificación y de la constante evaluación de las mejores prácticas existentes (Kathawala & Abdou, 2003). Por esta razón, y teniendo en cuenta el impacto de los procesos de planeación, aprovisionamiento, producción y distribución en las condiciones de competitividad de las organizaciones, la literatura subraya la importancia de los proyectos de *benchmarking*

(Render & Heizer, 2014). Estas iniciativas, que permiten la evaluación y comparación, suelen desplegarse a través del modelo de referencia de operaciones de la cadena de suministro, el cual analiza cinco aspectos (el plan, la fuente, la elaboración, la entrega y el retorno) a través de 550 indicadores que ayudan a monitorear las dinámicas de performance del canal en múltiples dimensiones (satisfacción del cliente, servicio, tiempo, flexibilidad, costo, calidad, diseño, impacto social, premios, certificaciones, desperdicios, consumo energético, contaminación por transporte, entre otros) (Fadaki, Rahman, & Chan, 2019; Kottala, 2021; Tundys & Wiśniewski, 2018).

Producción

Los procesos de producción constituyen un aspecto fundamental para las firmas, toda vez que permiten materializar aspectos tangibles de sus propuestas de valor (Rahman, 1998). Por este motivo, deben formularse planes y acciones que mejoren el desempeño y la eficiencia (en costos, tiempos, recursos) de los sistemas de fabricación (Bruch & Bellgran, 2013; Goldratt, 1990). Lo anterior implica un análisis de las distintas restricciones existentes (limitaciones de las dependencias técnicas, actividades de aseguramiento de la calidad, factores humanos y equipos de trabajo inestables, ausencia de esfuerzo, aspectos de planificación, entre otras) (Islam, Chavez, Birkie, & Bellgran, 2022; Kahraman, Rogers, & Dessureault, 2020). Además, requiere del uso de herramientas de automatización e integración asistida por computador que permitan el diseño de modelos de optimización, y de tecnologías, como las redes neuronales, que promuevan la integración vertical entre los centros de procesamiento y los y distintos niveles de operación implicados (Angizeh, Montero, Vedpathak, & Parvania, 2020; Guo, Li, Zhong, & Huang, 2021; Xia, An, Zhang, & Liu, 2022; Zhou, y otros, 2022).

Los indicadores de gestión se convierten en otro aspecto a considerarse en el marco de las actividades de manufactura (producción). Esta herramienta contribuye a definir prioridades y a monitorear el cumplimiento de distintas métricas y objetivos, a partir de metodologías multifase de medición de desempeño en los procesos productivos (Verhaelen, Mayer, Peukert, & Lanza, 2021; Werner, Yamada, Domingos, Leite, & Pereira, 2021).

Adicionalmente, facilita la identificación de aspectos críticos a nivel de generación de valor, productividad, eficiencia, y capacidad de respuesta (Minh, 2023).

METODOLOGÍA

En esta sección se presentan todos los elementos asociados al método. Para tal fin se hace referencia al enfoque elegido, al alcance definido, al diseño seleccionado, a la población objeto de estudio y al instrumento utilizado.

Figura 2. Componentes diseño metodológico



Fuente: Elaboración propia.

Enfoque

Este proyecto se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, pues tiene por objeto redefinir, en términos de productividad, rentabilidad y eficiencia, el sistema operativo de la empresa Aris Mining Marmato.

Los trabajos de esta naturaleza se centran, a partir de una lógica numérica, secuencial y probatoria, en la medición, descripción, explicación y predicción de fenómenos (Martínez Ruiz, 2018). Lo anterior permite la replicabilidad y comparación de los resultados frente a otros contextos; y, a la vez, facilita, gracias al uso de métodos estadísticos, la identificación de relaciones de causalidad entre variables (Gómez, 2016).

Alcance

Esta investigación presenta un alcance descriptivo, dado que plantea la redefinición del sistema operativo de la empresa Aris Mining Marmato en su mina, ubicada en Marmato, Caldas.

Los estudios que contemplan este alcance pretenden dar a conocer las principales características, partes, categorías, perfiles y clases asociados a un fenómeno o población (Olaz & Medrano, 2014). Para tal fin, se efectúa una exploración exhaustiva, clara y completa de sus atributos observables y componentes esenciales, aunque desde una perspectiva no concluyente, pues no existen explicaciones o razones de los hechos (González, 2009).

Diseño

Para dar cumplimiento al objetivo definido (redefinición, en términos de productividad, rentabilidad y eficiencia, del sistema operativo de la empresa Aris Mining Marmato) este proyecto contempla un diseño no experimental.

Los diseños no experimentales buscan analizar y categorizar fenómenos, conceptos, poblaciones o variables bajo sus condiciones naturales de ocurrencia, dado que no consideran la manipulación e intervención deliberada de variables por parte del investigador (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018). Este tipo de trabajos, limitados al análisis ex post-fact de los hechos y en los que no se hace uso de grupos de control, pueden generar evidencias de causalidad, pero estas no pueden demostrarse desde un plano teórico (Novosel, 2023).

Población

La población es el conjunto de todos los elementos que representan características determinadas y que, bajo parámetros como el promedio, la varianza y la dispersión, corresponden a una misma definición (en términos de elementos, unidades de muestreo, alcance y tiempo) (Lerma González, 2022). La muestra, por su parte, constituye un subconjunto finito y representativo (para efectos de inferencias o generalizaciones) del universo de estudio (extraído de forma probabilística o no probabilística), el cual se utiliza cuando por razones de tamaño, limitaciones técnicas o geográficas no resulta posible abordar todos los elementos de la población (Ramírez Montañez & Calles Moreno, 2021).

Para el caso específico del presente trabajo de grado se define a la firma Aris Mining Marmato como universo poblacional. Para efectos de muestra se considerarán,

exclusivamente, las áreas y procesos de mayor criticidad e impacto operativo en la mina ubicada en Marmato, Caldas.

Instrumento

Un instrumento es aquel medio empleado para la recopilación y medición de datos referentes al objeto de análisis (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018). Este conjunto de recursos (primarios y secundarios), del que se esperan resultados replicables y con validez para efectos de inferencia, permiten el registro y almacenamiento de la información necesaria para el desarrollo del estudio (Bernal, 2010).

Considerando el propósito de este proyecto de grado y de cara a la recolección de la información, se hará uso de fuentes e instrumentos de carácter primario (datos de extracción de material, costos, porcentajes de cumplimiento, rendimientos, tiempos de abastecimiento de la operación) y secundario (estadísticas y mejores prácticas del sector minero).

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A partir del objetivo general, se procede con el análisis y redefinición (en términos de productividad, rentabilidad y eficiencia) del sistema operativo de la empresa Aris Mining Marmato. Para tal fin, se contempla una secuencia de tres (3) fases, las cuales se abordan a continuación.

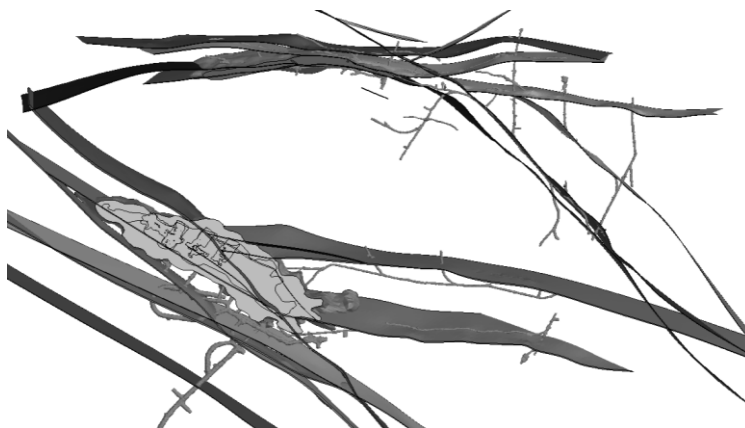
Fase 1. Identificación de la estructura actual del sistema operativo y de las áreas con mayores dificultades a nivel estructural y de cumplimiento

Aris Mining Marmato desarrolla actividades primarias (generación de material - área de operaciones) y de apoyo (como son planeación, geología, mantenimiento y abastecimiento), las cuales se describen a partir de una lógica secuencial que se corresponde con la estructura interna de la firma.

Geología

El área de Geología establece las zonas de interés y brinda información respecto a los recursos minerales presentes en el depósito. Para tal fin, se integran *softwares* de modelación 3D (que integran toda la información geológica y estiman recursos de forma precisa). Además, se dispone de bases de datos (actualizadas mensualmente) y de sistemas de cartografía CAD que han permitido elaborar modelos geológicos para las principales estructuras presentes en el depósito (ver figura 3). Cabe mencionar que a la fecha no se cuentan con modelos de estimación, insumo crítico para la planificación de las zonas de minado y producción (pero sí se dispone de tablas de Excel que permiten realizar proyecciones mensuales de recursos).

Figura 3. Modelo geológico de estructuras principales



Fuente: Elaboración propia.

Planeación (Planeamiento)

Esta área usa la información generada por las distintas dependencias para formular, controlar y dar seguimiento a los planes de producción de cada periodo (los cuales se elaboran de acuerdo con los recursos minerales, equipos y personal disponible). En la actualidad, estos planes detallan las actividades diarias por cada labor de producción (así como de desarrollo minero). Adicionalmente, definen el tonelaje esperado según ratios establecidos previamente, y proyectan la generación de oro por tonelada extraída. Estos datos se consignan en archivos de Excel, los cuales permiten comparar el registro de los resultados reales totales de cada turno de trabajo versus lo planeado (ver tabla 1).

Tabla 1. Seguimiento del plan de producción

Date	Desarrollo Plan				Relleno Plan							
	UP m Daily	UP m MTD	UP m Daily (Plan)	UP m MTD (Plan)	Backfill Daily	Backfill MTD	Backfill Daily (Plan)	Backfill MTD (Plan)	CRF Daily	CRF MTD	CRF Daily (Plan)	CRF MTD (Plan)
1-dic	20.8	29.7	20.8	29.7	147.2	147.2	270.92	270.92	0	0	0	0
2-dic	17.8	23	38.6	52.7	191.4	338.6	66.56	337.48	0	0	0	0
3-dic	9.92	28.6	48.52	81.3	94.7	433.3	99.74	437.22	0	0	0	0
4-dic	9.4	23.2	57.92	104.5	0	433.3	199.15	636.37	0	0	0	0
5-dic	16.7	26.2	74.62	130.7	55	488.3	255.19	891.56	0	0	0	0
6-dic	5.4	20.6	80.02	151.3	197.5	685.8	257.00	1,148.56	0	0	0	0
7-dic	3.6	28.8	83.62	180.1	172.5	858.3	316.40	1,464.95	0	0	0	0
8-dic	4.8	17.6	88.42	197.7	202.3	1060.6	244.71	1,709.66	0	0	0	0
9-dic	1.7	27.7	90.12	225.4	280.5	1341.1	281.03	1,990.69	0	0	0	0
10-dic	3.6	26.2	93.72	251.6	209.6	1550.7	320.04	2,310.73	0	0	0	0
11-dic	18.3	27.7	112.02	279.3	226.4	1777.1	333.03	2,643.76	0	0	0	0
12-dic	18.3	22.1	130.32	301.4	268.4	2045.5	260.18	2,903.94	0	0	0	0
13-dic	14.6	28.8	144.92	330.2	218	2263.5	362.53	3,266.46	0	0	0	0
14-dic	20.36	19.1	165.28	349.3	176.2	2439.7	335.37	3,601.83	0	0	0	0
15-dic	21.4	23.2	186.68	372.5	154.3	2594	333.41	3,935.24	0	0	0	0
16-dic	24.5	20.2	211.18	392.7	184.1	2778.1	390.24	4,325.48	0	0	0	0
17-dic	18.8	23.2	229.98	415.9	244.3	3022.4	350.23	4,675.72	0	0	0	0
18-dic	15	14.6	244.98	430.5	237.2	3259.6	358.34	5,034.06	0	0	0	0
19-dic	10	19.1	254.98	449.6	265.9	3525.5	352.91	5,386.97	0	0	0	0
20-dic	0	12	254.98	461.6	158.2	3683.7	305.36	5,692.33	0	0	0	0
21-dic	0	19.1	254.98	480.7	154.2	3837.9	313.45	6,005.78	0	0	0	0
22-dic	0	12	254.98	492.7	124.3	3962.2	333.06	6,338.84	0	0	0	0
23-dic	0	19.1	254.98	511.8	235.9	4198.1	327.84	6,666.67	0	0	0	0
24-dic	0	9	254.98	520.8	295.1	4494.2	143.16	6,809.83	0	0	0	0
25-dic	0	1.5	254.98	522.3	273	4767.2	-	6,809.83	0	0	0	0
26-dic	16	13.1	270.98	535.4	269.8	5037	332.07	7,141.90	0	0	0	0
27-dic	10.2	18	281.18	553.4	265.5	5302.5	315.76	7,457.66	0	0	0	0
28-dic	18.5	13.1	299.68	566.5	291.2	5593.7	324.98	7,782.64	0	0	0	0
29-dic	15.5	18	315.18	584.5	336.1	5929.8	340.16	8,122.80	0	0	0	0
30-dic	15	13.1	330.18	597.6	306.2	6236	296.41	8,419.21	0	0	0	0
31-dic	10	0	340.18	597.6	229.1	6465.1	107.53	8,526.73	0	0	0	0
			340.18	597.6		6465.1	-	8,526.73	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

La operación se desarrolla mediante dos métodos productivos: (a) método mecanizado con maquinaria (como jumbos de perforación, *dumper* y *scoops* con sistemas de voladura con perforaciones largas); y (b) método convencional de corte y relleno de vetas. El primero brinda mayor nivel de control y precisión, toda vez que presenta registros de metros avanzados, metros perforados y de disponibilidad de equipos. El método convencional, por su parte, solo permite registros de toneladas generadas al finalizar el turno o la descripción de la actividad realizada, por lo que resulta difícil conocer de manera precisa el grado de avance, así como las problemáticas enfrentadas (el reporte se realiza manualmente por el capataz de cada área, quien informa en un punto de control centralizado acerca de las toneladas generadas, los metros avanzados y los problemas identificados).

Las desviaciones reales vs. las planeadas solo se conocen una vez se ha concluido el turno (al reportarse en reuniones de cierre y apertura). Sin embargo, a la fecha no se lleva a cabo el análisis de las causas que motivan las variaciones, pues los detalles de las fallas no son debidamente tabulados o permanecen en cada área, ni tampoco se exploran planes de mejoramiento y solución a partir de la identificación de potenciales cuellos de botella en el sistema. Tal y como puede observarse (ver figuras 4 y 5), las variaciones presentadas son notables y repetitivas periodo a periodo.

Cadena de abastecimiento

Además del aprovisionamiento al interior de la mina (movilización de materiales desde los puntos de acopio), la cadena de abastecimiento se encarga de la gestión de las solicitudes de compra. En este sentido, se señalan dificultades de retraso significativas de hasta por un año, lo que dificulta el cumplimiento de las tareas asignadas durante el turno de trabajo; incluso en ítems de alta criticidad a nivel de rotación e importancia en la operación, pues su ausencia representa un paro de los procesos directamente relacionados con la generación y flujo de material (ver tabla 2).

Tabla 2. Cumplimiento cadena de abastecimiento respecto a solicitudes de operaciones

CUMPLIMIENTO			
ARTICULOS ALMACEN	CANTIDAD RECIBI	CANTIDAD SOLICITA	Cumpl Su -1
Pala Herragro Punta Redonda	1	35	3%
Tuerca Acero 1/2 Unc	800	14800	5%
Tornillo Acero 1/2 Unc X 2-1/2	390	3540	11%
Plastico Negro Calibre 8 X 50 Mts Largo X 10 Mts Ancho	6	39	15%
Arandela Plana Acero 1/2	4649	28800	16%
Clavo Comun De 3 Marca Corsan	210	1195	18%
Flexometro Stanley 5 Mts	15	81	19%
Vanilla Corrugada De 5/8 X 6 M	146	520	28%
Manguera Ponaflex 400 Psi De 1x 100 metros	450	1600	28%
Esparrago Roscado Acero 1/2 Unc X 1M	31	110	28%
Almadana De 4 Libras Herragro	2	7	29%
Vanilla Corrugada De 3/8 X 6 M	30	100	30%
Lima Triangular De 8 Marca Nicholson	25	82	30%
Alambre Galvanizado No 14	140	435	32%
Manguera Aire 1/2 100 Psi - Rollo x 100 mts	500	1470	34%
Alicate Aislado De 8 Marca Cresan	37	88	42%
Clavo Comun De 4 Marca Corsan	157	362	43%
Clavo Comun De 5 Marca Corsan	200	362	55%
Cizalla 18	9	15	60%
Tornillo Acero 1/2 Unc X 1-1/2	5865	9500	62%
Pica Herragro De Punta Y Pala	7	10	70%
SERRUCHO MINERO 3 DIENTES X PULGADA	17	22	77%
Martillo De Una De 4 Lbs	28	36	78%
Manguera Simplex De Aire 1/2	180	200	90%
Union Rapida Interplast De 4	24	25	96%
Acople Hechizo Para Manguera De 1		12	
Acople Tipo Racor 5 Piezas 1	23	111	21%
Plastico Negro Cal 04	27	106	25%
Hoja Para Segueta De 1/2X1/2 Marca Nicholson	252	466	54%
TELA POLIPROPILENO BOGOTA 2, 10 MT ANCHO VERDE	900	1575	57%
Manila Polipropileno 1/2	2600	4300	60%
Union Rapida Interplast De 3 Alta Presion	152	220	69%
Arandela De 1/2 Plana Galvanizada	250	300	83%
Hilo Polipropileno 18000 Para Amarrar	44	48	92%
Marco Para Segueta Marca Bacho	16	16	100%
Azueta Recta	12	12	100%
Cilindro Rola Ø 900 Lamina Astm A 36 Espes 1/2 Plan M8311	6	6	100%
Reduccion Bujie Galvanizada De 4 A 3	8	8	100%
Lima Triangular De 6 Marca Nicholson	5	5	100%
Cemento Gris	130	130	100%
Alambre Quemado	205	205	100%
Llave Mixta 3/4 Stanley	12	12	100%
Pintura Aerosol	36	36	100%
Tuberia 90 Mm Pe 100 Pr10 Baja Presion	150	150	100%
Alambre Dulce	25	25	100%
Vanilla Corrugada De 1/2 X 6 M	40	40	100%
Tela Polipropogota De 210 (Costal Poliet)	2513	1086	231%
MANGUERA JARDINERA 5/8	100	100	100%
Total general	21425	72628	29%

Fuente: Elaboración propia.

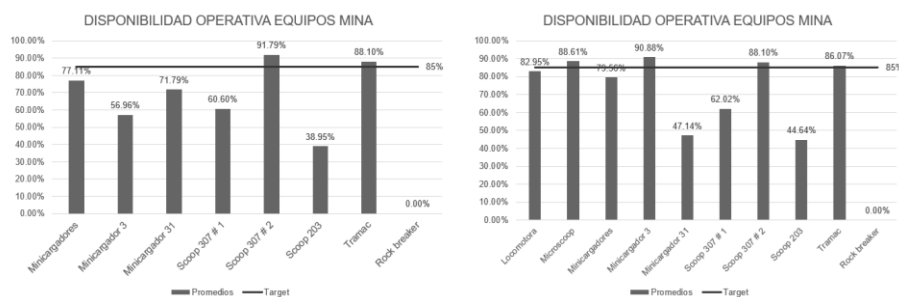
Otro aspecto que debe considerarse es el de los ratios calculados para las proyecciones de consumo, los cuales se han obtenido a partir, fundamentalmente, de datos de consumo histórico. Lo anterior, ha impedido identificar puntos de mejora y optimización en el uso de suministros.

Producción

Esta área, encargada de las labores de obtención y extracción del material, no dispone de diagramas de flujo que permitan visualizar las conexiones y vínculos existentes dentro del sistema generador. Lo anterior impide (dada la complejidad que supone el área de producción de toda la mina) entender los procesos existentes, las métricas de medición y los niveles de validación y retroalimentación para asegurar el cumplimiento de lo planificado. Además, dificulta la identificación de problemáticas, la formulación de planes de acción y la comunicación entre los distintos niveles jerárquicos de la firma (gerencia, superintendencia, jefatura, supervisor, capataz y líder de frente de trabajo)

La organización no dispone de una asignación detallada de tareas ni de tiempos estándar para efectos de planeación y seguimiento en la ejecución. Lo anterior deriva en actividades innecesarias (transporte, movimientos de material y generación de estéril que no aporta valor a futuros desarrollos mineros) que impiden concentrar los recursos en las actividades críticas del negocio. Adicionalmente, se incurre en sobrecostos de operación debido a la compra/alquiler de equipos de perforación y de acarreo de material, cuya utilización no es óptima debido a excesivos desplazamientos (ver figura 6).

Figura 6. Disponibilidad operativa de equipos en mina



Fuente: Elaboración propia.

Fase 2. *Benchmarking* del sistema operativo Aris Mining para identificar las áreas susceptibles de cambios o mejoras

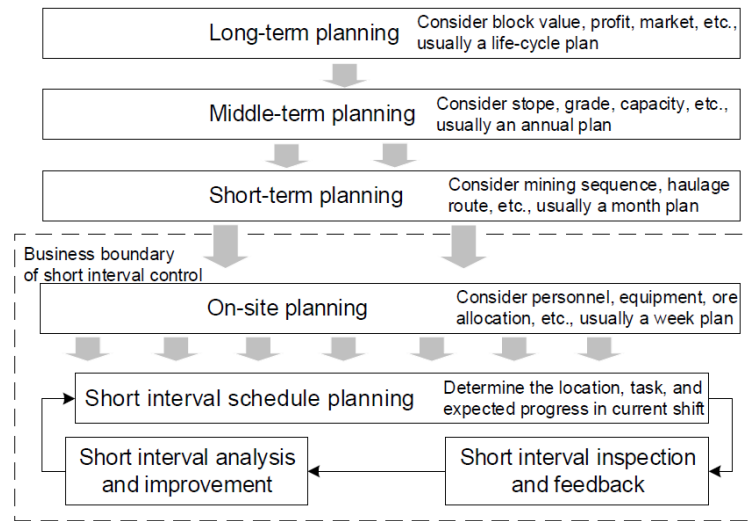
Control de intervalos cortos

Las actividades en minería pueden ser agrupadas en tres categorías: (a) las que generan valor agregado (aquellas que son esenciales para la producción y que aportan directamente beneficios económicos; estas actividades incluyen voladura, transporte, izaje, entre otros); (b) las que no generan valor agregado (procesos esenciales para completar las actividades generadoras de valor pero que no contribuyen directamente a incrementar el valor del producto; tales actividades pueden ser desarrollo de túneles, soporte y ventilación); y (c) desperdicios (de acuerdo con los lineamientos de los modelos de *lean production*: transporte no esencial, movimiento excesivo, tiempos de espera, sobre producción, sobre procesamiento, defectos de producto).

El impacto de las actividades de desperdicio se puede minimizar a través de herramientas como el control de intervalos cortos. Esta herramienta, crucial para implementar la producción reducida en empresas mineras, se enfoca en acortar el intervalo de programación durante las operaciones de producción, permitiendo al personal resumir las tareas dentro de un intervalo de tiempo. De esta manera, se hace posible identificar rápidamente los factores que afectan negativamente la producción y tomar decisiones rápidas para las fases siguientes (Wang, Zhang, Yuan, Wu, & Zhou, 2023).

Este método, que incrementa la transparencia del progreso de la producción y minimiza el impacto de factores incontrolables y facilita el análisis de variaciones (progreso real versus el plan), es un componente fundamental a nivel de gestión de la producción minera, al especificar las dinámicas de planificación de largo, mediano y corto plazo, planificación en sitio y ejecución (ver figura 7). Además, se involucra dentro del proceso de minería inteligente al acoplarse al modelamiento de procesos y diseño de estructuras de *hardware*.

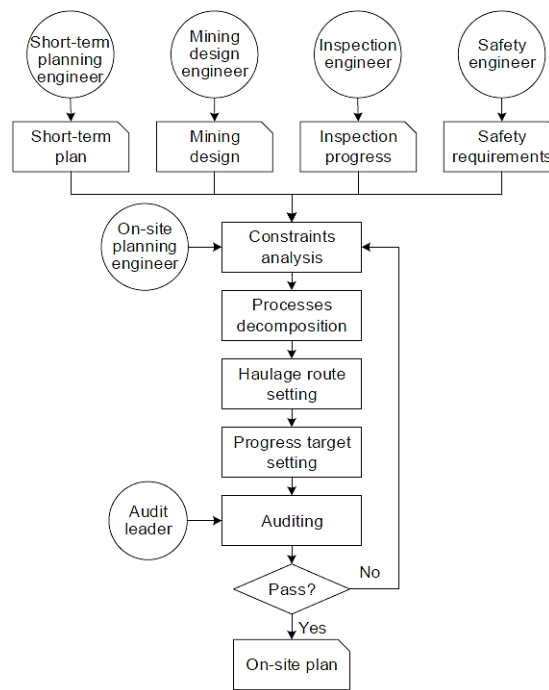
Figura 7. Procesos de planificación minera con enfoque de control de intervalos cortos



Fuente: Elaboración propia.

El control de intervalos cortos involucra distintas áreas: planeación (se encarga de descomponer los planes de corto plazo para desarrollar y publicar las actividades en sitio), gestión de cronogramas (desde centros de control orientados tanto a la asignación de tareas como a los análisis estadísticos de la producción), gestión de producción en sitio (compuesta por líderes de sección al interior de mina encargados de la coordinación del área específica en la que se ejecutarán las tareas asignadas) y el área de operaciones (ver figura 8).

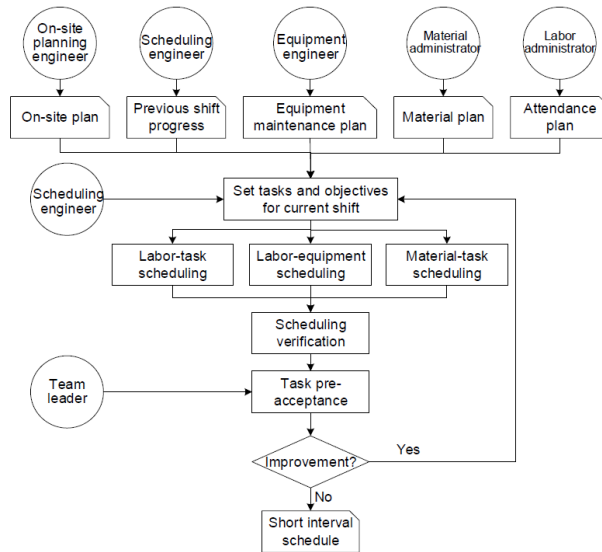
Figura 8. Procesos en el área de planificación



Fuente: Elaboración propia.

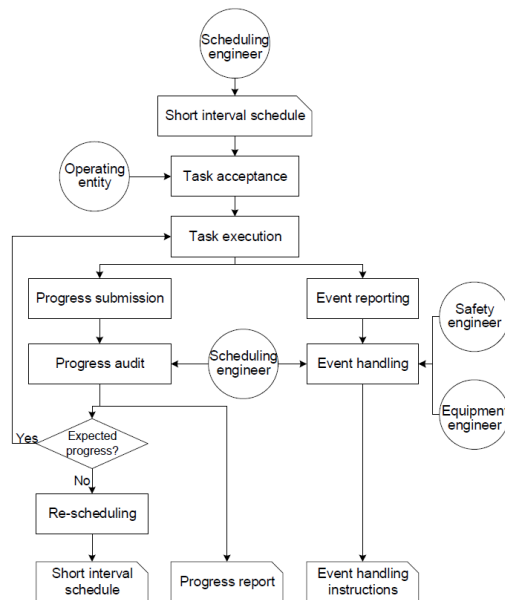
Como se explicó, la gestión del cronograma se apoya en el concepto de intervalos cortos para definir la estructura de las actividades y su desarrollo. En la figura 9 se muestra el flujo del proceso, mientras que en la figura 10 se presenta la dinámica de los procesos de inspección y realimentación propios de la metodología de intervalos cortos, cuyo objetivo es el de minimizar los intervalos de inspección y proporcionar una realimentación periódica del progreso de la tarea, permitiendo la rectificación de las desviaciones de la producción, y evitando retrasos debido a eventos inesperados, errores operativos, entre otros).

Figura 9. Procesos de intervalos cortos para la definición de cronogramas



Fuente: Elaboración propia.

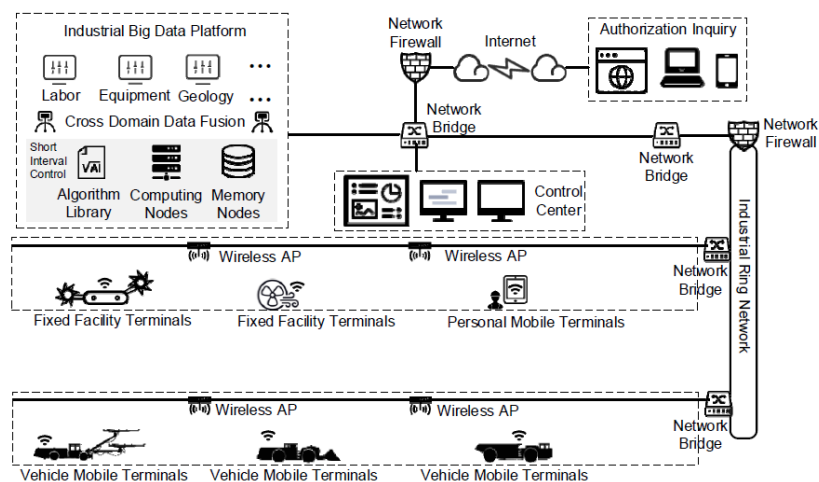
Figura 10. Procesos de inspección y retroalimentación en intervalos cortos



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que el método de control de intervalos cortos contempla altas frecuencias, se hace necesaria la implementación de equipos de minería digital y de minería inteligente (pues el grado de control sobre las tareas es alto). La Figura 11 presenta el diagrama de implementación en una mina subterránea.

Figura 11. Arquitectura de *hardware* para el control de intervalos cortos

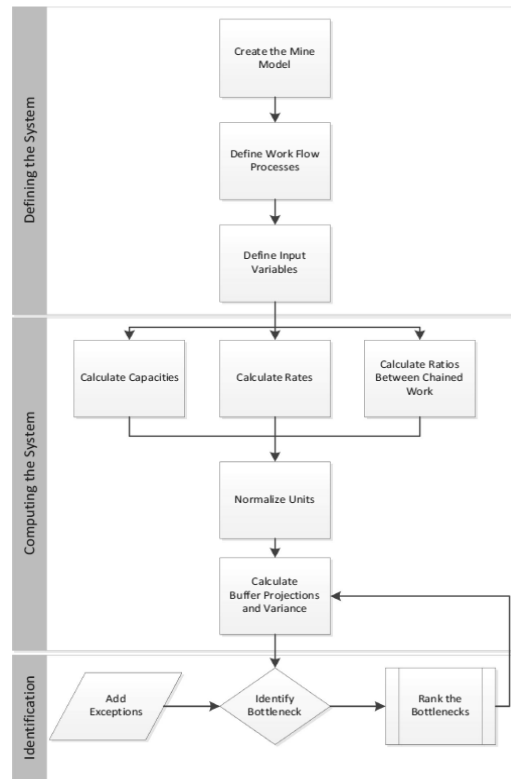


Fuente: Elaboración propia.

Identificación de cuellos de botella

Esta técnica, que se ha diseñado para ayudar a la dirección a centrarse en los aspectos críticos y estratégicos, consta de tres (3) fases (ver figura 12): (a) definición del sistema, (b) computarización del sistema e (c) identificación y clasificación para los cuellos de botella (Kahraman, Rogers, & Dessureault, 2020).

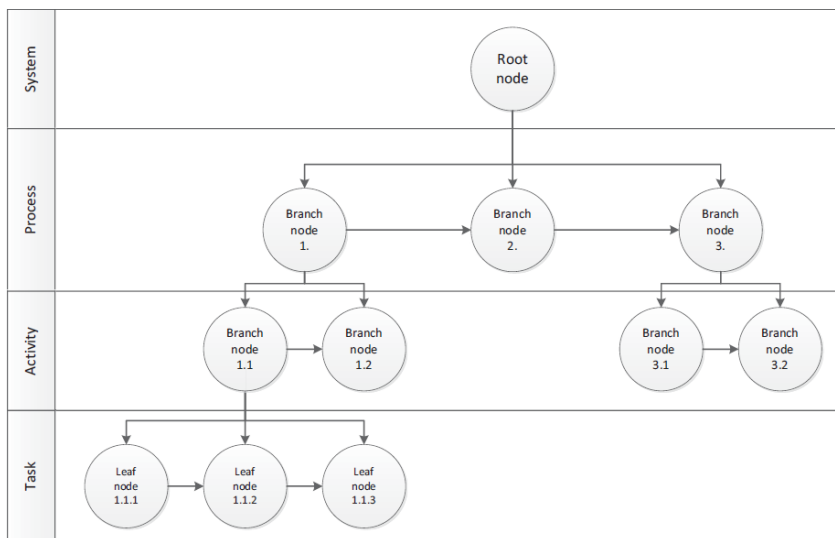
Figura 12. Modelo de identificación de cuellos de botella y clasificación



Fuente: Elaboración propia.

Esta metodología establece las conexiones entre actividades dentro de los procesos, lo que facilita el entendimiento de los sistemas y la relación entre niveles. La producción en minería consta de varios niveles jerárquicos: (a) sistema (consiste en los procesos de mina o producto de algún tipo de material); (b) actividades de remoción (de cierto tipo de material bajo cierto tipo de método); (c) actividades (grupo de tareas necesarias para completar la actividad); y (d) tareas (representan las acciones básicas propias de un método en específico) (ver figura 13).

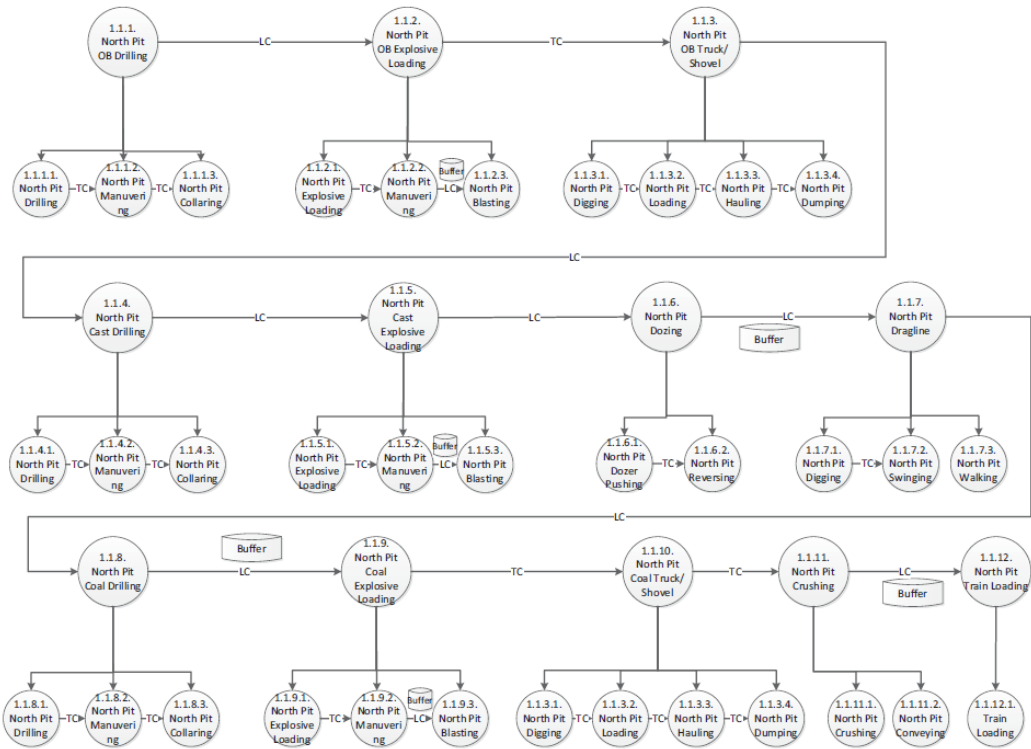
Figura 13. Niveles jerárquicos en sistemas de producción minera



Fuente: Elaboración propia.

La definición de métricas constituye un aspecto clave para la identificación de cuellos de botellas y la medición del desempeño en los procesos. Para tal fin, se recomienda el uso de ratios calculados de forma estandarizada, a partir de datos de capacidad que contemplen pérdidas y unidades propias de los procesos, pues la gestión de la capacidad es un factor que influye en el costo, los cronogramas y la eficiencia misma de la operación. Además, deben considerarse los tiempos de uso y las proyecciones de almacenamiento del sistema (ver figura 14).

Figura 14. Esquema general de los niveles jerárquicos de la producción de una mina

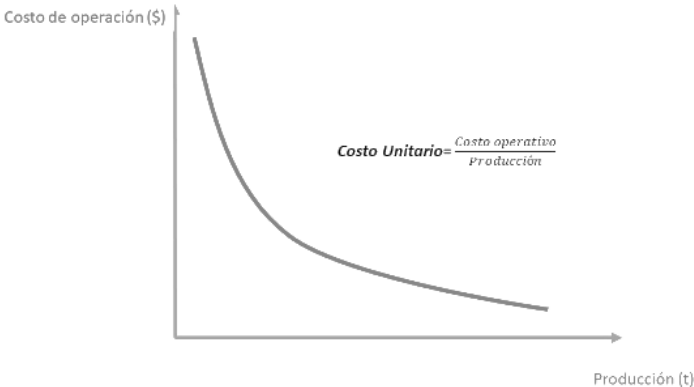


Fuente: Elaboración propia.

Indicadores de gestión

La operación minera contempla tres ejes principales de gestión (costo operativo, producción y personal) y su relación da forma a un sistema de tres planos (Gonzales, 2020). El primer plano genera un indicador denominado costo unitario (ratio entre el costo operativo y las unidades producidas), el cual permite conocer el grado de competitividad y sostenibilidad de la operación (ver figura 15).

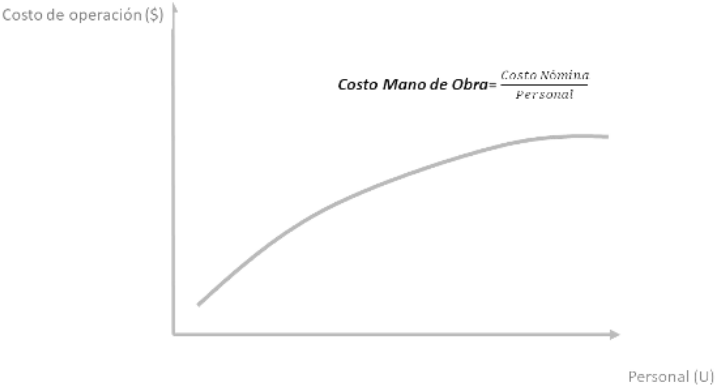
Figura 15. Curva de costo de operaciones vs. producción



Fuente: Elaboración propia.

El segundo plano hace referencia a la relación entre el costo de la operación y el personal (y permite identificar el peso relativo de la mano de obra dentro de la estructura total de egresos). Este ratio puede alcanzar hasta un 60 % del valor del costo, dependiendo del grado de automatización de la firman (ver figura 16).

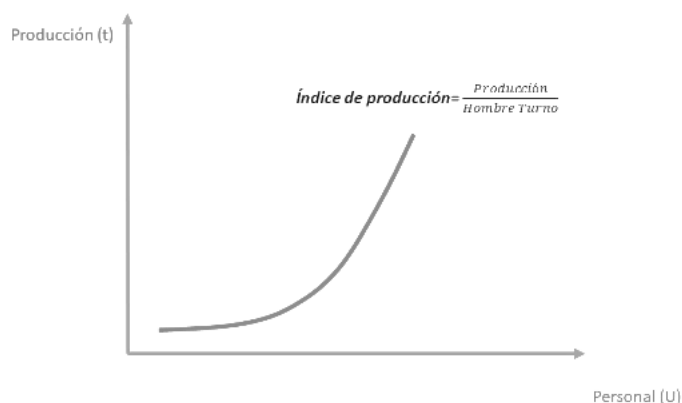
Figura 16. Curva costo de operación vs. personal



Fuente: Elaboración propia.

El tercer plano, que se configura a partir de la confrontación producción versus personal, representa el índice de producción (cantidad producida en relación con el número de trabajadores) y cuantifica el nivel de productividad de la operación minera (ver figura 17).

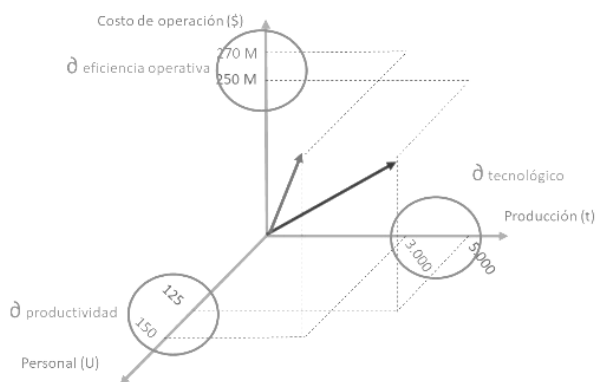
Figura 17. Curva de producción vs. personal



Fuente: Elaboración propia.

Los tres planos pueden ser vinculados en un sistema de coordenadas triaxial que ilustra los vínculos y variaciones de los indicadores, así como su impacto en el desempeño operativo de la mina (ver figura 18).

Figura 18. Sistema de coordenadas de tres ejes

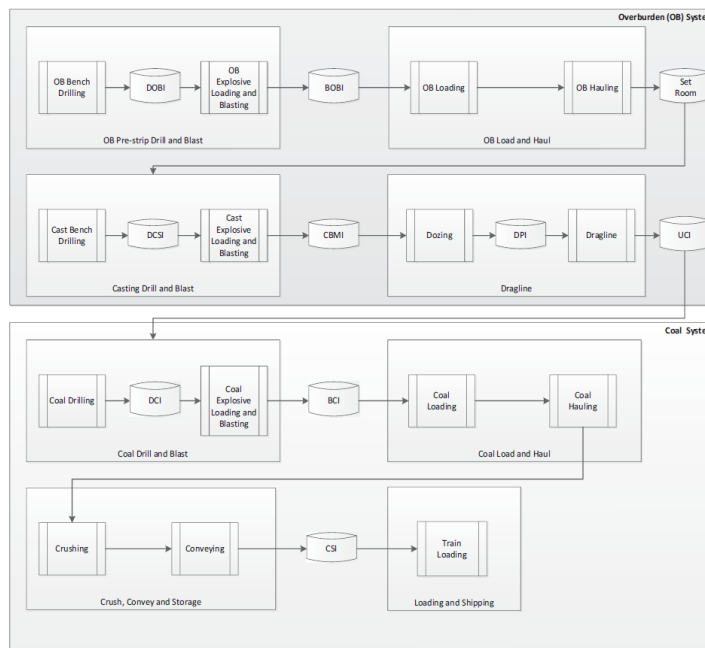


Fuente: Elaboración propia.

Fase 3. Adaptación / diseño del nuevo sistema operativo a partir de las mejores prácticas identificadas

Dada la complejidad de la operación en Aris Mining Marmato se hace necesario articular todos los procesos que componen el sistema (sistema productor de oro). Para tal fin, se contempla el uso de diagramas de flujo que permitan identificar y caracterizar los distintos procesos que conforman el ecosistema productivo (así como su relación). Adicionalmente, se propone la integración de dos metodologías complementarias para mejorar las dinámicas de control, monitoreo y gestión de las distintas actividades. La primera consiste en la identificación y clasificación de cuellos de botella, para lo cual es fundamental definir, tanto las variables asociadas al sistema (flujo de trabajo, *inputs*, ratios por proceso, capacidad, proyecciones de volumen y métricas de productividad y eficiencia) como la jerarquía detallada (sistema, proceso, actividad y tarea) en la metodología de control de intervalos cortos (ver figura 19).

Figura 19. Diagrama de flujo en la operación minera

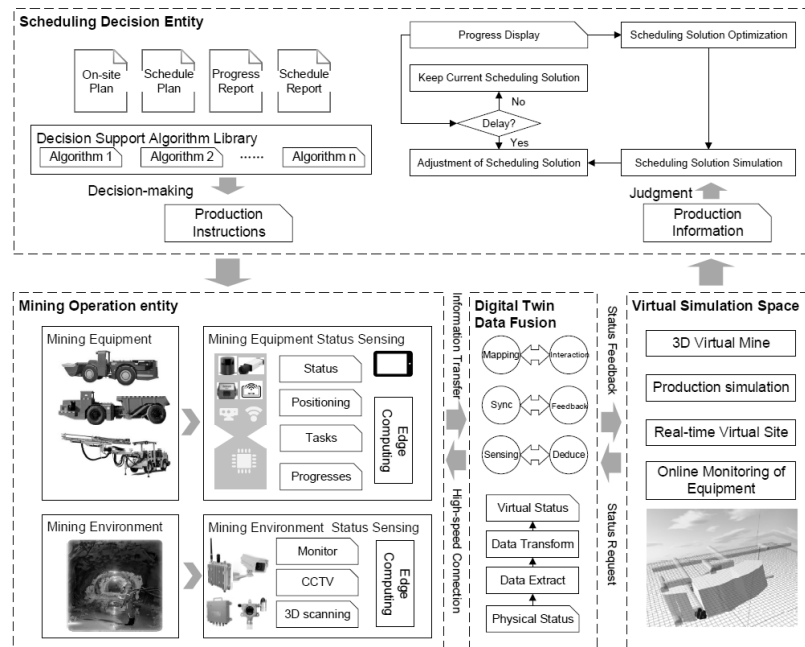


Fuente: Elaboración propia.

Una vez conocidos y gestionados los cuellos de botella, se da paso al análisis de actividades de pérdida para identificar y potenciar, vía ratios y grado de ejecución del plan, las actividades generadoras de valor en la firma. Bajo este marco, se propone la implementación (en el método mecanizado, pues cuenta con la infraestructura apropiada y concentra más del 60 % de la operación) de una arquitectura de *hardware* compuesta por redes de comunicación básicas, terminales de gestión, terminales móviles y una plataforma industrial de manejo de datos que permita tener control en tiempo real de cada una de las tareas desarrolladas en mina, para así poder realizar ajustes de las actividades que se han desviado del plan.

Se sugiere, también, la modificación del centro de control actual, considerando una premisa bidireccional y dinámica en los flujos de información (actualmente recibe información parcializada que en algunas ocasiones sirve para tomar decisiones cuando es vista por la persona conocedora de la actividad pero que en su mayoría solo se usa para reportes finales) para la carga de planes mensuales, semanales y diarios (así como de cada una de las tareas que genere la realimentación del sistema). Este nuevo centro de control debe ser operado por ingenieros conocedores del sistema y de sus procesos, pues se espera que proporcione alertas y soluciones prontas a las problemáticas de la mina (ver figura 20).

Figura 20. Diseño de plataforma inteligente para operaciones mineras



Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los resultados previamente expuestos, se procede a continuación con el análisis de las fases exploradas.

Fase 1. Identificación de la estructura actual del sistema operativo y de las áreas con mayores dificultades a nivel estructural y de cumplimiento

El sistema operativo de Aris Mining Marmato involucra procesos y áreas que lo hacen complejo. Estas condiciones de complejidad, sumado a la falta de planificación y las limitadas métricas de control y seguimiento a diferentes niveles se traducen en un alto grado de ineficiencia. Por este motivo, y para mejorar la comprensión del sistema, resulta fundamental el diseño de un diagrama de flujo del sistema operativo (sus relaciones, procesos, actividades y tareas). Además, se sugiere trabajar en el desarrollo de mejores mecanismos y herramientas de obtención de datos (que permitan conocer, de forma confiable, tareas específicas, tiempos de ejecución precisos y objetivos claros para poder identificar problemáticas y oportunidades de mejora), en la optimización de tiempos en la cadena de abastecimiento (responsable de los retrasos en el plan mensual, las dificultades en los sistemas de gestión de inventarios y compras y los prolongados tiempos de respuesta pedido-entrega) y en la optimización de flujos (pues los ratios establecidos para definir las cantidades y pedidos basados en consumos históricos no permiten identificar puntos de mejora).

Fase 2. *Benchmarking* del sistema operativo Aris Mining para identificar las áreas susceptibles de cambios o mejoras

La industria minera ha desarrollado diferentes metodologías de gestión. Dentro de estas metodologías, que hacen énfasis en los procesos más que en la adquisición de equipos, se destacan los modelos de monitoreo en intervalos de tiempo corto, los cuales permiten la identificación en tiempo real de las variaciones en los planes y el despliegue rápido de acciones correctivas –incluso antes de la finalización de los turnos de trabajo– y las

estructuras de jerarquía dentro del sistema operativo, que hacen posible identificar actividades innecesarias y de desperdicio que afectan el cumplimiento del plan y sus costos operativos asociados. Este último método contribuye, además, a la identificación de cuellos de botella y a la formulación de indicadores de desempeño críticos como el costo unitario, el costo de la mano de obra o el índice de producción a procesos o actividades específicas, bajo un marco de implementación de sistemas de minería inteligente.

Fase 3. Adaptación / diseño del nuevo sistema operativo a partir de las mejores prácticas identificadas

El sistema operativo actual de Aris Mining Marmato carece de control y seguimiento, lo que limita las condiciones de productividad y eficiencia de la firma. Por este motivo, y en aras de alcanzar mejores niveles de precisión, se sugiere articular los modelos geológicos y de estimación con los planes de producción. Adicionalmente, se propone implementar una metodología híbrida de cuellos de botella y control de intervalos cortos, las cuales se adaptan a la estructura actual de la compañía, y avanzar en el diseño e implementación de minería inteligente, a través de *hardware* para generar flujos de información centralizada en tiempo real, análisis de datos y seguimiento efectivo de cada tarea para dar cumplimiento a las actividades programadas. Estos sistemas de datos centralizados incrementan la confiabilidad y calidad de la información a la vez que contribuyen a la obtención de indicadores de gestión precisos, la identificación de puntos de mejora, la definición de métricas de desempeño de los departamentos, la evaluación de consumos por zonas de trabajo y la formulación de ratios confiables en la gestión de los inventarios, pedidos y procesos de compra.

CONCLUSIONES

Una vez finalizado este trabajo de grado, el cual se orientaba a redefinir, en términos de productividad, rentabilidad y eficiencia, el sistema operativo de la empresa Aris Mining Marmato, es posible concluir que:

- El sistema operativo de la mina es soportado por distintas áreas (Producción, Planeación, Geología, Mantenimiento, Abastecimiento). Estas dependencias, que interactúan bajo una lógica secuencial, son activadas gracias a un plan de producción mensual desarrollado por el equipo de planeación, a partir de la integración de información geológica, disponibilidad de personal y distribución de equipos. Sin embargo, el diagnóstico efectuado revela la ausencia de modelos precisos de estimación de recursos, de sistemas de información, de iniciativas de monitoreo, de políticas de abastecimiento, de asignación de activos y de métricas de seguimiento concretas que permitan identificar variaciones y planes de acción ante problemáticas, coyunturas o anomalías en la operación. Lo anterior deriva en un funcionamiento ineficiente, con retrasos constantes y con baja capacidad de respuesta ante las exigencias del mercado.
- El sector minero ha desarrollado metodologías de optimización de procesos orientados a la maximización del valor. Dentro de estas, y bajo un marco de minería digital e inteligente, se destaca el método de identificación de cuellos de botella, que ayuda a la dirección a centrarse en aspectos críticos del sistema operativo a través de la definición precisa del sistema por niveles y su relación; y los esquemas de control de intervalos cortos, que se enfocan en acortar los intervalos de programación durante la operación para identificar rápidamente los factores negativos que permita tomar decisiones rápidas para las siguientes fases.
- Dada la configuración actual del sistema operativo de Aris Mining Marmato, se propone la implementación de una metodología híbrida que integre la identificación de cuellos de botellas y el control de intervalos cortos. De esta forma, se podría mejorar en las condiciones de comprensión y definición del sistema, la articulación de los recursos y planes, el seguimiento al desempeño de la operación, la

centralización de datos, la formulación de métricas, el seguimiento y la formulación de ratios.

REFERENCIAS

- Angizeh, F., Montero, H., Vedpathak, A., & Parvania, M. (2020). Optimal production scheduling for smart manufacturers with application to food production planning. *Computers and Electrical Engineering*, 84, 106609.
- Asociacion Colombiana de Minería (26 de Mayo de 2023). *Minería en cifras 2023*. Asociacion Colombiana de Minería. <https://acmineria.com.co/mineria-en-cifras-2023/>
- Baena. (2017). *Metodologia de la Investigacion*. Grupo Editorial Patria.
- Bernal, C. A. (2010). *Metodología de la investigación. Tercera edición*. Pearson educación.
- Bruch, J., & Bellgran, M. (2013). Characteristics affecting management of design information in the production system design process. *International Journal of Production Research*, 3241-3251.
- Chopra, S. & Meindl, P. (2016). *Supply chain management strategy, planning, and operation*. Pearson Education.
- Christopher, M. & Holweg, M. (2011). “Supply Chain 2.0”: managing supply chains in the era of turbulence. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 63-82.
- Collier, D. A. & Evans, J. R. (2019). *Administración de operaciones*. Cengage Learning.
- Coyle, J. J., Gibson, B. J., Novack, R. A., & Langley, J. C. (2018). *Administración de la cadena de suministro: una perspectiva logística*. Cengage Learning.
- Erika, S., Daniela, V., Peter, K., & Božena, G. (2023). Research on the Evaluation of the Efficiency of Production Processes Through the Implementation of Key Performance Indicators. *Management Systems in Production Engineering*, 404-410.
- Fadaki, M., Rahman, S., & Chan, C. (2019). Quantifying the degree of supply chain leagility and assessing its impact on firm performance. *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*, 246-264.
- Garzón Hernández, J. F. (2018). *Del MRP a la metodología demand drive, un recorrido por la evolución en la planeación corporativa* [Trabajo final como Especialista en Gerencia en Logística Integral, Universidad Militar Nueva Granada]. <http://hdl.handle.net/10654/20771>

- Goldratt, E. M. (1990). *Theory of constraints*. Croton-on-Hudson: North River.
- Gómez, M. (2016). *Introducción a la metodología de la investigación científica*. Editorial Brujas.
- González González, G. E. (27 de abril de 2020). *Indicadores de Gestión para Minería*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/indicadores-de-gesti%C3%B3n-para-miner%C3%ADa-elkin-giovany-gonz%C3%A1lez-gonz%C3%A1lez/?originalSubdomain=es>
- González, H. D. (2009). *Metodología de la investigación: propuesta, anteproyecto y proyecto*. Ecoe Ediciones.
- Guo, D., Li, M., Zhong, R., & Huang, G. Q. (2021). Graduation Intelligent Manufacturing System (GiMS): an Industry 4.0 paradigm for production and operations management. *Industrial Management & Data Systems*, 86-98.
- Heizer, J. & Render, B. (2009). *principios de Administracion de operaciones* (7a ed.). Pearson Prentice Hall.
- Hernández Sampieri, R. & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación* (Vol. 4, pp. 310-386). McGraw-Hill Interamericana.
- Islam, M. H., Chávez, Z., Birkie, S. E., & Bellgran, M. (2022). Enablers in the production system design process impacting operational performance. *Production & Manufacturing Research*, 257-280.
- Jacobs, F. R. (2022). *Administración de operaciones*. McGraw-Hill Interamericana.
- Jain, A. O., Lad, A. B., & Tandel, D. R. (2015). The Kaizen Philosophy for Industries: A Review Paper. *National Conference on Recent Advances in Engineering for Sustainability*.
- Jones, D. T., & Womack, J. P. (2016). The evolution of lean thinking and practice. *The Routledge companion to lean management*.
- Kahraman, M. M., Rogers, W. P., & Dessureault, S. (2020). Bottleneck identification and ranking model for mine operations. *Production Planning & Control*, 1178-1194.

- Kathawala, Y., & Abdou, K. (2003). Supply chain evaluation in the service industry: a framework development compared to manufacturing. *Managerial Auditing Journal*, 140-149.
- Kottala, S. Y. (2021). Sustainable Supply Chain Management Practices: A Review. *International Journal of Social Ecology & Sustainable Development*, 1-19.
- Krajewski, L. J., Malhotra, M. K., & Ritzman, L. P. (2013). *Administración de operaciones: procesos y cadenas de suministros*. Pearson Educación.
- Lee, H. L. (2002). Aligning Supply Chain Strategies with Product Uncertainties. *California Management Review*, 105-119.
- Lerma González, H. D. (2022). *Metodología de la investigación*. Ecoe Ediciones.
- Martínez Ruiz, H. (2018). *Metodología de la investigación*. Cengage Learning.
- Minh, N. D. (2023). Toyota's production efficiency improvement management: best practice for productivity evaluation and operation improvement. *Journal of Advances in Management Research*, 385-408.
- Novosel, L. M. (2023). Understanding the Evidence: Non-Experimental Research Designs. *Urologic Nursing*, 99-102.
- Olaz, F. O., & Medrano, L. A. (2014). *Metodología de la investigación para estudiantes de psicología : manual de entrenamiento y práctica*. Editorial Brujas.
- Orlicky, J. A., Plossl, G. W., & Wight, O. W. (2003). *Structuring the Bill of Material for MRP. Operations management: critical perspectives on business and management*.
- Pérez, J. F., Torres, V. G., Castillo, S. A., & Valdés, M. M. (2021). Lean Six Sigma e Industria 4.0, una revisión desde la administración de operaciones para la mejora continua de las organizaciones. *UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*, 151-168.
- Posteucá, A. (2023). *Beyond Strategic Kaizen : Performing Synchronous Profitable Operations*. New York: Productivity Press.
- Rahman, S. (1998). Theory of Constraints - A Review. *International Journal of Operations & Production Management*, 336-355.
- Ramírez Montañez, J. C., & Calles Moreno, R. J. (2021). *Manual de metodología de la investigación en negocios internacionales*. Ecoe Ediciones.

- Render, B., & Heizer, J. (2014). *Principios de administración de operaciones*. Pearson Educación.
- Sánchez Flores, F. A. (2019). Fundamentos epistémicos de la investigación cualitativa y cuantitativa: Consensos y disensos. *Revista digital de investigación en docencia universitaria*, 13(1), 102-122.
- Sanders, N. R. (2012). *Supply chain management : a global perspective*. John Wiley.
- Sheu, C., & Wacker, J. G. (2001). Effectiveness of planning and control systems: an empirical study of US and Japanese firms. *International Journal of Production Research*.
- Singh, J. & Singh, H. (2009). Kaizen philosophy: a review of literature. *IUP journal of operations management*, 8-51.
- Tundys, B. & Wiśniewski, T. (2018). The selected method and tools for performance measurement in the green supply chain-survey analysis in Poland. *Sustainability*, 10(2), 549.
- Verhaelen, B., Mayer, F., Peukert, S., & Lanza, G. (2021). A comprehensive KPI network for the performance measurement and management in global production networks. *Production Engineering*, 635-650.
- Wang, H., Zhang, X., Yuan, H., Wu, Z., & Zhou, M. (2023). A Lean Scheduling Framework for Underground Mines Based on Short Interval Control. *Sustainability*, 15(12), 9195.
- Werner, M. J., Yamada, A. P., Domingos, E. G., Leite, L. R., & Pereira, C. R. (2021). Exploring Organizational Resilience Through Key Performance Indicators. *Journal of Industrial & Production Engineering*, 51-65.
- Xia, H., An, W., Zhang, Z., & Liu, G. (2022). Managing production systems with machine learning: a case analysis of Suzhou GCL photovoltaic technology. *Production Planning & Control*, 1559-1572.
- Yu, W., Ramanathan, R., Wang, X., & Yang, J. (2018). Operations capability, productivity and business performance : The moderating effect of environmental dynamism. *Industrial Management & Data Systems*, 126-143.
- Zhou, L., Jiang, Z., Geng, N., Niu, Y., Cui, F., Liu, K., & Qi, N. (2022). Production and operations management for intelligent manufacturing: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 808-846.