



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SISTEMAS – INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN DE
INVENTARIOS, PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN, EN UN PROCESO EXTRACTIVO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. CARLOS OTILIO PÉREZ RAMÍREZ

TUTOR PRINCIPAL
DRA. PATRICIA ESPERANZA BALDERAS CAÑAS, FACULTAD DE INGENIERÍA

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Sánchez Guerrero Gabriel D.

Secretario: Dra. Flores de la Mota Idalia

Vocal: Dra. Balderas Cañas Patricia

1^{er.} Suplente: Dr. Aceves García Ricardo

2^{do.} Suplente: Dr. Gómez Gallardo Wulfrano

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, México D.F.

TUTOR DE TESIS:

Dra. Balderas Cañas Patricia Esperanza

FIRMA

MÉXICO, D.F. AGOSTO 2015

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por el apoyo que me han dado durante toda mi vida y en especial para dar este paso en mi superación como persona, en especial a mis hermanos y sobre todo a mis padres, quienes me dieron mi espacio, sin dejarme abandonado en el proceso.

A mis amigos, por alentarme a dar este paso.

A los docentes de la maestría en Ingeniería de Sistemas, por sus comentarios y aportes en mi formación, así como en la realización de esta tesis. En especial a mi tutora la Dra. Patricia E. Balderas Cañas.

A mis compañeros la maestría, sobre todo a los de Investigación de Operaciones. Pero también a aquellos con los que compartí cursos, como los de las especialidades de Optimización Financiera y de Transporte. Sin olvidar a los de la especialidad en Planeación, quienes en la recta final me dieron su apoyo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por darme las herramientas para poder cursar y concluir la maestría.

Índice

	Pág.
Introducción	1
Estructuración de la problemática	1
Planteamiento del problema	1
Objetivos de la investigación	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
Preguntas de la investigación	2
Justificación	3
Alcances	3
Contexto	3
Utilidad del estudio	4
1. Minería y mina en estudio	5
1.1 Perspectiva de la roca fosfórica y su minado	5
El fósforo	5
Fuentes minerales de fósforo	5
Roca fosfórica en el mundo	6
Reservas y producción en Latinoamérica	7
Explotación minera de la roca fosfórica	8
Minería subterránea	9
1.2 Empresa minera y sus actividades	11
1.3 Sistema bajo estudio y su entorno	12
Descripción de la mina	13
Descripción del manejo de inventarios	18
Comportamiento de interrupciones de equipo operativo	22
2. Marco teórico	27
2.1 Teoría de inventarios	27
Modelo (r, q) con pendientes permitidos: para L fijo y variable	31
2.2 Simulación	34
Estados del modelo de simulación	38
Validación	39
Software Simio	41
2.3 Proceso de la investigación de operaciones	43
3. Marco metodológico	47
3.1 Contexto	47
3.2 Muestra	47
3.3 Diseño	47
3.4 Procedimiento	48
4. Estudio	49
4.1 Selección de los datos del estudio	49
4.2 Modelo de simulación	52
Modelo conceptual	53
Manejo de las bases de datos	54
Información requerida para el modelo de simulación: datos	55
Información requerida para el modelo de simulación: suposiciones	56
Modelo programado	58
Verificación	62

Validación	64
Validación de las toneladas métricas secas diarias para un frente de trabajo	64
Validación del tiempo por interrupciones diario en el minero continuo	65
Validación del tiempo por interrupciones diario en el carro transportador derecho	65
Validación del tiempo por interrupciones diario en el carro transportador izquierdo	66
Validación del tiempo por interrupciones diario del tipo operativas	66
Validación del tiempo por interrupciones diario en bandas transportadoras	67
Validación del tiempo por interrupciones diario en el mantenimiento diario	67
Número de réplicas	68
Presentación gráfica de las condiciones físicas del modelo	69
4.3 Estrategias de inventarios propuestas	72
Datos para el modelo de inventarios	73
Resultados del modelo de inventarios	74
4.4 Impacto de las estrategias de inventarios en las interrupciones	81
Propuesta 1	81
Propuesta 2	82
Propuesta 3	83
Propuesta 4	84
4.5 Medición del impacto de las propuestas	85
4.6 Implicaciones de las propuestas	91
Propuesta 1 – Eliminar compras emergentes	91
Propuesta 2 – Reducción del 25% de la interrupción	91
Propuesta 3 – Reducción del 60% de la interrupción	91
Propuesta 4 – Reducción del 100% de la interrupción	92
Conclusiones	93
Referencias	96
Anexo A. Actividades que interrumpen la operación por tipo con tiempos	100
Anexo B. Actividades que interrumpen la operación por tipo (lista completa)	102
Anexo C. Hojas de cálculo para la validación del modelo de simulación	106
Anexo D. Demanda variable de los inventarios	113
Anexo E. Tiempo de entrega variable de los inventarios	115
Anexo F. Hojas de cálculo para el modelo de inventarios	129
Anexo G. Opiniones de trabajadores respecto a la implementación de la política de inventarios	133



Introducción

Cualquier empresa tiene como objetivo la producción o generación de un bien o servicio. En el caso de la industria minera, cuya actividad principal es catalogada como primaria, el objetivo es la extracción de algún mineral, lo anterior sin considerar que el mineral en bruto puede contener materiales que no generan ningún beneficio respecto a la ganancia obtenida. Usando este marco, las empresas dedicadas a la extracción, no sólo se concentran en obtener el mineral, sino también en lograrlo de una manera que genere la mayor ganancia en el intervalo de tiempo más corto.

El anterior es el caso del presente estudio, que se enfoca en atacar las interrupciones de la actividad extractiva de una empresa minera en México, con el fin de tener el mayor tiempo disponible para operar.

Problema

La empresa se ha dado cuenta que algunas de las situaciones que más le afectan es dejar de producir y la disponibilidad oportuna de refacciones, estas situaciones se desencadenan principalmente por las interrupciones de la operación de la mina.

Para poder resolver el problema de interrupciones en la mina, en este trabajo se propone hacer un diagnóstico, posteriormente un análisis que permita identificar con claridad los problemas y, de esta manera, proponer una estrategia de solución.

La empresa desea incrementar la producción actual con la que cuenta. Para lo anterior, quiere conocer qué medidas le permiten tener mayor tiempo disponible para la operación de la actividad extractiva. Con base en ello, desea aplicar medidas tanto correctivas como preventivas para lograr el mejor uso de los recursos con los que cuenta.



Objetivos de la Investigación

Objetivo General

Hacer un estudio con una visión sistémica, en un proceso extractivo, de las actividades externas (manejo de inventarios) como actores de influencia en las actividades internas de la mina (actividad extractiva y sus interrupciones), para elaborar y evaluar propuestas de mantenimiento, mediante simulación de procesos y optimización de inventarios, con el fin de aumentar la producción.

Objetivos Específicos

- Identificar que interrupciones consumen mayor tiempo.
- Usar un modelo de inventarios para minimizar los costos por el manejo de las refacciones relacionadas con las interrupciones.
- Encontrar propuestas de mejora que sean factibles de implementar.
- Medir el impacto que ofrecen las propuestas generadas con simulación de procesos.

Preguntas de la Investigación

- ¿Qué tipo de interrupciones se dan más frecuentemente, al operar la mina?
- ¿Qué interrupciones, en la extracción y/o la transportación del mineral (operar), se pueden evitar con un mejor mantenimiento?
- ¿Qué alternativas ofrece la implementación de un modelo de inventario, para tomar decisiones en la adquisición de refacciones para el mantenimiento, en las que se minimicen los costos asociados?
- ¿Cómo se puede medir la mejora en producción que generan estas alternativas?



Justificación

Por la experiencia laboral del autor (2010-2013), se tuvo acceso a la información y a la manera de registrarla, sobre los procesos en estudio.

Es por ello que se tuvo el interés de ahondar más y realizar un diagnóstico de la extracción de la roca fosfórica, a partir de la información. Además de, conocer el potencial que tiene la información mediante el uso de herramientas de Investigación de Operaciones, para mejorar el estado actual del sistema.

Alcances

El estudio comprende las actividades de extracción y transporte de la roca fosfórica (industria minera no metalúrgica) dentro de mina (las actividades se describen en el capítulo 1), desde la extracción hasta el de las bandas transportadoras al exterior de la mina. Este estudio no considera características geológicas y demás relacionadas con aspectos de mecánica de suelos. Sólo se considera el proceso de minado a manera de actividades de manufactura.

Se analizan los cambios que ofrecen las estrategias de inventarios que se generan para influenciar, de manera externa, a la operación. Optimizando una parte de la cadena operativa de la actividad extractiva para disminuir el impacto y la duración de los paros de operación.

Contexto

La mina se localiza en el noroeste de México, dedicada a la extracción de roca fosfórica. El estudio se realizó con información de esta mina no metalúrgica, de la cual se analizaron las actividades extractivas. Estas actividades se realizan en una mina subterránea mediante el método de cuartos y pilares. El mineral se transporta hacia el exterior por bandas



transportadoras. Las estructuras subterráneas están diseñadas para mantener su forma durante algunos meses o años, como fuente de extracción o como galerías de acceso.

Utilidad del Estudio

Debido a la importancia de la roca fosfórica en nuestro país, el autor decidió analizar la instancia descrita. La producción del país no es suficiente para satisfacer la demanda actual, esto se sabe ya que la mayoría del mineral es importado (como se puede ver en el capítulo 1, sección 1.1), por lo que existe un mercado que puede ser satisfecho localmente.

Existen paquetes de software dedicados a analizar las condiciones de diferentes entidades mineras, pero la mayoría van enfocados a la industria minera metalúrgica. Además estos paquetes de software, incluyen la mayoría de los factores que intervienen en el minado.

Por lo que el estudio proveerá de una representación del estado de la empresa con sus propios datos, que no considera características relacionadas con el tipo de minado y la geología del terreno correspondiente. También puede ser visto como un aporte para industria minera no metalúrgica local, donde no existe la cantidad de aplicaciones de simulación y análisis que si existe para la minería metalúrgica.

El trabajo utiliza la *teoría de inventarios* para minimizar el costo por mantener o no algunas refacciones, con el fin de disminuir el impacto sobre las interrupciones en la actividad extractiva, desde una perspectiva sistémica, donde cada una de las entidades afectan a otras entidades. Lo anterior es una contribución al manejo de inventarios en la industria minera mexicana.



Capítulo 1: Minería y mina en estudio

1.1 Perspectiva de la roca fosfórica y su minado

El Fósforo

El fósforo es considerado uno de los elementos más importantes, porque forma parte de todas las cadenas alimentarias. Por lo anterior, es de alta relevancia para la agricultura.

Normalmente un suelo puede poseer fósforo para sostener la vida vegetal, pero muchas veces éste es insuficiente para suplir la demanda de los cultivos. Por esa razón, el fósforo debe agregarse como fertilizante, ya que, además, no hay otra fuente disponible en la naturaleza que reponga el que se extrae por las cosechas.

“La industria transforma las rocas fosfóricas que contienen el fósforo poco soluble en formas iónicas aprovechables por las plantas que lo absorben del suelo en forma de ión H_2PO_4 - dihidrogenofosfato.”

Nielson, H., & Sarudiansky, R. (2005). *Minerales para la Agricultura en Latinoamérica*.

América latina tiene una gran demanda de fósforos y su creciente importancia como proveedora de alimentos al mundo permite que se potencie el rol estratégico de la industria de fosfatos, esto, a pesar de que sus reservas conocidas en los depósitos no son de gran magnitud comparadas con las de los Estados Unidos, China, Rusia, las del norte de África (Marruecos, Sahara Occidental, y Túnez) y las de Asia Menor (Israel y Jordania).

Fuentes Minerales de Fósforo

El fósforo está presente en la mayoría de las rocas en cantidades minoritarias, pero en un tipo especial de rocas fosfáticas, denominadas fosforitas (fosfatos sedimentarios marinos) el contenido de P_2O_5 (pentaóxido de fosfato) generalmente excede el 18% y puede llegar hasta el 40%.



Tabla 1.1 Nomenclatura de rocas fosfóricas de origen sedimentario

Mayor al 50% (18% P_2O_5)	Fosforita
Mayor al 20% (8% P_2O_5)	Roca fosfórica
Menor al 20% y mayor al 5% (2-8% P_2O_5)	Roca ligeramente fosfórica

Fuente: Nielson, H., & Sarudiansky, R. (2005). *Minerales para la agricultura en Latinoamérica*. Argentina: CEPS, Centro de Estudios para la Sustentabilidad.

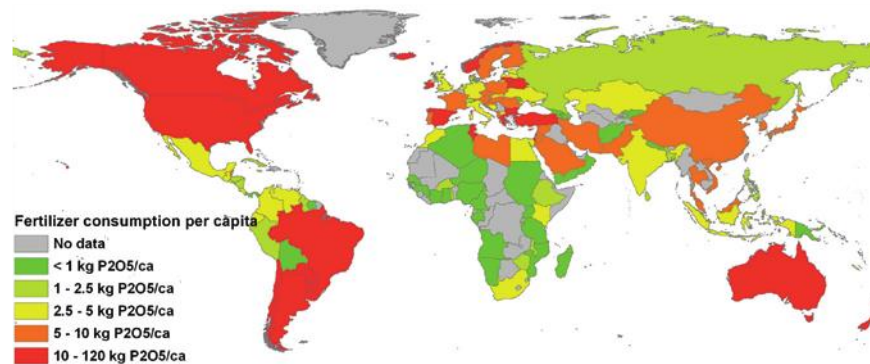
Roca Fosfórica en el Mundo

“En la actualidad más de 30 países están produciendo roca fosfática para abastecer tanto mercados locales como internacionales. Los primeros doce países que producen en el mundo ocupan casi 95% de la producción total del fosfato. Los tres productores principales, es decir los E.E.U.U., China y Marruecos, producen actualmente cerca de los dos tercios de la producción mundial.

Las reservas probadas de Marruecos cubren alrededor 50% del total y a su vez sus reservas potenciales y los recursos se ubican aproximadamente en el 60% de los recursos totales del mundo. Los E.E.U.U. y la China abarcan cerca del 20% de recursos mundiales.”

Nielson, H., & Sarudiansky, R. (2005). *Minerales para la Agricultura en Latinoamérica*.

Gráfico 1.1 Perspectiva global del consumo per cápita de P_2O_5 en fertilizantes minerales en 2005



Fuente: de Wilt, J.G., de Vries, C.K., & van Haren, R.F.J. (2011). *The phosphate balance: current developments and future outlook*. Países Bajos: Innovation Network.



Reservas y Producción en Latinoamérica

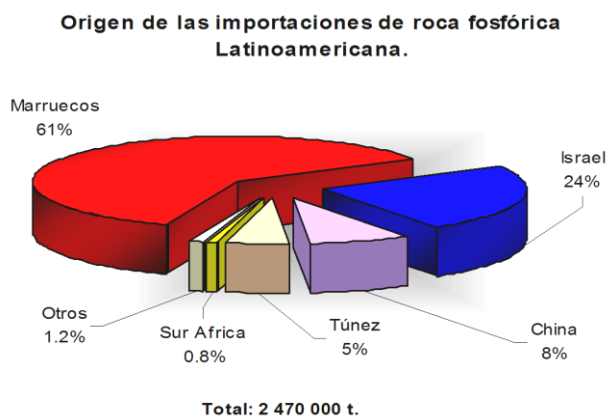
“Con escasas excepciones, los depósitos y manifestaciones, si bien numerosos están distribuidos irregularmente y la mayoría se encuentran en regiones remotas sin infraestructura y de calidad insuficiente para sustentar una industria de escala económica.”

Nielson, H., & Sarudiansky, R. (2005). *Minerales para la Agricultura en Latinoamérica*.

Por esa razón, la industria de fosfatos no ha jugado un rol primario y buena parte de ésta depende de la importación de roca fosfórica de otros países.

Únicamente Brasil, México, Venezuela y Colombia han desarrollado algo su industria de fertilizantes fosfatados, basándose en sus recursos nacionales impulsados por su demanda local, influida por suelos muy deficientes en fósforo, pero la mayor parte de esta industria depende de la importación de roca fosfórica.

Gráfico 1.2 Origen de las importaciones de Latinoamérica período 2000-2002



Fuente: (2005). *Análisis de la estructura productiva y mercados de la roca fosfórica*. Colombia: Unión Temporal GI. Georecursos.



Tabla 1.2 Los 30 principales consumidores de fertilizantes de fósforo inorgánico en 2005

Country	Consumption	Production	Import	Export	Per capita consumption
	ton P ₂ O ₅	ton P ₂ O ₅	ton P ₂ O ₅	ton P ₂ O ₅	kg P ₂ O ₅ /ca
China	11 473 471	10 439 612	1 518 075	484 216	8.8
United States	6 409 635	10 890 000	596 156	4 160 287	21.7
India	5 226 434	4 092 561	1 144 742	10 869	4.8
Brazil	2 638 656	1 721 172	1 315 782	127 730	14.0
Australia	1 139 235	596 768	696 778	154 311	56.3
Pakistan	860 133	343 938	662 135	7 559	5.3
Turkey	782 711	365 258	432 797	15 344	10.8
Indonesia	762 868	468 478	297 073	2 683	3.3
Canada	693 121	278 028	477 989	62 896	21.4
Japan	687 879	329 667	362 329	4 116	5.4
France	597 000	158 402	515 652	77 054	9.5
Argentina	561 371	0	563 052	1 682	14.3
Vietnam	530 104	249 038	283 203	2 137	6.4
Iran	492 681	169 486	323 195	0	7.6
New Zealand	472 838	339 157	134 107	425	116.8
Spain	454 957	331 040	246 041	29 077	11.3
Mexico	433 907	79 555	364 501	10 150	4.1
Russia	346 840	2 586 575	2 005	2 241 741	2.4
Poland	327 668	435 333	44 127	151 792	8.5
Thailand	322 044	57 150	295 696	30 803	5.0
Italy	281 803	23 000	289 262	26 017	4.9
Germany	273 937	144 705	140 998	11 767	3.3
Bangladesh	262 114	69 022	193 092	0	1.8
Egypt	258 157	310 080	1 913	53 836	3.3
South Korea	246 791	69 545	24 554	113 560	5.1
United Kingdom	245 140	164 500	196 540	0	4.1
South Africa	212 315	313 462	33 950	135 097	4.5
Syria	182 357	127 818	54 540	1	9.9
Bulgaria	175 946	173 100	2 982	135	23.6
Chile	160 882	0	160 882	0	10.1

Fuente: de Wilt, J.G., de Vries, C.K., & van Haren, R.F.J. (2011). *The phosphate balance: current developments and future Outlook*. Países Bajos: Innovation Network.

Explotación Minera de la Roca Fosfórica

La explotación de yacimientos puede ser a cielo abierto o subterránea. La mayoría de la roca fosfórica explotable de origen sedimentario se extrae a cielo abierto empleando desde métodos manuales hasta los de alta tecnología de extracción. En general, los costos de la explotación a cielo abierto son muchos más bajos que los de la explotación subterránea, estimándose una relación de 1 a 2-3 veces.



Minería Subterránea

Existen varios métodos de explotación subterránea y como en la minería a cielo abierto éstos varían de labores subsuperficiales a explotaciones altamente mecanizadas (UNIDO, 1998). Citado en Nielson, H., & Sarudiansky, R. (2005).

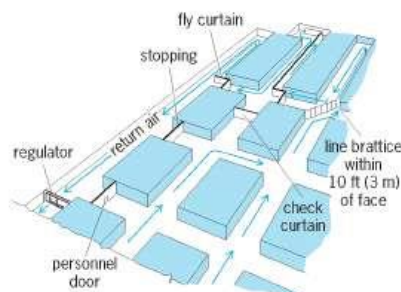
En uno de ellos se trata de un yacimiento sedimentario fosfático moderadamente bien cementado, subhorizontal, donde se aplica para la explotación el método de cuartos y pilares dentro de una configuración de espina de pescado (herringbone). Los bancos explotables son continuos con un espesor promedio de 1 m y el porcentaje de extracción alcanza al 65% de la mena¹. El mineral es trasladado en carros transportadores a la estación de alimentación y de ahí una cinta transportadora lleva el mineral a la bocamina.

Figura 1.1 Mina con diseño de cuartos y pilares en operación



Fuente: http://www.ene.ttu.ee/maeinstituut/cutting06/index_failid/image011.jpg

Figura 1.2 Diseño de cuartos y pilares con circuito de ventilación

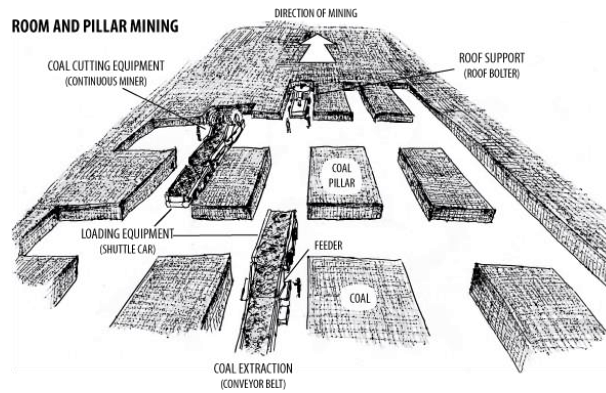


Fuente: <http://skaibook.com/95/ScienceTechnology-140.jpg>

¹ Mineral de base del que es posible extraer otro mineral de mayor pureza e importancia económica. La molibdenita (sulfuro de molibdeno), por ejemplo, es la principal mena del molibdeno. La magnetita y la hematina son menas de hierro. Ternium (2015)



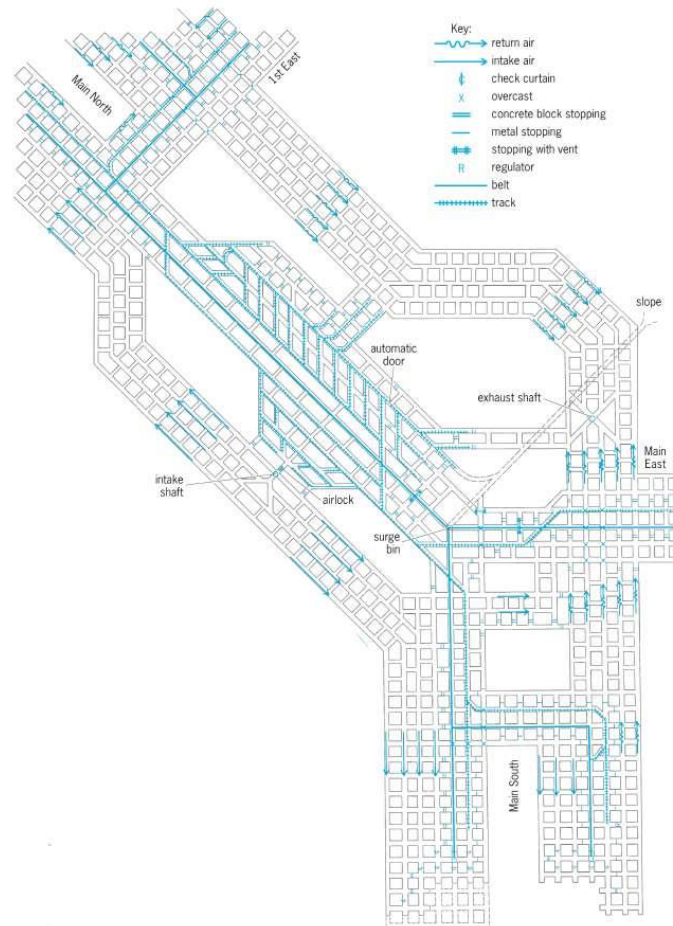
Figura 1.3 Diseño de cuartos y pilares en operación (vista en sentido del avance)



Fuente:

<http://www.lilygroup.com/LGI%20website%202012/images/content%20images/Room%20and%20Pillar%20mining.png>

Figura 1.4 Ejemplo de plano de una mina con diseño de cuartos y pilares





Fuente: <http://skaibook.com/95/ScienceTechnology-136.jpg>

1.2 Empresa minera y sus actividades

La base para esta investigación es una empresa minera, cuyas principales actividades son la extracción y el beneficiado de la roca fosfórica. En general se puede describir la empresa a través del movimiento del mineral desde su extracción hasta la carga en el buque, cuyos pasos a continuación se describen a grandes rasgos:

- **Minado:** el mineral es obtenido en los frentes de trabajo y mediante bandas transportadoras es transferido hacia el exterior de la mina.
- **Transporte y pesaje:** una vez estando el mineral fuera de mina se acumula y es cargado en camiones de carga, los cuales recorren alrededor de 15 kilómetros hasta el área de trituración, antes de ello se realiza el pesaje.
- **Trituración:** el mineral se almacena hasta que le corresponde entrar al proceso de triturado, mediante el cual, se logra que las partículas sean más pequeñas. En ocasiones el mineral repite el proceso para ser del fino requerido (mediante unas mallas el mineral grueso es separado).
- **Beneficiado:** después de la trituración, el mineral es almacenado ya sea en forma de conos al exterior o en silos, desde los cuales se transporta hasta una de las dos plantas de beneficio² mediante bandas transportadoras, aquí se concentra el porcentaje de roca fosfórica del mineral. Posteriormente es transportado por tubería al área de lavado.
- **Lavado:** aquí se limpia el mineral de los reactivos que se usaron para beneficiarse, posteriormente es transportado por bandas al área de secado.

² Ver Glosario en Anexos



- Secado: el mineral es almacenado en un patio al aire libre, el cual tiene la finalidad de retenerlo hasta requerir ser cargado en el buque. También este patio ayuda a escurrir el agua del mineral.
- Carga en buque: el mineral es transportado desde el patio de secado hasta el buque por medio de una banda transportadora.

Gráfico 1.3 Procesos que realiza la empresa



Fuente: Elaboración propia

El presente estudio se enfocó en el análisis de área de mina, porque se obtuvo acceso a la información relevante de esta área, por lo que a continuación se describe con más a detalle las actividades realizadas en dicha mina.

1.3 Sistema bajo estudio y su entorno

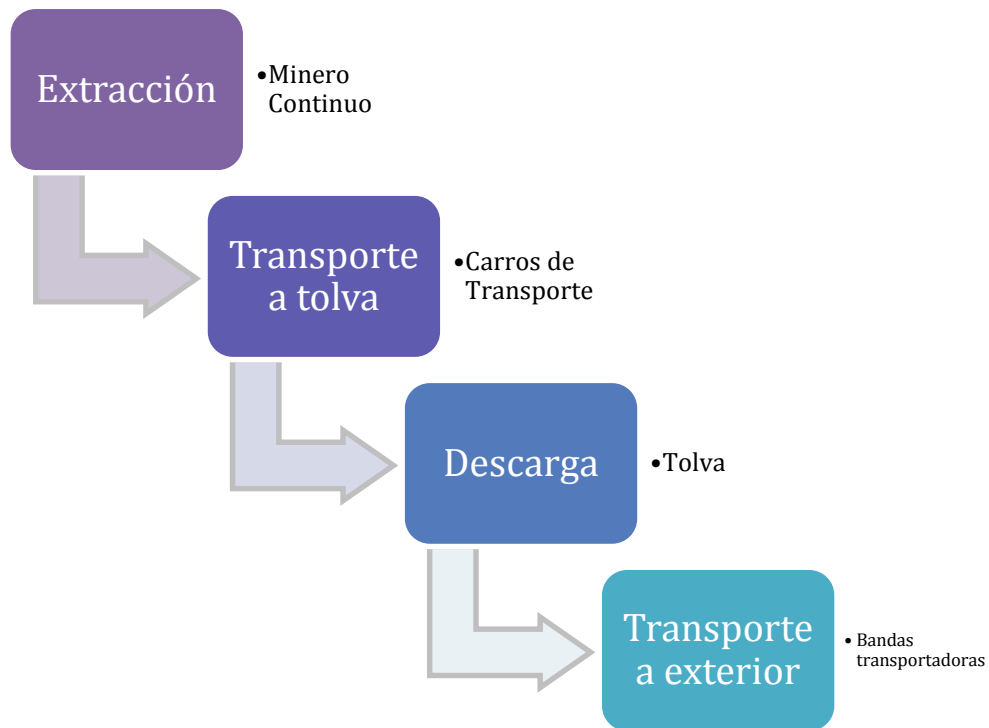
El estudio tuvo como objeto incidir en la producción, la cual es afectada por el funcionamiento y la operación de las entidades *minero continuo, carros transportadores, tolva, banda y bocamina*.

Las propuestas generadas en el estudio están relacionadas con actividades de mantenimiento correctivo, que a la vez se ven influenciadas por disponibilidades de refacciones, lo cual depende de las entidades *proveedor, almacén general, adquisiciones y finanzas* (presentes en el gráfico 1.4).



trabajo. Mediante un sistema de bandas el mineral es transportado hasta el exterior de la mina.

Gráfico 1.5 Proceso que se realiza la mina



Fuente: Elaboración propia

Las actividades realizadas dentro de *mina* son propensas a tener interrupciones particularmente en los *frentes de trabajo*, donde los eventos que detienen la operación son recurrentes. Estos eventos pueden identificarse de la siguiente manera:

En el *minero continuo*, un evento que detenga su operación, detiene en sí la producción al 100%, sin embargo, hay actividades de otra naturaleza que pueden realizarse mientras el desperfecto es arreglado.



Figura 1.5 Minero continuo en operación



Fuente: <http://www.umwa.org/images/who/roomandpillar/ugmine.jpg>

En las figuras 1.5 y 1.6, se muestran ejemplos de *mineros continuos*, similares a los de la mina en estudio.

Figura 1.6 Minero continuo de frente



Fuente: http://www.mining-technology.com/contractor_images/4214/images/138174/large/Underground_Mining.jpg

Cuando ambos *carros transportadores* están fuera de operación, por algún evento relacionado con su mantenimiento, la producción se detiene, este evento es similar a cuando el *minero continuo* está fuera de operación, con la diferencia de que este último puede seguir operando, hasta donde su capacidad de carga (menor a 5 toneladas) se lo permita.

Cuando un *carro transportador* está fuera de operación, el resto de las actividades no se ven afectadas, sino que baja el ritmo de descarga en la tolva. Otras actividades en área pueden



realizarse y se puede continuar la producción en lo que el *carro transportador* puede operar nuevamente.

En las figuras 1.7 y 1.8, se muestran ejemplos de *carros transportadores*, similares a los usados en la mina en estudio.

Figura 1.7 Carro transportador (shuttle car)



Fuente: http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/shuttle-cars-55670-2688725.jpg

Figura 1.8 Carro transportador (shuttle car) en operación



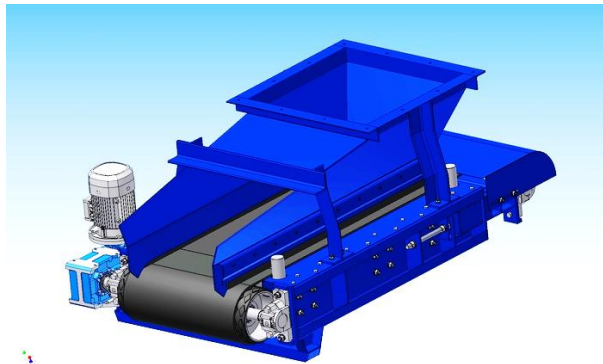
Fuente: <http://www.immersivetechologies.com/images/products/ck/CSC301/Shuttlecar.jpg>

Un evento en la *tolva* puede detener la operación o no, ya que tanto el *minero continuo* como los *carros transportadores* pueden continuar la operación hasta llegar al tope de su capacidad de carga, después de este momento y si continua la interrupción, la producción está detenida.

En la figura 1.9 se ve un ejemplo de *tolva*, parecida a la que se usa en la mina bajo estudio.



Figura 1.9 Tolva



Fuente:

<https://d2t1xqejof9utc.cloudfront.net/screenshots/pics/1cccf683a4c4c66990508f74127ca61/medium.jpg>

En la *banda transportadora* del *frente de trabajo*, un evento que detenga su operación tiene la misma influencia que cuando la *tolva* esta inoperativa.

En las figuras 1.10 y 1.11, se ilustra a una *banda transportadora*, similar a la que se opera en la mina bajo estudio.

Figura 1.10 Sistema de banda transportadora en supervisión



Fuente: https://mining.cat.com/cda/files/4366150/9/Conveyr_Systems_news.jpg



Figura 1.11 Sistema de banda transportadora



Fuente: <http://www.kgs.ku.edu/Publications/pic21/Fig5.jpg>

Existen otras actividades que no ocurren en el frente de trabajo, pero que pueden afectarlo interrumpiendo la operación. Entre estas actividades ocurren en el transporte, en el sistema de ventilación, en el sistema eléctrico, en la mina en general.

Otras actividades internas tienen diferente naturaleza, por lo que pueden o no detener la producción, sin embargo, cuando interrumpen la operación se consideran una pérdida de tiempo, la cual puede ser necesaria o innecesaria (ya que se podrían realizar a la par del mantenimiento diario o del cambio de picas, por ejemplo). Dentro de esta descripción entran las actividades operativas (por ejemplo, pláticas formativas al personal), el avance del frente de trabajo (movimiento de los equipos, mobiliario y consumibles del *frente de trabajo*), mantenimiento de los equipos de alimentación de corriente y los neumáticos (compresor), cambio de turno, actividades de seguridad, entre otros.

Existen equipos necesarios en el *frente de trabajo* de manera indispensable: 1 *minero continuo*, 2 *carros transportadores*, cable de alimentación para minero continuo, cables de alimentación para carros transportadores, 1 ancladora (al menos), 1 generador de energía, 1 compresor, 1 pistola neumática.

El personal que opera en los *frentes de trabajo* puede variar, sin embargo, existen trabajadores fijos, de acuerdo al orden de importancia, estos son: supervisor, operador de *minero continuo*, operadores de *carros transportadores*, cableero, mecánico, eléctrico, tolvero.



De estos trabajadores existe uno por *frente de trabajo*, excepto los operadores de *carros transportadores* que regularmente son 2 aunque en ocasiones hay uno adicional. Los cuales pueden hacer la función de operador de *minero continuo* generalmente (cuando el operador de *minero continuo* oficial no se encuentra presente o no puede desempeñar la función), y cuando falta el supervisor, el operador de *minero continuo* toma el cargo.

Descripción del manejo de inventarios

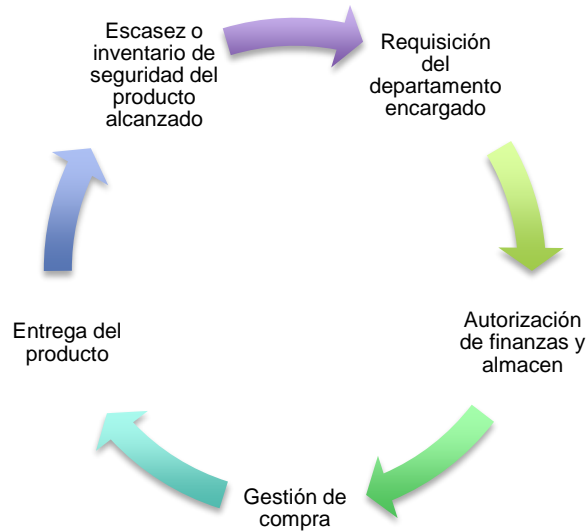
En la empresa el control de inventarios varía para el tipo de producto que se maneje. En este aspecto solo se hará referencia al ciclo que siguen los artículos que tienen un flujo constante y que están directamente relacionados con la actividad extractiva. Estos pueden estar a cargo de la *gerencia de operaciones mineras*, la *gerencia de mantenimiento* o de la *superintendencia del almacén*. Esta última tiene bajo su control la solicitud de adquisición de los artículos de alta rotación, los cuales no solo se ocupan en la actividad extractiva, sino en otros departamentos y actividades de la empresa, por lo que sus solicitudes suceden en conjunto para todas las necesidades de la empresa.

La disponibilidad de los artículos se logra mediante un contrato de consignación o sin contrato de consignación. En el caso del contrato de consignación, el proveedor es el encargado de mantener una disponibilidad fija de un artículo, ya sea dentro de la empresa o cerca de la empresa. Lo anterior garantiza que el tiempo de entrega sea prácticamente despreciable, pero aumenta el costo del artículo.

El ciclo de los inventarios se puede ilustrar mediante el siguiente diagrama para los artículos que no están bajo consignación.



Gráfico 1.6 Ciclo del inventario y la adquisición de un artículo de no consignación



Fuente: Elaboración propia

- Escasez o inventario de seguridad del producto alcanzado

Se determina que es necesario adquirir más unidades de un artículo, ya que la disponibilidad comienza a ser crítica. Se realiza de manera anual, de acuerdo a un programa o de manera emergente (cuando se requiere, pero su adquisición no estaba contemplada).

- Requisición del departamento encargado

Esta actividad la hace el *almacén* (de manera anual o de manera adicional, cuando la cantidad requerida excede lo contemplado en el presupuesto), *operaciones mineras* (realizándolo como entregas programadas o por requisición cada vez que el artículo se requiera) o *mantenimiento* (realizándolo de manera similar a operaciones mineras).

- Autorización de finanzas y almacén

Para autorizar una adquisición, el *almacén* debe saber si hay disponibilidad del artículo en algunas de sus instalaciones. También *finanzas* debe autorizar y llevar un control de lo que se adquiere, para esto revisa si las cantidades que se acumulan en la requisición están dentro del presupuesto anual, si algún otro departamento no ha realizado un



requerimiento para el mismo artículo que vaya a ser utilizado para lo mismo, o si se requiere una autorización de la *gerencia general* (cuando lo requerido no está contemplado en el presupuesto).

- Gestión de compra

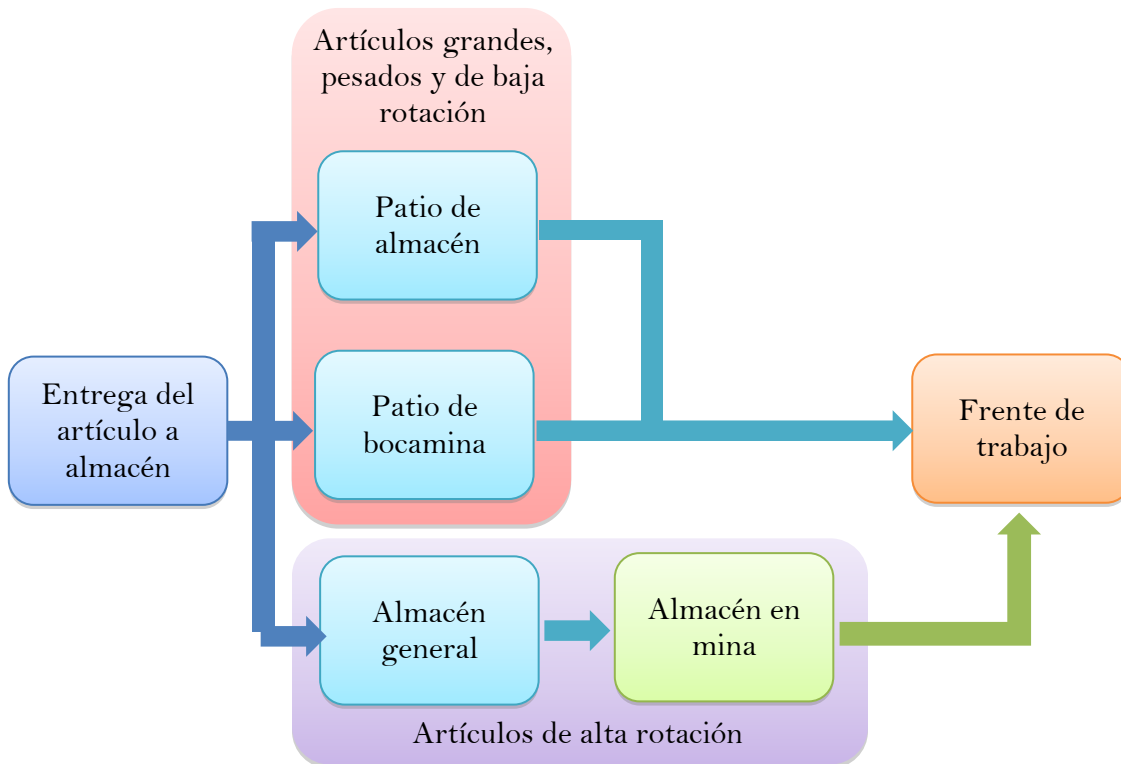
Una vez autorizada la requisición, el *almacén* hace llegar el requerimiento al *departamento de adquisiciones*. Ahí, se encargan de cotizar los artículos, ver que coincidan con los requerimientos y de comparar características de los artículos ofertados por los proveedores. Se analizan aspectos como precio, disponibilidad, compatibilidad, tiempo de entrega, entre otros. Con base en lo anterior se toma una decisión y pone a disposición de la *dirección (corporativo)* para su autorización. Una vez autorizado, se realiza el pedido, se hace llegar al proveedor, se confirman las condiciones y se organiza la logística y el transporte.

- Entrega del producto

Una vez que el transportista está listo para entregar, *adquisiciones* notifica al *almacén* la entrega. El *almacén* recibe los artículos en un patio de entregas y se encarga de comprobar que la entrega sea conforme a lo requerido y los artículos estén en condiciones aceptables. Posteriormente se realiza el registro en su base de datos y se dispone a colocar el artículo en la instalación más conveniente de acuerdo a sus características y su asignación. En la siguiente figura, se resume el movimiento de los artículos disponibles.



Gráfico 1.7 Movimiento de los artículos en disponibilidad



Fuente: Elaboración propia

Aunque las requisiciones las puede realizar cualquier departamento, una vez que el artículo es recibido este queda bajo control del *almacén*, hasta el momento que es requerido para su uso.

Es importante mencionar que en este trabajo no se incluye la devolución de artículos que no cumplen con lo requerido, aunque pueden afectar a la empresa y la operación, lo cual es una limitación del estudio, debido a que es una actividad prácticamente que se presentó escasamente en el periodo de estudio.

Comportamiento de interrupciones de equipo operativo

Esta sección tiene como objetivo poner de manifiesto las interrupciones que son vulnerables de la disponibilidad de refacciones. Los tipos de interrupciones que se

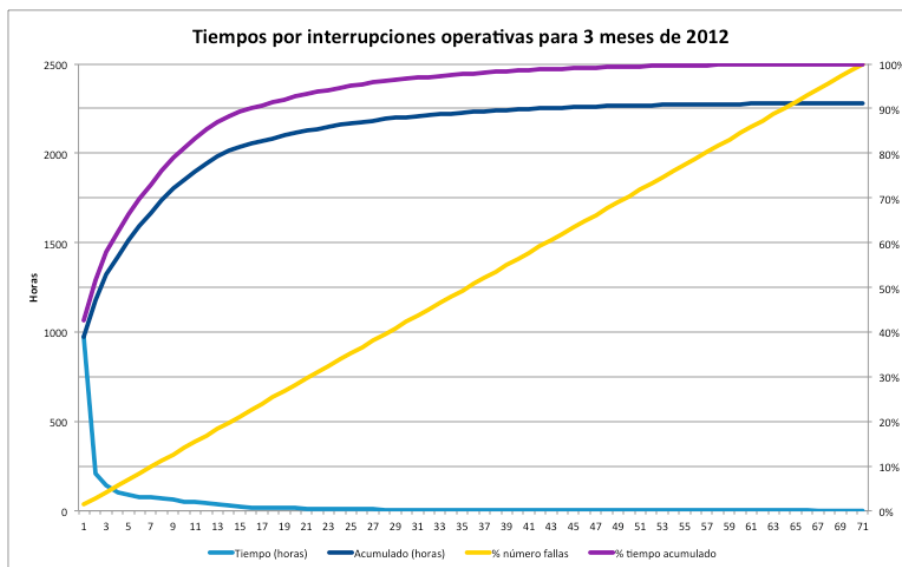


consideran son las interrupciones del tipo *operativas*, en el *minero continuo*, en los *carros transportadores* y en las *bandas transportadoras/tolvas*.

Posteriormente, se seleccionaron las interrupciones que son susceptibles de ser minimizadas por disponibilidad de inventario.

De las interrupciones se puede ver que las *operativas* ofrecen la mayor suma de tiempos, lo que lo hace parecer un área de oportunidad bastante buena, como se puede ver en el gráfico 1.7. Las interrupciones con mayor tiempo representan el 20% de las mayores fallas (por número de interrupciones), y aportan cerca del 90% del tiempo total por interrupciones. Sin embargo, al menos las actividades que consumen más tiempo y las más recurrentes no hacen uso de refacciones o ya se encuentran bajo un estricto control (por ejemplo, el cambio de picas se beneficia de contratos de consignación, lo que ocasiona que siempre exista disponibilidad de sus insumos).

Gráfico 1.7 Tiempos acumulados por interrupciones operativas de mayor a menor para 3 meses de año 2012



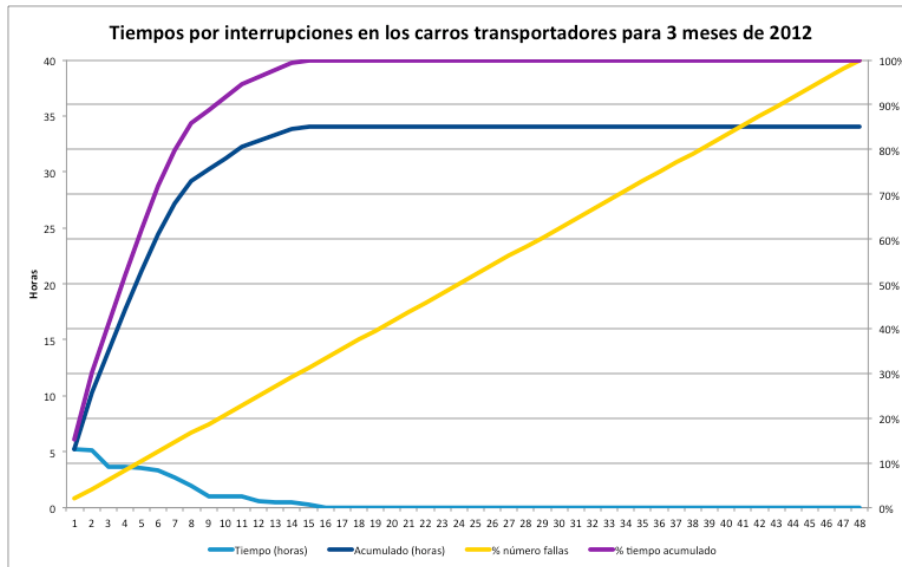
Fuente: Elaboración propia.

Las interrupciones por *carros transportadores* no parecen ser relevantes en cuanto a tiempos, por lo que no se consideran en este estudio. En el gráfico 1.8 se puede ver el



comportamiento de este tipo de interrupciones, en donde el acumulado de todas sus interrupciones es de 40 horas para 3 meses, contra 450 horas para el minero continuo, por ejemplo.

Gráfico 1.8 Tiempos acumulados por interrupciones de los carros transportadores de mayor a menor para 3 meses de año 2012

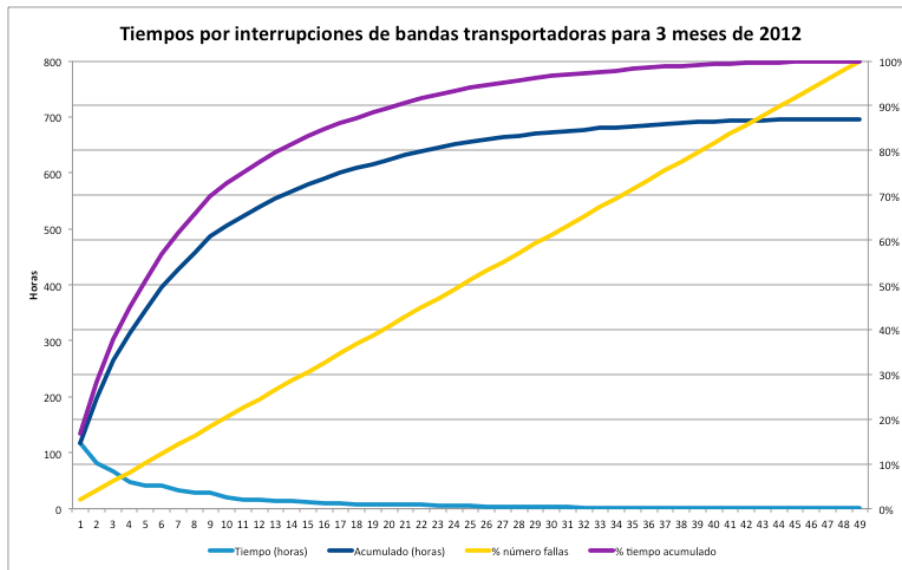


Fuente: Elaboración propia.

Las interrupciones por *bandas transportadores* y en el *minero continuo* ofrecen comportamientos relevantes, respecto a la duración de las interrupciones. Analizando los tiempos de las interrupciones, respecto a las *bandas transportadoras*, cuyas interrupciones pueden verse en el gráfico 1.9. Considerando los detalles, se determinó que pocas de las actividades que mayor tiempo consumen son poco susceptibles de ser minimizadas con teoría de inventarios. Por ejemplo, empate de bandas, se sabe que la empresa cuida el no tener escasez de hule de banda y de consumibles para bandas transportadoras, y aún si lo hubiera pueden rehusarse hules de banda de manera temporal.

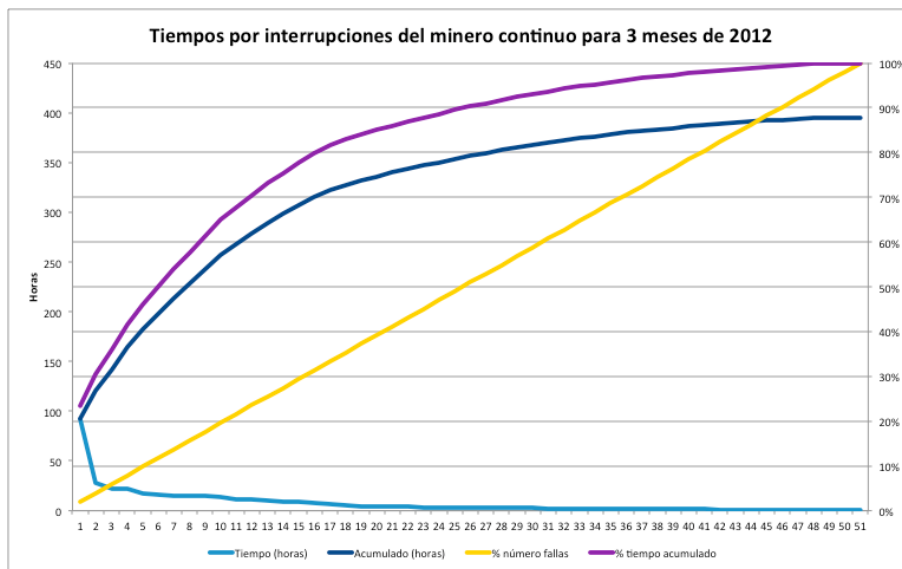


Gráfico 1.9 Tiempos acumulados por interrupciones en las bandas transportadoras de mayor a menor para 3 meses de año 2012



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 1.10 Tiempos acumulados por interrupciones del minero continuo de mayor a menor para 3 meses de año 2012



Fuente: Elaboración propia.

Por lo anterior se eligieron las interrupciones en el *minero continuo*, con tiempos de interrupciones no despreciable, donde los mayores tiempos involucran a más actividades,



pero se parecen al criterio 80/20. Visto de esta forma, se puede hacer referencia a la clasificación de inventarios ABC, donde típicamente 20% del inventario aporta el 80% del volumen de valor (Asxäter, 2006), pero en lugar de este último, considerando al tiempo por interrupciones. Esto se muestra en el gráfico 1.10. Poco más del 30% de las interrupciones aportan alrededor de un 80% del tiempo interrumpido. Y 20% de las interrupciones sólo aportan un 65% del tiempo por interrupciones.

La información numérica respecto al tiempo por interrupciones, el número de fallas (actividades) y el tipo de interrupción puede verse resumido a algunos valores en la tabla 1.3. Para más información al respecto, pueden verse, en el anexo A, las tablas donde se presentan las 10 interrupciones que más tiempo consumen por tipo y, en el anexo B, las tablas correspondientes a las actividades que interrumpen la operación, las cuales organizadas de manera descendente de acuerdo al tiempo consumido (mismo orden en el que se presentan en los gráficos 1.7, 1.8, 1.9 y 1.10).

Tabla 1.3 Relación número de fallas contra acumulado por tiempo interrumpido
Porcentaje del tiempo acumulativo por interrupciones

		Porcentaje de número de fallas			
		10%	20%	30%	40%
Tipo de interrupciones	Minero continuo	46%*	65%*	80%*	86%*
	Carros transportadores	62%*	92%*	99%*	99%*
	Operativo	73%*	88%*	93%*	96%*
	Bandas transportadoras	51%*	73%*	83%*	90%*
Con datos de tiempos ordenados de manera descendente y acumulados					
*Del tiempo total interrumpido por tipo					

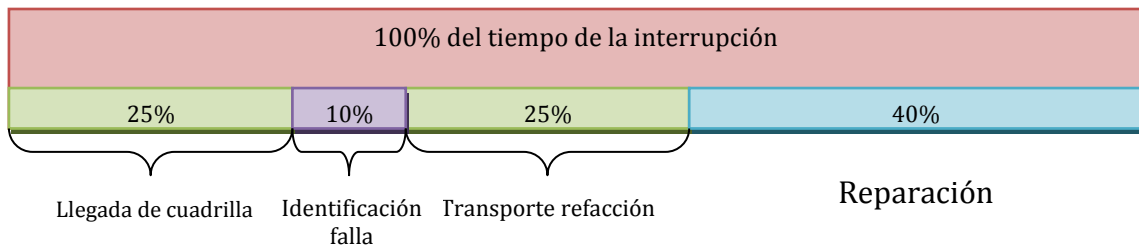
Fuente: Elaboración propia, con base en datos de la empresa.

La mayoría de la interrupciones tienen un comportamiento donde el 40% del tiempo, es realmente dedicado a la reparación. Este se puede ver esquematizado en la figura 1.5. Esta representación se desarrolló con información resultante de estudios realizados por la empresa. Este comportamiento refleja un área de oportunidad, ya que hasta 50% del



tiempo no es dedicado a la reparación o a la identificación de la falla (para interrupciones en equipos).

Figura 1.11 Comportamiento de una interrupción



Fuente: Elaboración propia, con base en información de la empresa.



Capítulo 2. Marco Teórico

Este estudio se enfoca en generar una o varias propuestas que disminuyan las interrupciones de la actividad extractiva, que ocurren dentro de la mina.

Se sabe que gran parte de los modelos de inventarios tienen como objetivo lograr un costo mínimo, considerando diferentes características para cada uno, y es este tipo de modelos los que se usaron en el estudio piloto y se consideraron en el estudio final.

Así también, la Simulación como herramienta de análisis que nos permite representar un sistema real o conceptual y analizar cómo se comporta un sistema en situaciones diferentes a las reales.

Haciendo uso de las dos herramientas mencionadas anteriormente, en el presente estudio se generaron y analizaron propuestas enfocadas a la minimización de ocurrencias en algunas de las actividades que interrumpen la operación.

2.1 Teoría de Inventarios

“El problema del inventario tiene que ver con guardar en reserva un artículo para satisfacer las fluctuaciones de la demanda. El exceso de existencias de un artículo aumenta el costo del capital y de almacenamiento, y la escasez de existencias interrumpe la producción y/o las ventas. El resultado es buscar un nivel de inventario que balancee las dos situaciones extremas minimizando una función de costo apropiada. El problema se reduce a controlar el nivel del inventario diseñando una política de inventario que responda dos preguntas:

1. ¿Cuánto pedir?
2. ¿Cuándo pedir?”

Fuente: Taha, H.A. (2012).

La base del modelo de inventario es la siguiente función de costo genérica:



$$\left(\begin{array}{c} \text{Costo} \\ \text{total del} \\ \text{inventario} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Costo de} \\ \text{compra} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Costo de} \\ \text{preparación} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Costo de} \\ \text{retención} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Costo por} \\ \text{escasez} \end{array} \right)$$

1. El *costo de compra* es el precio por unidad por el cual se adquiere un artículo de inventario. Puede haber descuentos al llegar a ciertos tamaños de lote, lo cual es un factor a considerar al momento de tomar la decisión de *cuánto pedir*. Esto sucede especialmente cuando se adquieren grandes cantidades de un artículo o varios artículos a un mismo proveedor.
2. El *costo de preparación* representa un cargo fijo en que se incurre cuando se coloca un pedido (no importa su tamaño). Son costos relacionados mayormente con la logística para la entrega del producto.
3. El *costo de retención* (almacenamiento) representa el costo de mantener las existencias de un artículo. Incluye el interés sobre el capital y el costo del almacenamiento, mantenimiento y manejo. Dependiendo del artículo, algunos aspectos importantes en este punto pueden ser: condiciones del almacén, cercanía al área de uso, disponibilidad de espacio y organización.
4. El *costo por escasez* (faltante) es la penalización en que se incurre cuando se agotan las existencias. En este caso se refiere a la interrupción de la producción y debido a que la demanda es cautiva, representa la pérdida de oportunidad de venta.

“Los costos descritos son contrarios en el sentido de que el incremento de uno puede provocar la reducción de otro (por ejemplo, pedir con más frecuencia eleva el costo de preparación pero reduce el costo de retención del inventario). El propósito de la minimización de la función de costo del inventario total es balancear dichos costos.

Un sistema de inventario puede requerir revisiones periódicas (por ejemplo, pedir al inicio de cada semana o cada mes). Alternativamente, el sistema puede estar basado en revisiones continuas, colocando un nuevo pedido cuando el nivel del inventario se



reduce a un punto de volver a pedir específico.”

Fuente: Taha, H.A. (2012).

Para el caso en estudio, las revisiones no son tan periódicas, debido a un complicado y burocrático proceso de adquisición para la mayoría de los artículos. Se trata de hacer pedidos en no más de 4 ocasiones al año, los cuales pueden tener varias entregas programadas para limitar la utilización del almacén. Sin embargo, esta situación es diferente para los artículos bajo consignación, los cuales están en revisión continua.

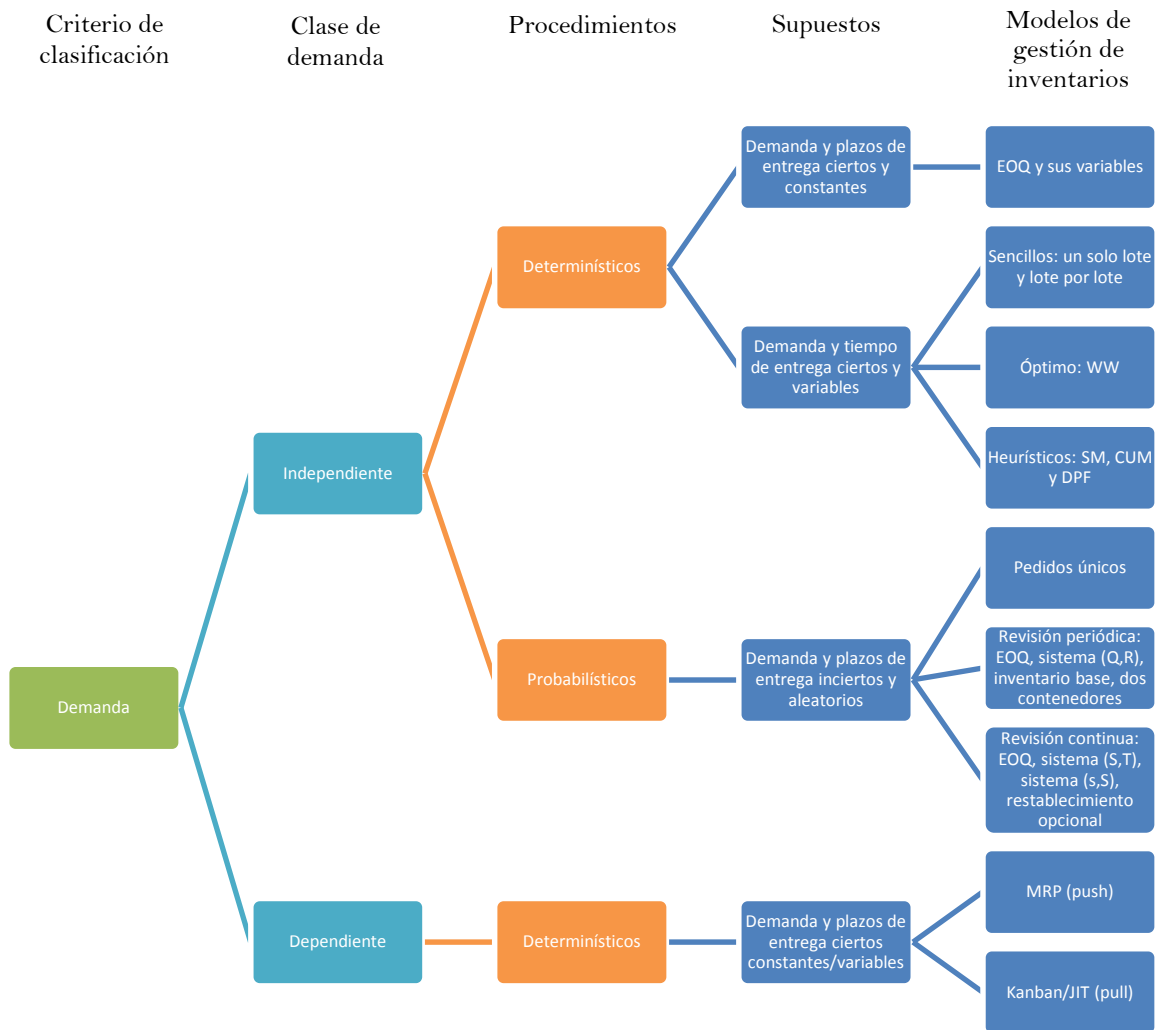
La administración científica de inventarios comprende los siguientes pasos:

1. Formular un *modelo matemático* que describa el comportamiento del sistema de inventarios.
2. Elaborar una política *óptima* de inventarios a partir de ese modelo para algunos de los artículos críticos.
3. Utilizar un *sistema de procesamiento de información* computarizado para mantener un registro de los niveles de inventario.
4. A partir de los registros de los niveles de inventario, utilizar la política óptima de inventarios para señalar cuándo y cuánto conviene reabastecer.

Los modelos matemáticos de inventarios que aplica este enfoque se pueden dividir en dos grandes categorías: modelos determinísticos y modelos estocásticos, según la posibilidad de predecir la demanda.



Gráfico 2.1 Modelos de gestión de inventarios



Fuente: Bustos Flores, Carlos Enrique & Chacón Parra, Galia Beatriz (2012) *Modelos determinísticos de inventarios para demanda independiente*. Un estudio en Venezuela *Contaduría y Administración*, vol. 57, núm. 3, julio-septiembre, 2012, pp. 239-258, Universidad Nacional Autónoma de México, México.



Modelo (r,q) con pendientes permitidos: para L fijo y variable

El modelo o política (r, q) es un caso específico del modelo de la cantidad económica de pedido (EOQ, por sus siglas en inglés), donde el tiempo de entrega es diferente a cero y la demanda durante cada tiempo de entrega es aleatoria. El modelo es de revisión continua y para el caso de la mina se supone que no existen ventas perdidas.

El modelo hace uso de la siguiente definición de conceptos a utilizarse en las formulas correspondientes:

K = Costo de ordenar

h = Costo por mantener por unidad por año

L = Tiempo de entrega para cada orden (se asume es cierta)

q = Cantidad a ordenar cada vez que una orden se coloca

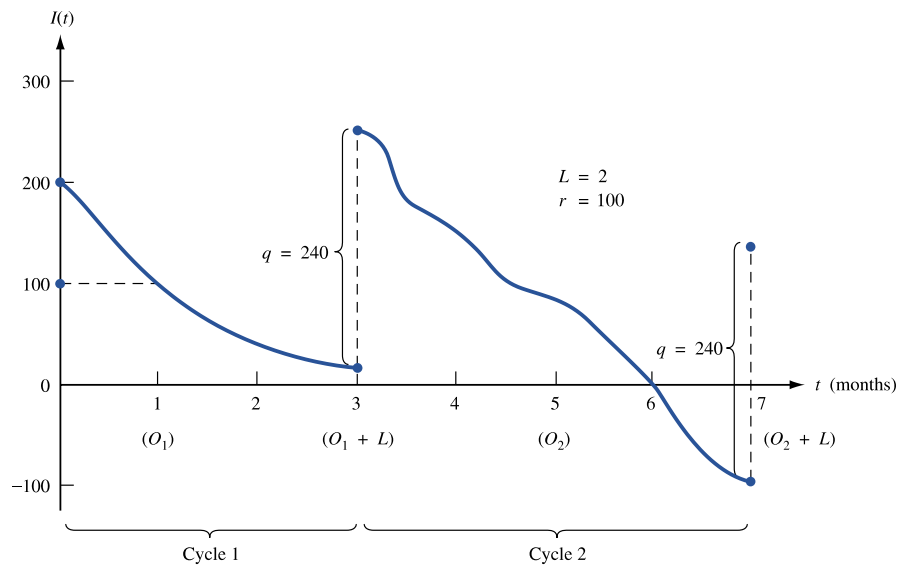
D = Variable aleatoria (se asume es continua) que representa la demanda anual, con media $E(D)$, varianza $var D$, y desviación estándar σ_D .

c_B = Costo en que se incurre por cada unidad faltante, la cual no depende de que tanto tiempo toma tener unidades en inventario

Para ilustrar el comportamiento de este tipo de demanda, que justifica el uso de este modelo, y algunos de los términos que se acaban de describir a continuación se presenta un ejemplo gráfico.



Figura 2.1 Evolución del inventario sobre el tiempo en el modelo de punto de reorden



Fuente: Winston, W.L. (2005). *Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos*. México: Thomson.

Donde:

r = Nivel de inventario en el cual la orden es colocada (punto de reorden)

Solo hace falta una definición clave para continuar con las fórmulas de solución del modelo.

\mathbf{X} = Variable aleatoria que representa a la demanda durante el tiempo de entrega, la cual asumimos tiene una función de densidad $f(x)$ y media, varianza y desviación estándar de $E(\mathbf{X})$, $var \mathbf{X}$ y $\sigma_{\mathbf{X}}$, respectivamente. Si asumimos que las demandas a diferentes puntos del tiempo son independientes, entonces se puede mostrar que la demanda aleatoria \mathbf{X} durante el tiempo de entrega satisface:

$$E(\mathbf{X}) = LE(\mathbf{D})$$

$$var \mathbf{X} = L(var \mathbf{D})$$

$$\sigma_{\mathbf{X}} = \sigma_{\mathbf{D}}\sqrt{L}$$



Asumimos que si \mathbf{D} es normalmente distribuida, entonces \mathbf{X} también es normalmente distribuida.

Supongamos que permitimos al tiempo de entrega L ser una variable aleatoria (denotada por \mathbf{L}), con media $E(\mathbf{L})$, varianza $var \mathbf{L}$ y desviación estándar σ_L . Si la duración del tiempo de entrega es independiente de la demanda por unidad de tiempo durante el tiempo de entrega, entonces:

$$E(\mathbf{X}) = E(\mathbf{L})E(\mathbf{D})$$

$$var \mathbf{X} = E(\mathbf{L})(var \mathbf{D}) + E(\mathbf{D})^2(var \mathbf{L})$$

Para r^* siendo el valor de r para el cual el beneficio marginal iguala al costo marginal, se asume que la cantidad de la orden puede ser aproximada por:

$$q^* = \left(\frac{2KE(\mathbf{D})}{h} \right)^{1/2}$$

$$P(\mathbf{X} \geq r^*) = \frac{hq^*}{c_B E(\mathbf{D})}$$

si

$$\frac{hq^*}{c_B E(\mathbf{D})} > 1$$

Para mayores detalles ver Winston, W.L. (2005). *Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos*.



2.2 Simulación

“Desde hace mucho tiempo, la técnica de *simulación* ha sido una herramienta importante para el diseñador. Por ejemplo, la simulación del vuelo de un avión en un túnel de viento es una práctica normal con los nuevos diseños.

En esencia, la simulación tiene el mismo papel en muchos estudios de Investigación de Operaciones. No obstante, en lugar de diseñar un avión, el objetivo es desarrollar un diseño o procedimiento de operación para algún sistema estocástico.

Cuando es necesario utilizar simulación como parte de un estudio, es común que vaya precedida y seguida de algunos pasos. En particular, primero se hace un análisis teórico preliminar (quizá con modelos matemáticos aproximados) para desarrollar un diseño básico del sistema (que incluye sus procedimientos de operación). Después se usa una simulación para experimentar con los diseños específicos con el fin de estimar el desempeño real. Una vez desarrollado y elegido el diseño detallado, se prueba el sistema real para ajustar los últimos detalles del diseño final.

Para preparar una simulación de un sistema complejo, es necesario un modelo de simulación detallado para formular y describir la operación del sistema y cómo debe simularse. Un modelo de simulación consta de varios bloques de construcción básicos:

1. Definir el *estado del sistema* (como el número de clientes en un sistema de colas).
2. Identificar los *estados posibles* del sistema que pueden incurrir.
3. Identificar los *eventos posibles* (como las llegadas y terminaciones de servicio en un sistema de colas) que cambian el estado del sistema.
4. Contar con un *reloj de simulación*, localizado en alguna dirección del programa de simulación, que registrará el paso del tiempo (simulado).
5. Un método para *generar los eventos de manera aleatoria* de los distintos tipos.
6. Una fórmula para identificar las *transiciones de los estados* que generan los diferentes tipos de eventos.”

Fuente: Hillier, F. Millier, M. & Lieberman, G. (2000)

Existen dos tipos distintos de modelos de simulación:

1. Los modelos continuos se ocupan de sistemas cuyo comportamiento cambia *continuamente* con el tiempo. Estos modelos suelen utilizar ecuaciones diferenciales



“Elaboración y evaluación de propuestas de optimización de inventarios, para aumentar la producción, en un proceso extractivo”

para describir las interacciones entre los diferentes elementos del sistema. Un ejemplo típico tiene que ver con el estudio de la dinámica de la población mundial.

2. Los modelos discretos tienen que ver principalmente con el estudio de líneas de espera con el objetivo de determinar medidas como el tiempo de espera promedio y la longitud de la cola. Estas medidas cambian sólo cuando un cliente entra o sale del sistema. Los instantes en que ocurren los cambios en puntos discretos específicos del tiempo (eventos de llegada y salida), originan el nombre simulación de evento discreto.

Debido a su versatilidad, la simulación se puede usar (con diferentes grados de dificultad) para investigar virtualmente cualquier tipo de sistema estocástico.

Es imposible enumerar todas las áreas específicas en las que se utiliza. Sin embargo, algunas aplicaciones importantes se mencionan a continuación.

- Diseño y operación de sistemas de colas
- Administración de sistemas de inventarios
- Estimación de la probabilidad de terminar un proyecto a tiempo
- Diseño y operación de sistemas de manufactura
- Diseño y operación de sistemas de distribución

Para el caso considerado en esta investigación, la simulación se concreta en analizar el área de operación donde ocurre la extracción del mineral. El sistema conceptual está enfocado en representar las condiciones de producción y flujo presentes en los frentes de trabajo, pero su principal objetivo es la representación de las interrupciones en los diferentes equipos que intervienen en la operación.

Como se mencionó anteriormente, el sistema bajo estudio inicia con la extracción del mineral por parte del *minero continuo* y finaliza al salir el mineral del sistema de bandas transportadoras hacia la *bocamina*.



La simulación permite tener un modelo virtual que es muy sencillo, pero que a la vez es representativo del sistema en estudio, para poder evaluar las posibilidades que se tienen en cuanto a las interrupciones. Es lo anterior la principal ventaja de la simulación, tanto para este estudio como en general, ya que permite que el conocer y el analizar escenarios sea económico y libre de riesgos, debido a que no hay necesidad de hacer cambios en el sistema real para conocer los efectos que pudieran originarse.

La simulación permite animar dinámicamente las operaciones y recursos del sistema (Chung, 2003). Un modelo de simulación ayuda a los usuarios a comprender mejor la operación del sistema.

Propósitos de la simulación (Chung 2003)

- Ganar conocimiento de la operación de un sistema.
- Desarrollar políticas de operación o recursos para mejorar el desempeño del sistema.
- Probar nuevos conceptos y/o sistemas antes de su implementación.
- Ganar información sin afectar el sistema actual.

Ventajas de la simulación (Chung 2003)

- Experimentación en tiempo comprimido.
- Requerimientos analíticos reducidos.
- Demostración (gráfica) fácil de los modelos.

Desventajas de la simulación (Chung 2003)

- No se obtienen resultados precisos cuando los datos de entrada son imprecisos.
- No se proveen respuestas sencillas a problemas complejos.
- No puede resolver problemas por sí misma.



Consideraciones al usar la simulación (Chung 2003):

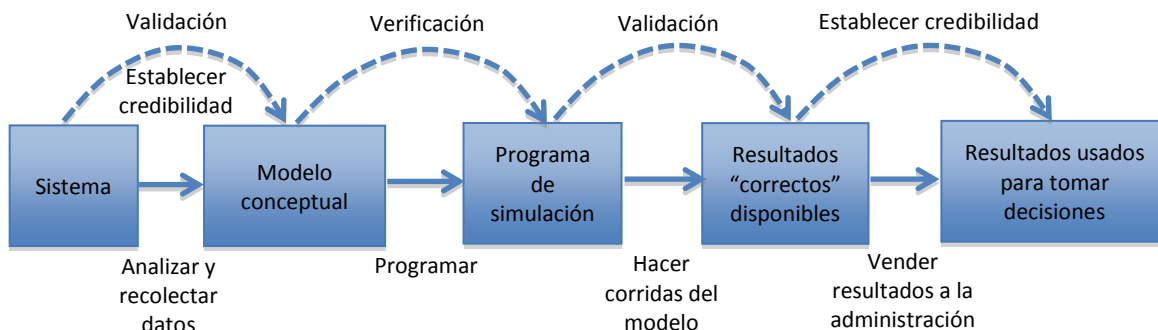
- La construcción del modelo puede requerir entrenamiento especializado.
- La modelación y el análisis pueden resultar costosos.
- Los resultados involucran varios estadísticos.

Estados del modelo de simulación

Un estudio de simulación tiene un procedimiento que se puede representar por sus estados. Es importante mostrar los momento y las relaciones que existen entre la validación, la verificación y el establecimiento de la credibilidad. La siguiente figura muestra el procedimiento en general.

Los rectángulos representan los estados del modelo, las flechas solidas horizontales corresponden a las acciones necesarias para moverse de un estado a otro, y las flechas curvas con línea punteada muestran donde los tres mayores conceptos son más prominentemente empleados. Aunque existen ciclos de respuesta, no es el objetivo de esta figura mostrarlos.

Figura 2.2 Momentos y relaciones entre validación, verificación y establecer credibilidad



Fuente: Law, 2007.

Como lo describe la figura, el procedimiento de un estudio de simulación comienza con un sistema real o ficticio (en el caso de que el sistema aún no exista), este sistema se debe



analizar para generar suposiciones, es decir todas las características que, de acuerdo a los objetivos que se buscan, sean relevantes, para lo cual se necesita del análisis y de datos reales, con esto se desarrolla el modelo conceptual. En este momento se habla de una validación y de establecer credibilidad, ya que se trata de un ciclo donde debemos analizar que las suposiciones sean coherentes con lo que se busca y que se hace sobre una base confiable.

Después de documentar las suposiciones se dice que tenemos un modelo conceptual validado y creíble, entonces procedemos a programar el modelo con el algún software, este proceso requiere que verifiquemos que el modelo programado se comporte como el modelo conceptual.

Estando el modelo verificado, necesitamos validar el modelo de simulación programado con el sistema real. Como el resto de los estados, este paso es en realidad un ciclo, donde hay que realizar corridas, sobre todo por el carácter estocástico que tienen la mayoría de los modelos. Estas corridas nos ayudan a determinar si no hay mucha diferencia entre el modelo y el sistema real, es decir, si es válido.

Una vez validado el modelo, tenemos resultados en los que podemos confiar. Ya solo falta presentar la información, el modelo y la documentación de manera adecuada para que nuestro modelo tenga credibilidad ante todos los interesados.

Validación

Uno de los pasos más importantes en la simulación es la validación, donde se determina si el modelo de simulación es una representación precisa del sistema, para los objetivos particulares del estudio. No se busca que el modelo se comporte de manera exacta, ya que un modelo de simulación es una representación que se hace en términos de ahorro de tiempo, dinero y esfuerzo, por lo tanto es mucho más sencillo tanto en detalle como en comportamiento.



En este estudio se usa un procedimiento estadístico para comparar las observaciones del sistema real y los datos de salida de la simulación, basado en intervalos de confianza con datos independientes.

“Creemos que construir un intervalo de confianza para ζ es preferible a probar la hipótesis nula $H_0: \mu_X = \mu_Y$ por las siguientes razones:

- Como el modelo es sólo una aproximación del sistema, H_0 claramente será falsa en la mayoría de los casos.
- Un intervalo de confianza provee más información que la correspondiente prueba de hipótesis. Si una prueba de hipótesis indica que $\mu_X \neq \mu_Y$, entonces el intervalo de confianza proveerá esta información y también dará una indicación de la magnitud de que tanto μ_X difiere de μ_Y .”

Fuente: Law, 2007.

El procedimiento en el que se basa este estudio para validar es un enfoque de la t pareada, usado por Runciman, Vagenas y Corkal (1997) para validar un modelo de operaciones mineras subterráneas (mencionado en Law, 2007).

El procedimiento es parecido al realizado en el experimento con diferencias pareadas con enfoque no-paramétrico (prueba de rango con signos de Wilcoxon, el cual hace uso de la t de student), más información se puede encontrar en McClave, Sincich & Benson (2000). Se puede conocer más del enfoque de validación utilizado en las secciones 5.6.2 y 10.2.1 de Law (2007).

“Supongamos que hemos construido un intervalo de confianza del $100(1 - \alpha)$ por ciento para ζ usando la t-pareada, y establecemos $l(\alpha)$ y $u(\alpha)$ como los correspondientes límites inferior y superior del intervalo de confianza, respectivamente. Si $0 \notin [l(\alpha), u(\alpha)]$, entonces la diferencia observada entre μ_X y μ_Y , es decir, $\bar{X}(m) - \bar{Y}(n)$, se dice es estadísticamente significativa al nivel α . Esto es equivalente a rechazar la hipótesis nula $H_0: \mu_X = \mu_Y$ a favor de la hipótesis alternativa de dos colas $H_1: \mu_X \neq \mu_Y$ al mismo nivel α . Si $0 \in [l(\alpha), u(\alpha)]$, cualquier diferencia



observada entre μ_X y μ_Y no es estadísticamente significativa al nivel α y puede ser explicado por fluctuación muestral.”

Fuente: Law, 2007.

Punto estimado para ζ (donde la muestras son del mismo tamaño):

$$\bar{W}(n) = \bar{X}(n) - \bar{Y}(n).$$

Varianza del punto estimado ζ :

$$\widehat{Var}[\bar{W}(n)] = \frac{\sum_{j=1}^n [W_j - \bar{W}(n)]^2}{(n)(n-1)}$$

Intervalo de confianza para ζ :

$$\bar{W}(n) \pm t_{9,0.95} \sqrt{\widehat{Var}[\bar{W}(n)]}$$

Software Simio

Simio es un software de modelación diseñado desde sus bases para soportar el paradigma de modelado de objetos (Simio 2015a); sin embargo, también soporta el uso de otros múltiples paradigmas incluyendo la orientación a procesos y la orientación a eventos. También soporta completamente sistemas discretos y continuos, a la vez de una gran escala de aplicaciones basadas en modelación por agentes. Estos paradigmas de modelado pueden ser libremente mezclados en un solo modelo.

El enfoque basado en *objetos* permite construir combinando *objetos* que representan componentes del sistema. Un *objeto* tiene un comportamiento propio definido por su modelo interno que responde a los eventos del sistema (Pegden & Sturrock, 2014). Para este estudio, los objetos representan al *minero continuo*, la *banda transportadora*, los *carros transportadores*, por mencionar algunos.



Un *objeto* (o modelo, ya que un modelo puede ser convertido en objeto) está definido por sus propiedades, estados, eventos, vista externa y lógica (Pegden & Sturrock, 2014), mismos que a continuación se describen brevemente:

- Las *propiedades* son valores de entrada que dictan el comportamiento del objeto, por ejemplo, tiempo de servicio del *minero continuo*.
- El *estado* son valores dinámicos que dicen cómo está el objeto en un momento, por ejemplo, si está disponible u ocupado.
- *Eventos* son acciones que se disparan dadas unas condiciones, en este caso, cuando los *carros transportadores* están llenos pueden moverse hacia la *tolva*.
- La *vista externa* es la representación gráfica (o visual) del modelo, que puede ser en 2D o en 3D.
- La *lógica* dicta como responde el objeto a ciertos eventos, por ejemplo, se hace uso de la *lógica de confiabilidad* para modelar las interrupciones, mediante los tiempos entre evento y su duración.

Simio presenta 5 casos de estudio relacionados con la industria de la minería (Simio 2015b).

- Casos 1-3: Simulación dinámica por MOSIMTEC
 - Cubriendo por completo la cadena de valor minera para encontrar opciones para los diferentes impactos en logística, flota y cadena de suministro.
 - Modelo complejo de producción a océano abierto que ayudó a reducir y retrasar trenes y almacenamiento.
 - El análisis de la mina subterránea y la capacidad de sistema del manejo de materiales mostró decimos de millones de dólares en ahorros reduciendo mineros en 38%.
- Caso 4: Una mina sudafricana a cielo abierto usa un modelo en 3D para la ubicación óptima de la estación de combustible así como la optimización de una flota.



- Caso 5: La mina sudafricana Regen’s Bokarabelo: Una simulación en 3D resalta las dinámicas clave del sistema no evidentes con el análisis estadístico de su planta procesadora de carbón.

2.3 Proceso de la investigación de operaciones

Sagasti y Mitroff (1975) proponen una metodología a seguir en los problemas de *investigación de operaciones*. Este *modelo diamante* es un ciclo en el cual se comienza en la realidad, se pasa al modelo conceptual, luego al correspondiente modelo científico y así a la solución. El ciclo se cierra cuando la solución se confronta con la realidad, para esto se realiza la implementación, la cual queda fuera del alcance de este trabajo, sin embargo, se presentan algunas implicaciones de las propuestas, las cuales se pueden tomar en cuenta al momento de una implementación.

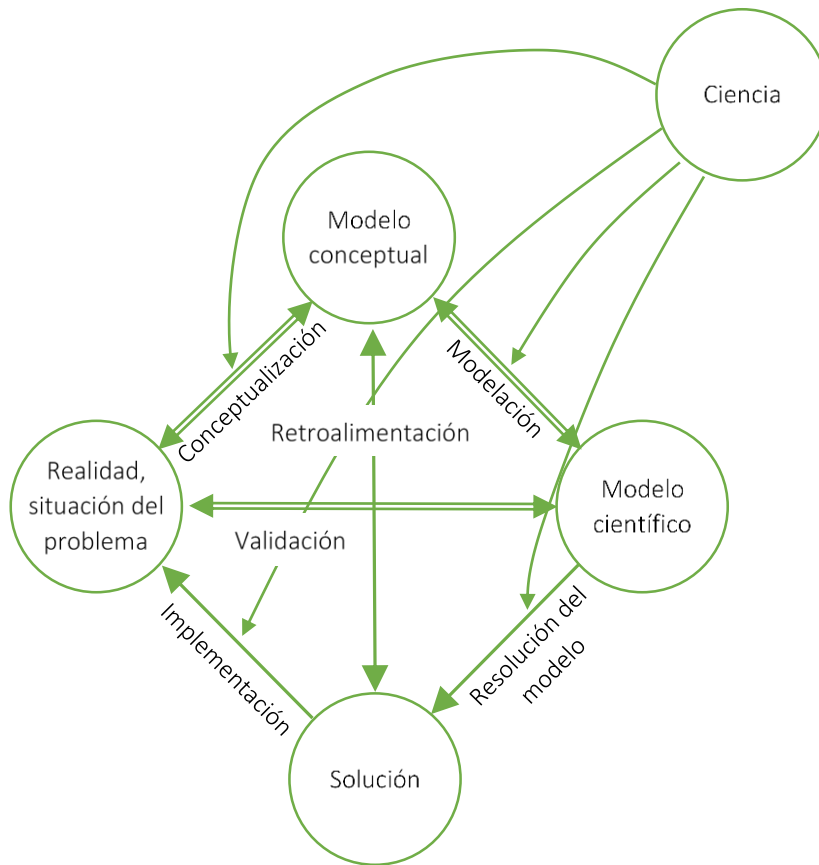
En este aspecto es importante señalar cómo se conectan cada uno de estos subsistemas, por lo que más adelante se presentan los tipos psicológicos presentados en el artículo de Sagasti y Mitroff.

Las fases del proceso corresponden a la *conceptualización*, la *modelación*, la resolución del modelo y la *implementación*. También es necesario mencionar las otras conexiones, es decir, la *retroalimentación* y la *validación*.

Sagasti y Mitroff (1975) relacionan los tipos psicológicos de Jung a cada una de las fases del proceso, mencionan que a una persona con el tipo psicológico relacionado le será más fácil desempeñarse en esa fase que en otras. En lo general, nos da una idea de que es lo que se necesita en cada una de las fases y nos ayuda a responder la forma en que cada fase debe comportarse.

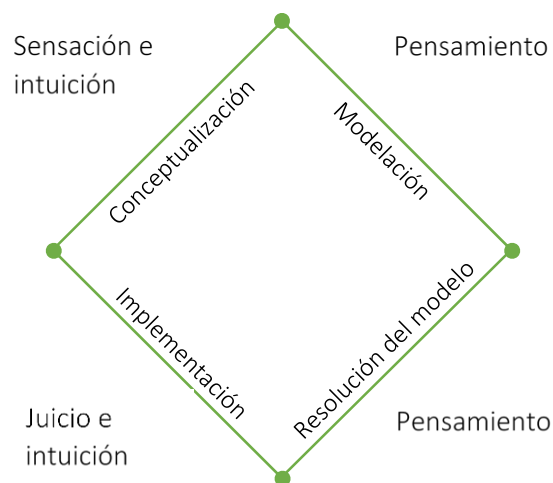


Figura 2.3 El proceso de la Investigación de Operaciones



Sagasti y Mitroff (1975)

Figura 2.4 Los tipos psicológicos Jungianos y el proceso de la IO



Sagasti y Mitroff (1975)



Relaciones entre subsistemas

Conceptualización: Depende de la sensación y la intuición, no hay una forma específica de realizar la *conceptualización*. Se requiere que el pensamiento analice el problema con el mayor número de enfoques posibles. En este trabajo, el problema está conceptualizado enfocándose en analizar los cambios en la producción obtenida, para lo cual se modifica el tiempo de interrupción de la actividad extractiva, y esta modificación está basada en el manejo de la disponibilidad de las refacciones que se usan en las actividades que interrumpen la operación. Con esta base, es que el problema se analiza utilizando *simulación*, ya que depende de un conjunto de comportamientos de carácter estocástico y los resultados de sus relaciones, cuyas propiedades emergentes nos resultan en una producción y manejo del tiempo parecido al real. También se hace una propuesta del manejo de *inventarios* que hace posible la implementación de las propuestas derivadas de la *simulación*.

Modelación: El investigador va conceptualizando el problema teniendo una estructura y un marco de apoyo, con el cual se procede a la modelación, la cual depende de pensar y procesar la información para adecuarla al molde del enfoque elegido. Respecto a los modelos de *inventarios*, por ejemplo, se estiman datos como tiempos de entrega, costos por almacenar y por ordenar. En los modelos de *simulación*, se busca que el modelo sea lo más sencillo posible, esto requiere muchas veces cambios en la conceptualización (proceso iterativo).

Resolución del modelo: Teniendo el modelo formal se procede a resolverlo. Para ello se usa la ayuda de la computadora, en el caso de los *inventarios* se introducen las formulas en Excel y se obtienen los resultados. En el caso de la *simulación*, se programa el modelo en Simio y se obtienen los resultados. Teniendo los resultados numéricos se da una interpretación y se tiene la resolución y sus correspondientes observaciones.

Implementación: Aunque no es uno de los objetivos de la investigación realizar la implementación, los resultados que se presentan si son posibles de implementar. Para esto



se presentan las estrategias de *inventarios*. También se presentan las implicaciones de las propuestas para tomar en cuenta a la hora de implementar alguna de las propuestas.

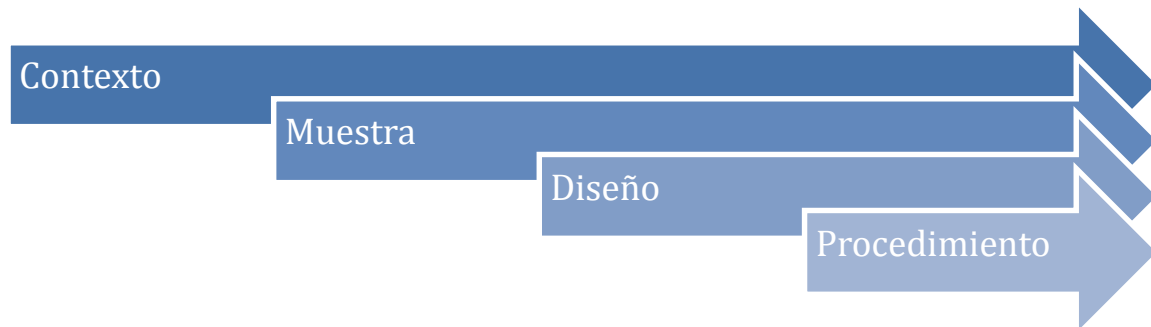
Retroalimentación: La retroalimentación se da en el aspecto de verificación y validación de los modelos. Como verificación, se cuida que la solución y la manera en que se representa vayan de acuerdo a lo que se especificó como *modelo conceptual* del estudio, es decir, cuidar que con solución, se alcancen los objetivos y se respondan las preguntas de investigación. Como validación, se comprueba que los modelos se comporten como la realidad, de acuerdo a los especificado en el *modelo conceptual*, o sea, que los datos obtenidos no sean tan diferentes a los reales. Los modelos de *inventarios* se han validado teóricamente (como se muestra en Winston, 2005), los modelos de *simulación* se validan estadísticamente.

Validación: Este aspecto es referente a la relación entre la *situación problemática* y el *modelo formal*. Esto va relacionado no sólo a la validación del modelo de *inventarios* y al de *simulación* (que se mencionan en *retroalimentación*), sino también a la validez de las propuestas que se manejan. Para este caso, las propuestas generadas se consideran válidas por opinión de gente involucrada directamente con el problema del estudio. Aunque son opiniones no tan concretas, afirman que, con el manejo de inventarios se reducen los tiempos que se describen en el estudio. Los porcentajes de tiempo que abarcan las interrupciones se conocieron con información de la empresa, obtenida antes del comienzo del estudio. La reducción correspondiente a las entregas emergentes se obtuvo también de acuerdo a respuestas de expertos tanto de la empresa como del proveedor. Estas respuestas fueron obtenidas a través de correo electrónico y a petición de la empresa no se pueden presentar los mensajes.



Capítulo 3. Marco Metodológico

Gráfico 3.1 Metodología



3.1 Contexto

Se analiza una unidad minera, con frentes de trabajo en los que se considera un procedimiento de extracción que se puede dividir en 4 etapas: extracción, transporte interior, descarga, transporte al exterior. Para el transporte interior existen dos vías o alternativas, debido a que son dos unidades las que se encargan del trabajo.

3.2 Muestra

Se dispuso de datos de actividades que detienen y entorpecen la operación de la maquinaria e instalaciones involucradas en la extracción del mineral. El estudio se concentró en las actividades que más retrasos ocasionan. Lo anterior, contando con el total de los datos del año 2012. La operación dentro de mina está dividida en tres fases de minado, de ellas se seleccionó la más representativa por producción.

3.3 Diseño

Las técnicas de la *teoría de inventarios* permiten realizar la minimización del costo por el manejo de los artículos relacionados con las actividades que interrumpen la operación. Con



lo anterior, se logró también la minimización de las pérdidas de tiempo en el proceso extractivo.

Antes y después del uso de la *teoría de inventarios*, las herramientas de *simulación* ayudan a representar un sistema mediante un modelo conceptual. Con base en ello se pueden reconocer características y comportamientos del sistema en cuestión, para decidir sobre qué actividades se aplican estrategias de inventarios. Posteriormente, también con el uso de la simulación se conoce la manera en que las estrategias de *inventarios* generadas influyen en el sistema que se analiza.

El estudio es de carácter mixto retrospectivo, ya que usa datos que son obtenidos de bases de datos elaborados por la empresa, en 2012. También porque involucra decisiones y estudios tanto de tipo cuantitativo como cualitativo.

3.4 Procedimiento

El autor estuvo en contacto con la empresa de manera directa y total, laborando tanto con la mina, como con otros departamentos. También ha realizado reportes con los datos que se cuentan.

Las bases de datos son creadas por la empresa mediante la captura en bitácoras y el registro en un sistema electrónico, permitieron generar reportes.

Así como resúmenes de trabajo para los frentes de trabajo con los que se elaboraron los sistemas conceptuales.

También, se detectaron las propiedades y los comportamientos con los cuales los modelos de inventarios y de simulación representan el sistema en cuestión.

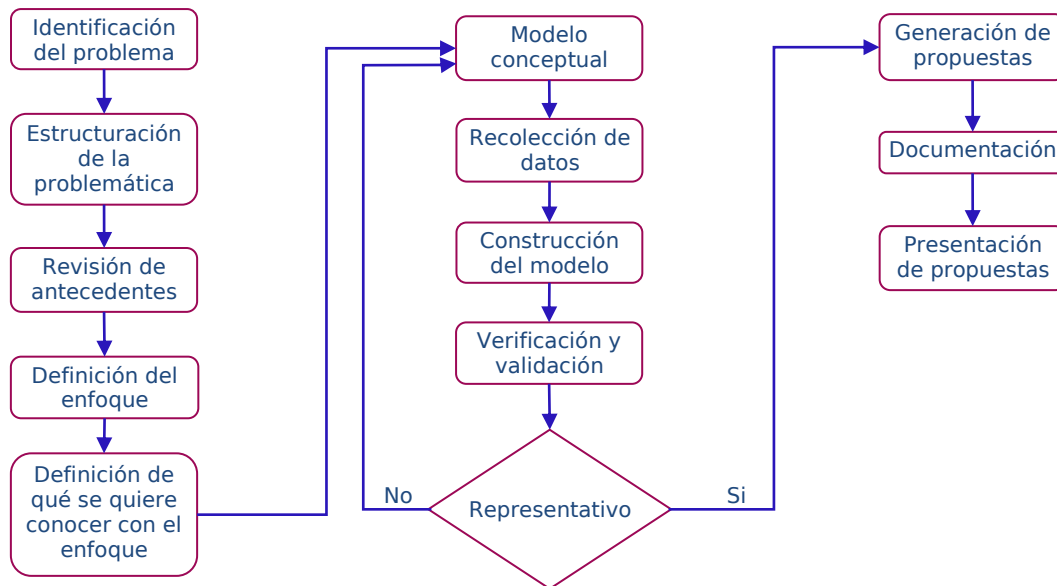


El modelo de *simulación* se ejecutó varias veces, esto para ajustarlo y conocer el comportamiento actual del sistema, así como para identificar las áreas de oportunidad, con lo cual se buscó mejorar su funcionamiento.

Con base en lo anterior se generaron propuestas factibles, que mejoran el estado actual del sistema. También, se analizaron los cambios en el sistema para conocer el efecto que los propuestas ocasionan.

Los resultados que se lograron y la información adicional generada se documentan.

Gráfico 3.2 Resumen de la estrategia seguida



Fuente: Elaboración propia

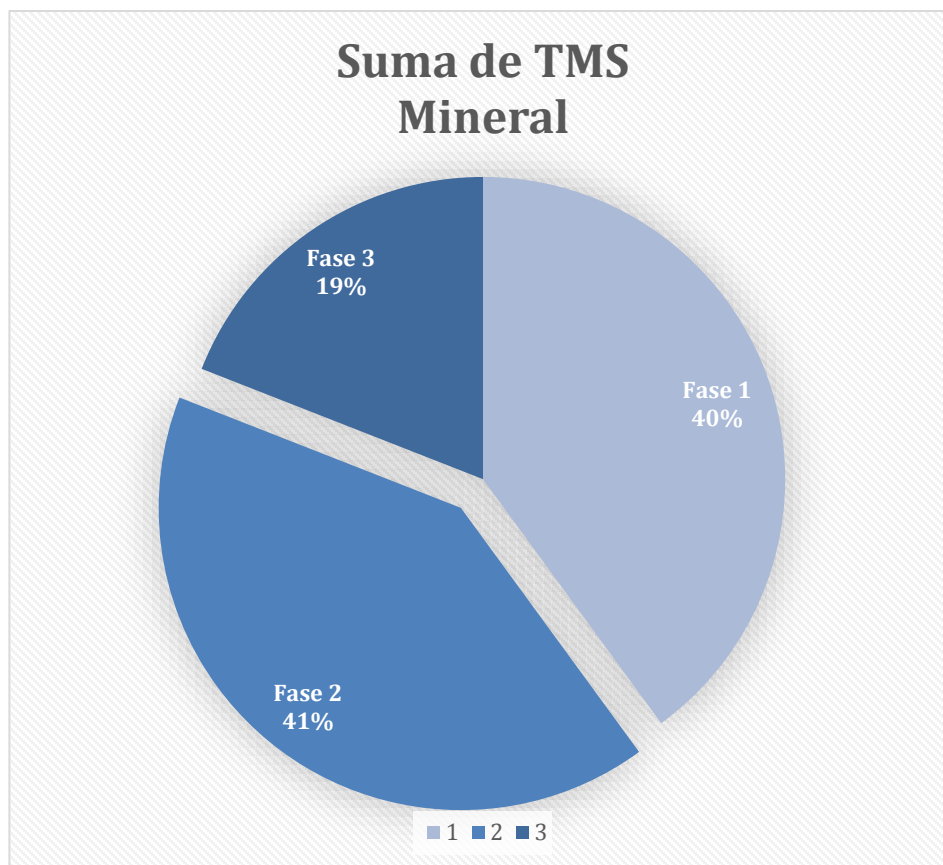


Capítulo 4. Estudio

4.1 Selección de los datos del estudio

La actividad principal en la extracción es obtener mineral, pero esta actividad se realiza en tres fases con diferentes condiciones de minado. Las tres son necesarias para el desarrollo de la unidad de minera y la continua obtención de mineral. Las condiciones diferentes de las fases hicieron que fuera de interés enfocarse solamente en una de ellas, dicha elección se realizó usando un criterio simple. Se comparó el total de mineral obtenido en el año 2012 y se eligió la fase que logra aportar la mayor cantidad de toneladas métricas secas (TMS en el gráfico 4.1), totales en el año.

Gráfico 4.1 Total de producción de año 2012

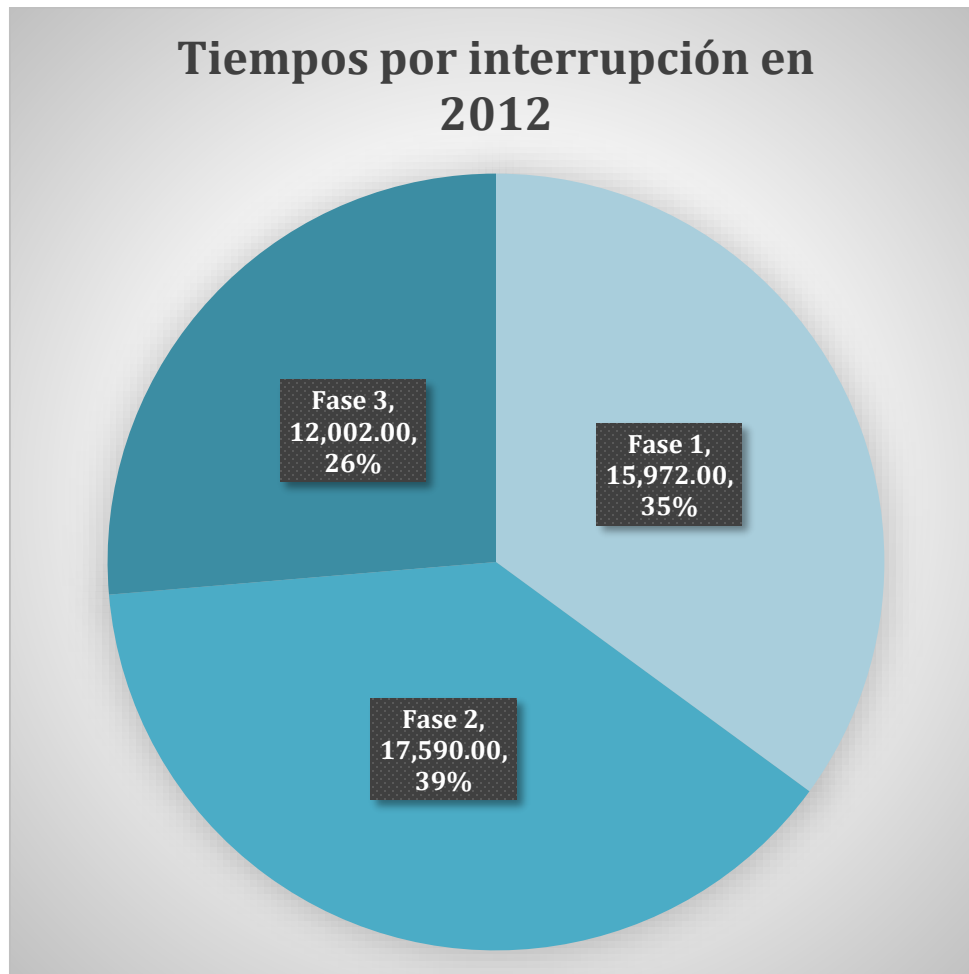


Fuente: Elaboración propia.



La fase productiva del minado seleccionada representa el 41% del total minado anual. Para mostrar la importancia de su selección también se analizaron las interrupciones totales, las cuales se pueden ver en el gráfico 4.2.

Gráfico 4.2 Total de tiempos (horas) de interrupción en la actividad extractiva, por fase en 2012



Fuente: Elaboración propia

Como se observa, la fase 2 tiene también la mayor suma de los tiempos de interrupciones por fase.



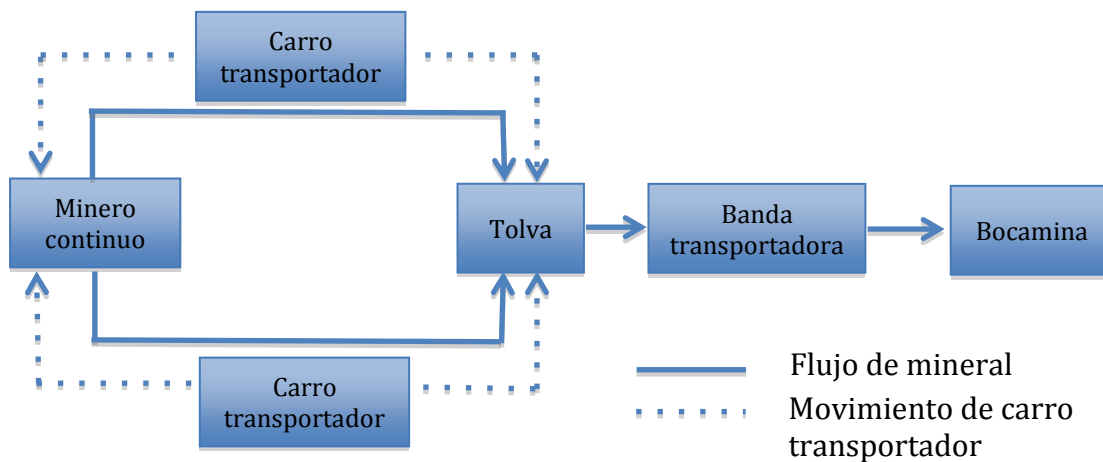


4.2 Modelo de simulación

Como se describió en capítulos anteriores, el modelo de simulación que se desarrolló abarca las actividades principales realizadas dentro de mina. Haciendo uso de las lógicas descritas en capítulos anteriores, se desarrolló el modelo de simulación con el software Simio, para el operativo Windows.

Modelo conceptual

Figura 4.1 Primer modelo conceptual



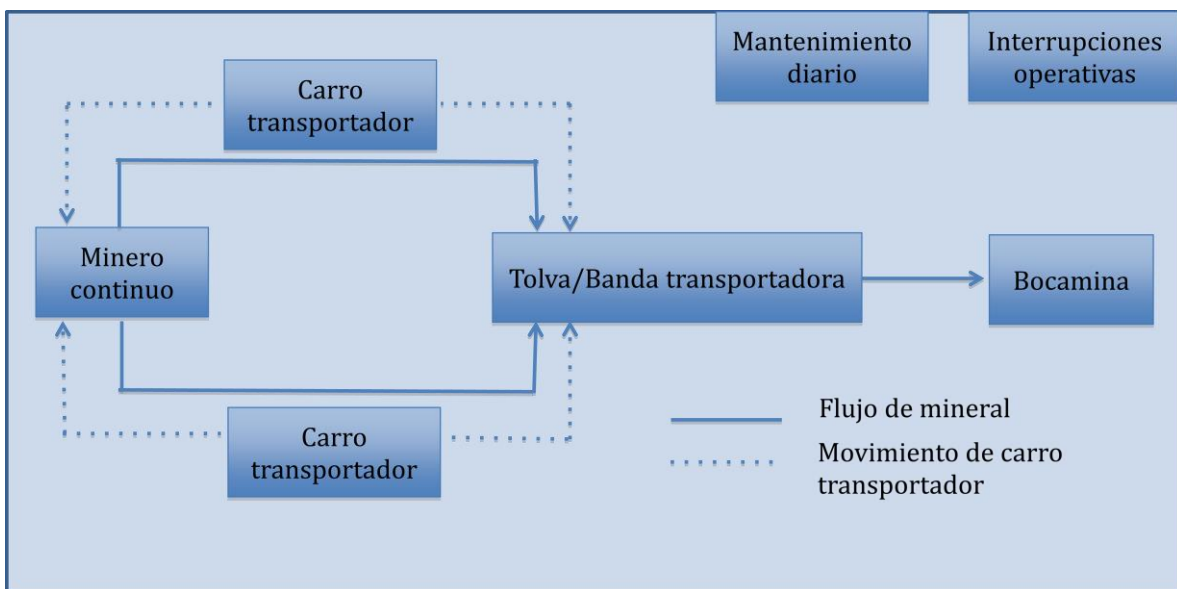
Fuente: Elaboración propia.

El *modelo conceptual* que se definió incluye los principales componentes del sistema de producción de la unidad minera. El objetivo es simular uno de los *frentes de trabajos* de la fase seleccionada, pero con características comunes de los frentes de trabajo pertenecientes a la fase 2, para que las propuestas se puedan analizar en un modelo que se pueda generalizar a todos los frentes del mismo tipo. La *conceptualización* de inicio puede observarse en la figura 4.1, donde se representa el flujo del mineral mediante una línea sólida, así también, se muestra el movimiento de los *carros transportadores* representado por una línea punteada.



Se validó el modelo conceptual, el cual se muestra en la figura 4.2. *Tolva y banda transportadora* son representados como un solo objeto, ya que las interrupciones de ambos se registran como si fueran iguales. Se añadieron dos fuentes más de interrupciones: *mantenimiento diario*, que puede tener actividades de mantenimiento en un equipo o más, pero que afecta a todo el sistema; *interrupciones operativas*, que no tiene influencia directa sobre algún equipo, pero igual afecta a todo el sistema, algunas de sus actividades son, por ejemplo, pláticas al personal, reparación del circuito de ventilación, entre otros.

Figura 4.2 Modelo conceptual mediante validación



Fuente: Elaboración propia.

Manejo de las bases de datos

De las bases de datos citadas se eligieron datos de los 3 meses de mayor variabilidad en 2012. Los datos más relevantes se recuperaron de dicha base, siendo estos los relacionados con las *interrupciones operativas*, las *interrupciones por mantenimiento diario* y con los equipos *minero continuo*, *carros transportadores* y *tolva/banda transportadora*. De los anteriores los relevantes fueron los tiempos por ocurrencia y el número de eventos por día, así como el comportamiento de la producción, por lo que los ritmos productivos diarios fueron también recuperados.



Información requerida para el modelo de simulación: datos

Para la creación del *modelo de simulación* se requirió de información, de entre la cual hay datos y supuestos. Estos permitieron que el modelo mantuviera un comportamiento similar al de la realidad, lo cual fue comprobado con la validación.

Los datos utilizados se enlistan, de acuerdo al objeto que los representa en el modelo de simulación.

Fuente

- Tiempo entre llegadas (constante)

Sistema

- Tiempo de procesamiento (constante)
- Lógica de confiabilidad
 - Tiempo entre fallas (distribución de probabilidad)
 - Tiempo para reparar (distribución de probabilidad)

Mantenimiento diario

- Tiempo de procesamiento (constante)
- Lógica de confiabilidad
 - Tiempo para reparar (distribución de probabilidad)

Minero

- Tiempo de procesamiento (constante)
- Lógica de confiabilidad
 - Tiempo entre fallas (distribución de probabilidad)
 - Tiempo para reparar (distribución de probabilidad)

Vehículos (carros transportadores)

- Lógica de confiabilidad



- Tiempo entre fallas (distribución de probabilidad)
- Tiempo para reparar (distribución de probabilidad)

Banda

- Lógica de confiabilidad
 - Tiempo entre fallas (distribución de probabilidad)
 - Tiempo para reparar (distribución de probabilidad)

Los datos fueron obtenidos con información de la mina. El tiempo entre llegadas y los tiempos de procesamiento fueron calculados con el tiempo disponible total y las toneladas producidas en los días considerados. El tiempo de procesamiento del *minero continuo* fue obtenido de una manera similar, pero haciendo uso del tiempo disponible del *minero continuo*, haciendo uso de StatFit para el ajuste de la distribución de probabilidad. Para los *tiempos entre fallas* se usaron la cantidad de interrupciones por día y para los *tiempos para reparar* se usaron los tiempos por interrupción. Para ambos datos se hizo uso de StatFit y de EasyFit para generar distribuciones que se ajustaran a los datos.

Información requerida para el modelo de simulación: suposiciones

En el sistema representado, también existen otras situaciones que interfieren con su comportamiento. Estas situaciones relevantes son incluidas en el modelo como suposiciones, así como otra información que no pudo ser incluida como información ya que no se adaptaba a la forma de entrada del software. Las suposiciones más importantes se enlistan a continuación.

Modelo en general

- Sistema y MD (mantenimiento diario, en el modelo) no son entidades físicas, se les considera debido a la relevancia de su *lógica de confiabilidad* (interrupciones).
- Sistema y MD (mantenimiento diario, en el modelo) usan como *tiempo de procesamiento* el *tiempo entre llegadas* de la fuente. Debido a su naturaleza, donde no



hay diferencia en el procesamiento y para evitar acumulaciones exageradas de entidades en algún punto.

- Cada tonelada de mineral producida por la mina, es simulada como una entidad en el modelo.

MD (mantenimiento diario)

- El *tiempo entre fallas* es constante, de 23 horas. Esto para representar que cada día ocurre 1 interrupción.

Vehículos

- Se usa una *capacidad de carga* de 11 toneladas, la cual corresponde a la capacidad máxima de carga de los vehículos.
- El *tiempo de descarga* utilizado se asume constante de 0.01 minutos.
- La velocidad de los vehículos es la misma con carga o sin carga.
- Los vehículos son cargados a su capacidad máxima y se descargan totalmente en tolva.
- Los vehículos tienen diferentes puntos de origen, lo cual permite que sigan rutas diferentes. Ambos descargan en el mismo punto.

Tolva

- El *tiempo de procesamiento* se asume de 0.1 minutos.

Banda transportadora

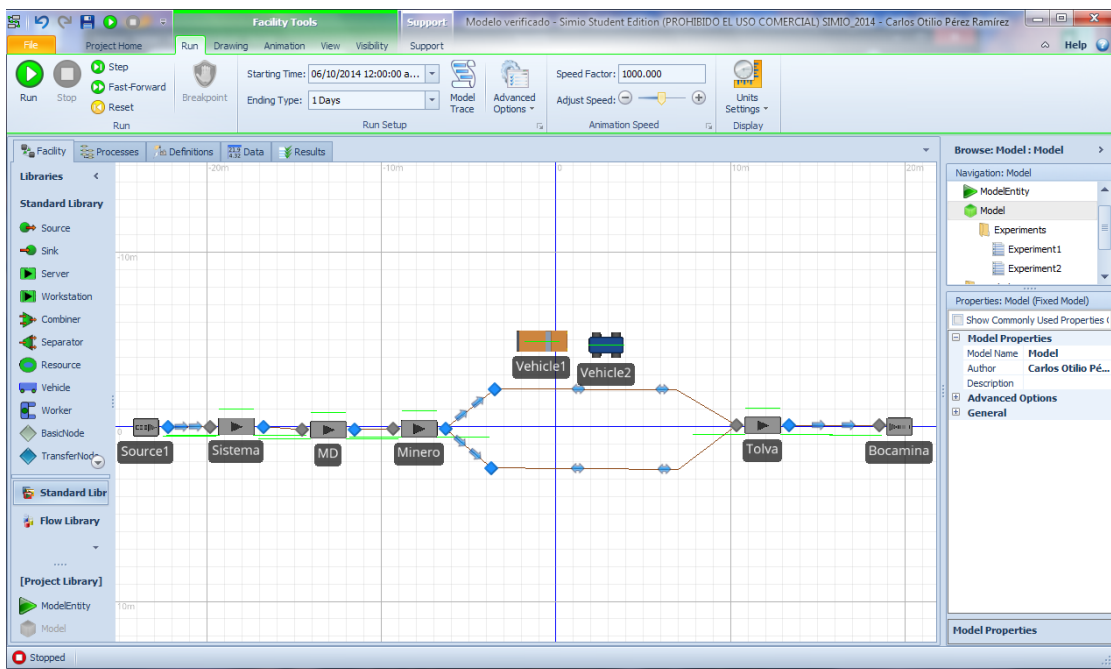
- Se usa una velocidad de 5 metros por segundo, la cual fue estimada mediante observación.
- El largo utilizado es de 2000 metros. Esta es la distancia máxima entre tramos de *banda transportadora* y fue utilizada por simplicidad. La distancia puede llegar a ser de hasta 7000 metros dependiendo de la ubicación de la fuente.
- La velocidad de la banda es la misma con carga o sin carga.



Modelo programado

Se desarrolló el modelo de computadora en Simio. “Simio es un software de modelización, simulación y animación 3D de flujos de procesos por eventos discretos, basado en un enfoque mixto objetos-procedimientos (<http://www.simio-simulacion.es/>).”

Figura 4.3 Modelo en SIMIO



Fuente: Elaboración propia mediante captura de pantalla del modelo en SIMIO.

El modelo desarrollado varía visualmente de la idea conceptualizada ya que los modelos requieren de una fuente (source) y un sumidero (sink, renombrado Bocamina), además por las *lógicas de las interrupciones*, que se requiere tenga el *modelo de simulación*, se tuvieron que agregar más servidores de lo esperado.

Source1: Es la fuente que alimenta de entidades al sistema. La entidades representan cada una a una tonelada métrica seca de mineral.

Sistema: Llamada así porque una interrupción de este servidor afecta a todo el sistema. Las interrupciones de la *lógica de confiabilidad* son las *operativas*.

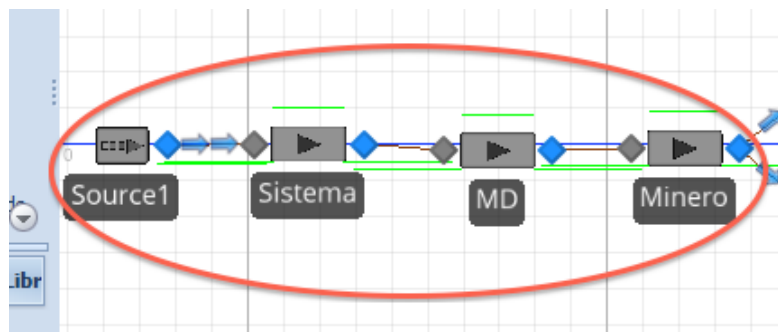


MD: Las interrupciones de la *lógica de confiabilidad* son las del *mantenimiento diario*.

La fuente y los dos servidores anteriores tienen un ritmo de creación/servicio de entidades igual y constante, ya que no es su finalidad representar alguna variación en dichas actividades.

Conceptualmente se puede considerar que tanto la fuente como los dos servidores son parte del *minero continuo*, ya que físicamente no existen.

Figura 4.4 Conjunto de fuente/servidores que representan al *minero continuo* físico



Fuente: Elaboración propia mediante captura de pantalla del modelo en SIMIO.

Minero: Representa al *minero continuo*, tiene un tiempo de servicio que simula ser la extracción del mineral y una *lógica de confiabilidad* relacionada a sus interrupciones.

Vehicle1/Vehicle2: Ambos vehículos representan a los *carros transportadores* y su *lógica de confiabilidad* a sus interrupciones. Ambos tienen una capacidad de 11 toneladas y cada uno sigue su propia trayectoria. Vehicle1 representa al *carro transportador* derecho y Vehicle2 al *carro transportador* izquierdo.

Tolva: Tiene un ritmo de descarga propio.



Banda: Representa al sistema de *bandas transportadoras* y su *lógica de confiabilidad* está relacionada a las interrupciones de las bandas y también a las de la tolva, esto debido a la forma en que es capturada la información.

Bocamina: Es un sumidero que representa la salida de la mina. En el modelo de simulación, es donde se destruyen las entidades (toneladas).

Las variables de entrada del modelo se pueden ver en la tabla 4.1 y 4.2. En la tabla 4.1 se muestra el ritmo de producción para el *minero continuo*. En la tabla 4.2 se presenta el *tiempo para las interrupciones* y el *tiempo entre interrupciones*.

Tabla 4.1 Ritmo de producción del modelo programado

Objeto	Equipo	Ritmo de producción (minutos)
Minero	Minero continuo	Distribución triangular Mínimo: 0.1122 Moda: 0.2246 Máximo: 0.5277

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 4.2 Duración de las interrupciones en el modelo programado

Objeto	Tipo interrupción	Duración de la interrupción (horas)	Tiempo entre interrupciones (horas)
Sistema	Operativa	Distribución triangular Mínimo: 0.0791 Moda: 0.0796 Máximo: 21.6077	Distribución triangular Mínimo: 0.0209 Moda: 0.0239 Máximo: 0.029
MD	Mantenimiento diario	Distribución lognormal Media: -0.4746 Desviación estándar: 0.2767	23
Minero	Minero continuo	Distribución uniforme Mínimo: 0.1635 Máximo: 5.08	Distribución uniforme Mínimo: 0.0411 Máximo: 0.0985
Vehicle1	Carro transportador derecho	Distribución triangular Mínimo: 0.2016 Moda: 0.2018 Máximo: 7.7739	Distribución uniforme Mínimo: 0.145 Máximo: 0.58
Vehicle 2	Carro transportador izquierdo	Distribución uniforme Mínimo: 0.0243 Máximo: 4.5	Distribución triangular Mínimo: 0.1399 Moda: 0.3605 Máximo: 0.8221
Banda	Banda transportadora	Distribución triangular Mínimo: 0.1979 Moda: 0.1986 Máximo: 7.891	Distribución uniforme Mínimo: 0.257 Máximo: 0.772

Fuente: Elaboración propia.

Las tablas 4.1 y 4.2, correspondientes a las variables de entrada, son presentadas para mostrar el carácter estocástico del comportamiento de las interrupciones, así como para dejar un precedente para trabajos futuros que se pudieran realizar.



Verificación

El modelo se verificó ejecutándolo varias veces para comprobar que la *fuentes*, los *servidores*, los *transportes*, la *banda* y el *sumidero* se estuvieran comportando de acuerdo a lo conceptualizado.

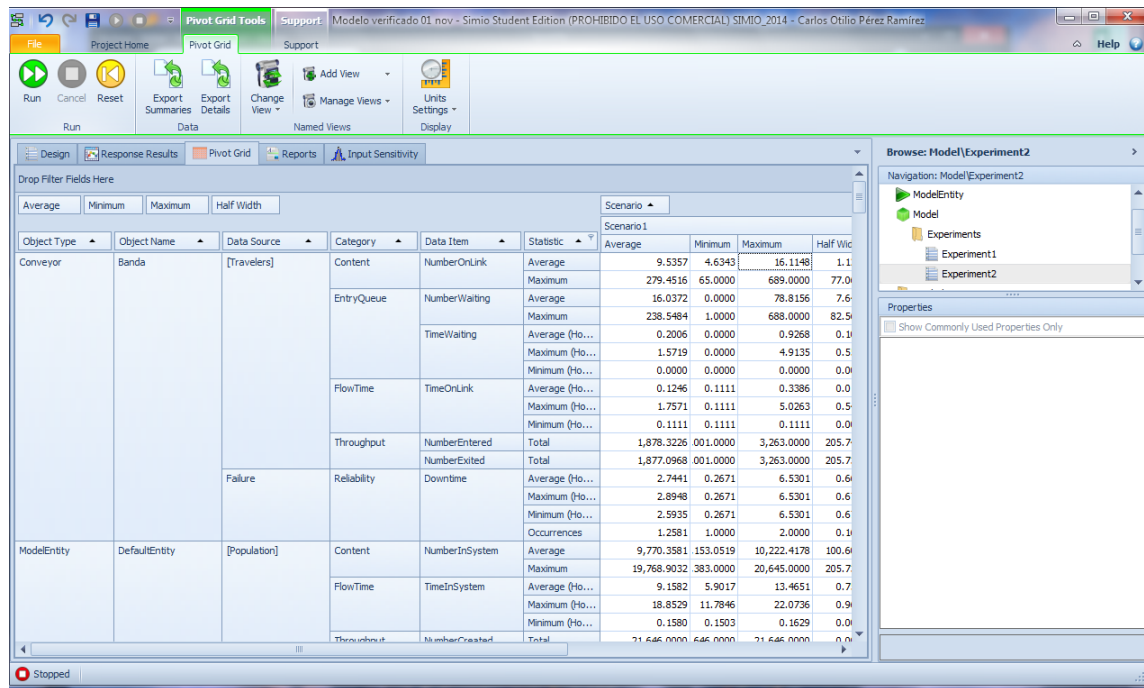
La verificación se realizó de manera visual y con números. Para lo visual se corrió el modelo y se observó el comportamiento para ver que no hubiera problemas. Varias modificaciones se realizaron al modelo, principalmente a la lógica de los *carros transportadores*. La verificación numérica se realizó con ayuda de la utilidad de *diseño de experimentos* de Simio, gracias a la cual se pudieron realizar varias réplicas del modelo de manera bastante rápida.

Se diseñó un escenario de largo de corrida de 1 día y 31 réplicas, lo que equivale a 1 mes sin días de descanso. Este diseño se pensó así para poder ser utilizado en la validación. Pero también se usaron diseños de 6 días y 10 réplicas, para simular semanas enteras completas de 1 día de descanso.

Los resultados de las corridas podían observarse en la pestaña PivotGrid, y de ahí los datos se pasaron a formato Excel, en forma de resumen o con los resultados de cada réplica. Para la verificación del modelo, el resumen de datos resultó ser de bastante utilidad.



Figura 4.5 PivotGrid en Simio



Fuente: Elaboración propia mediante captura de pantalla del modelo en SIMIO.

Los resultados de la última verificación pueden observarse en la siguiente imagen.

Tabla 4.3 Tabla de ayuda para la verificación del modelo

Comportamiento de medias	Comportamiento de medias				Ocurrencias (semanal)		Ocurrencias (diario)		Tiempo Total	
	Original	Simulado	Diferencia	Del original	Original	Simulado	Original	Simulado	Original	Simulado
Producción	1701.76081	1845.06667	143.305853	8%						
MC	2.5415	2.47813794	-0.0633621	-2%	8.74375	1.88333333	1.45729167	0.31388889	13.26	14.8688277
SCH D	2.14375	2.73791026	0.59416026	28%	12.8625	1.81666667	2.14375	0.30277778	11.1847826	16.4274616
SCH I	1.95625	2.03829379	0.08204379	4%	11.7375	1.66666667	1.95625	0.27777778	10.2065217	12.2297628
Operativo	6.68191413	6.60430418	-0.0776099	-1%	58.923913	18.38	9.82065217	3.06333333	40.0914848	39.6258251
Banda	2.94102273	2.56714549	-0.3738772	-13%	9.56022727	1.25	1.59337121	0.20833333	16.878913	15.4028729
M Diario	0.48891304	0.63942302	0.15050998	31%	6	1	1	0.16666667	2.93347826	3.83653814

Fuente: Elaboración propia.

Hay que recordar que la simulación es una aproximación del sistema real, por lo que en la verificación se buscaba que hubiera un parecido con los datos originales. Sin embargo, el proceso que conlleva permite conocer mejor al modelo y saber si le hace falta algo, o si algo está mal relacionado. En este caso uno de los problemas que ocasionaba que el modelador no se atreviera a dar por verificado el modelo era que se habían dejado los vehículos con capacidad de carga de 1 entidad, un error de dedo o algún olvido



probablemente, ya que la capacidad requerida es de 11 entidades, la cual representa el máximo de capacidad de los *carros transportadores*, y en cada viaje se usa por completo la capacidad de los vehículos.

Validación

De acuerdo a la prueba, basada en la t pareada, si en el rango resultante no está incluido el 0, entonces las diferencias entre medias se dice que son estadísticamente significativas. Las pruebas t pareadas realizadas para este modelo de simulación muestran que la diferencia entre las medias no es estadísticamente significativa, ya que todos los rangos incluyen al 0.

Las tablas completas con la información de los datos para validación se pueden encontrar en el anexo C.

Validación de las toneladas métricas secas diarias para un *frente de trabajo*

$\bar{W}(31)$	43.97
$\widehat{Var}[\bar{W}(31)]$	13051.7957
$t_{30,0.95}$	2.04227245
$t_{30,0.95}\sqrt{\widehat{Var}[\bar{W}(31)]}$	233.318305

Mínimo	Máximo
-189.35	277.29

Como el intervalo contiene a 0, la diferencia observada entre μ_X y μ_Y no es estadísticamente significativa.



Validación del tiempo por interrupciones diario en el *minero continuo*

$\bar{W}(31)$	-3.66		
$\widehat{Var}[\bar{W}(31)]$	40.25459162		
$t_{30,0.95}$	1.697260887		
$t_{30,0.95}\sqrt{\widehat{Var}[\bar{W}(31)]}$	10.76852735		
	Mínimo	Máximo	
	-14.42	7.11	

Como el intervalo contiene a 0, la diferencia observada entre μ_X y μ_Y no es estadísticamente significativa.

Validación del tiempo por interrupciones diario en el *carro transportador derecho*

$\bar{W}(31)$	-3.05		
$\widehat{Var}[\bar{W}(31)]$	38.97528526		
$t_{30,0.95}$	1.697260887		
$t_{30,0.95}\sqrt{\widehat{Var}[\bar{W}(31)]}$	10.59603183		
	Mínimo	Máximo	
	-13.65	7.54	

Como el intervalo contiene a 0, la diferencia observada entre μ_X y μ_Y no es estadísticamente significativa.



Validación del tiempo por interrupciones diario en el *carro transportador* izquierdo

$\bar{W}(31)$	-2.29		
$\widehat{Var}[\bar{W}(31)]$	37.07630142		
$t_{30,0.95}$	1.697260887		
$t_{30,0.95}\sqrt{\widehat{Var}[\bar{W}(31)]}$	10.33467456		
	Mínimo	Máximo	
	-12.63	8.04	

Como el intervalo contiene a 0, la diferencia observada entre μ_X y μ_Y no es estadísticamente significativa.

Validación del tiempo por interrupciones diario del tipo *operativas*

$\bar{W}(31)$	2.16		
$\widehat{Var}[\bar{W}(31)]$	28.0427866		
$t_{30,0.95}$	1.697260887		
$t_{30,0.95}\sqrt{\widehat{Var}[\bar{W}(31)]}$	8.987919759		
	Mínimo	Máximo	
	-6.83	11.15	

Como el intervalo contiene a 0, la diferencia observada entre μ_X y μ_Y no es estadísticamente significativa.



Validación del tiempo por interrupciones diario en *bandas transportadoras*

$\bar{W}(31)$	-3.21		
$\widehat{Var}[\bar{W}(31)]$	39.16		
$t_{30,0.95}$	1.70		
$t_{30,0.95}\sqrt{\widehat{Var}[\bar{W}(31)]}$	10.62		
	Mínimo	Máximo	
	-13.83	7.41	

Como el intervalo contiene a 0, la diferencia observada entre μ_X y μ_Y no es estadísticamente significativa.

Validación del tiempo por interrupciones diario en el *mantenimiento diario*

$\bar{W}(31)$	-0.47		
$\widehat{Var}[\bar{W}(31)]$	33.02		
$t_{30,0.95}$	1.70		
$t_{30,0.95}\sqrt{\widehat{Var}[\bar{W}(31)]}$	9.75		
	Mínimo	Máximo	
	-10.23	9.28	

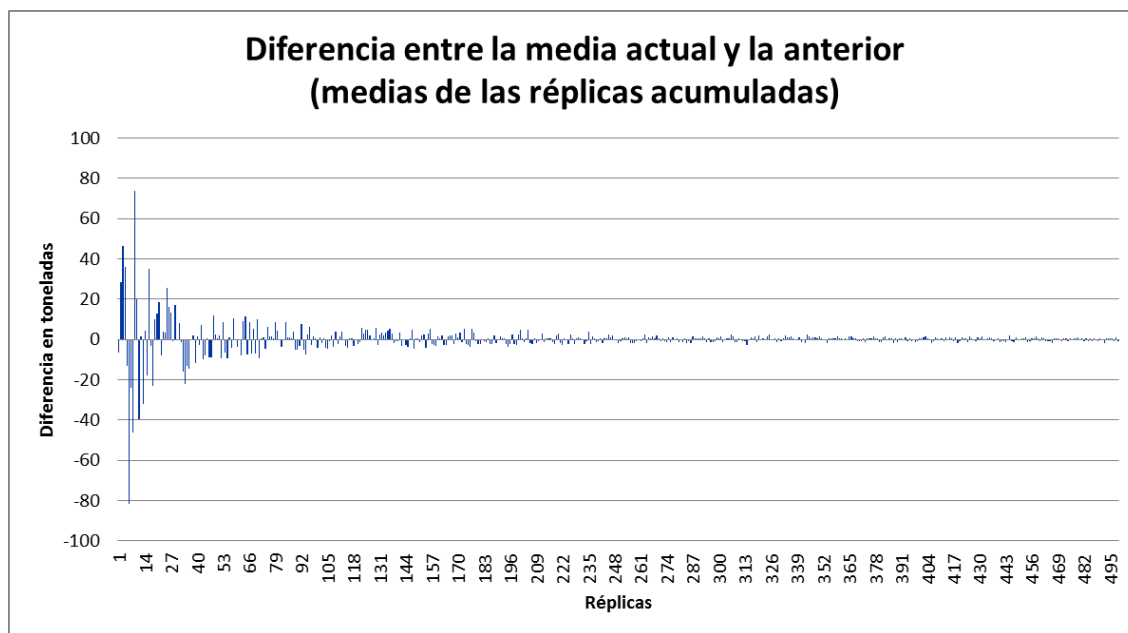
Como el intervalo contiene a 0, la diferencia observada entre μ_X y μ_Y no es estadísticamente significativa.



Número de réplicas

Se realizaron 500 réplicas para conocer cuántas se debían realizar para la evaluación de los 5 escenarios. Se buscaba que la media (toneladas) se fuera estabilizando, para esto se observó que la diferencia, entre la media de las réplicas actuales y el conjunto de réplicas anterior, fuera pequeña. Se eligieron 100 réplicas, ya que, como se puede ver en la gráfica 4.3, a las 100 réplicas comienza a estabilizarse la respuesta del modelo. Y como se puede ver en la gráfica 4.4, el rango de variación de las medias ha disminuido respecto a cantidad de réplicas menores, dicho comportamiento se repite por al menos las siguientes 100 réplicas. Por lo anterior, y debido a que al aumentar el número de réplicas se usan mayor capacidad de cómputo (el tiempo de cómputo aumenta y los recursos de la computadora funcionan de manera menos eficiente), se decidió realizar 100 réplicas para el modelo original y sus escenarios. Para 100 réplicas se tiene una desviación estándar relativa (coeficiente de variación) de 0.2552, como referencia, para 500 réplicas, la desviación estándar relativa es de 0.2549.

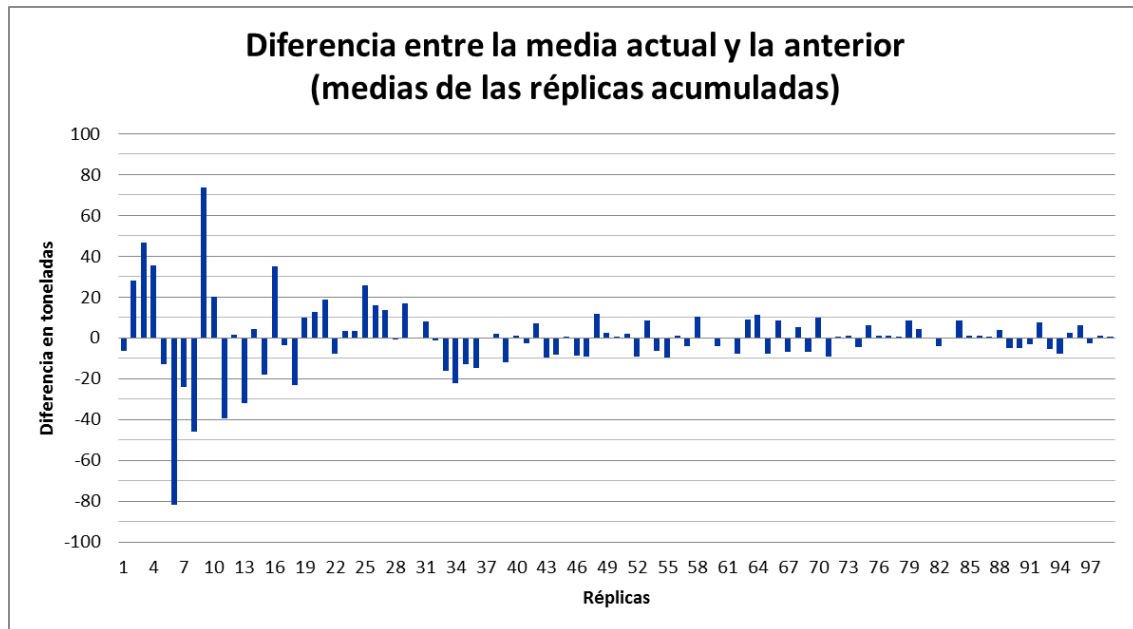
Gráfica 4.3 Diferencia entre la media acumulada de la réplica actual y la anterior (para 500 réplicas)



Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.4 Diferencia entre la media acumulada de la réplica actual y la anterior (para 100 réplicas)



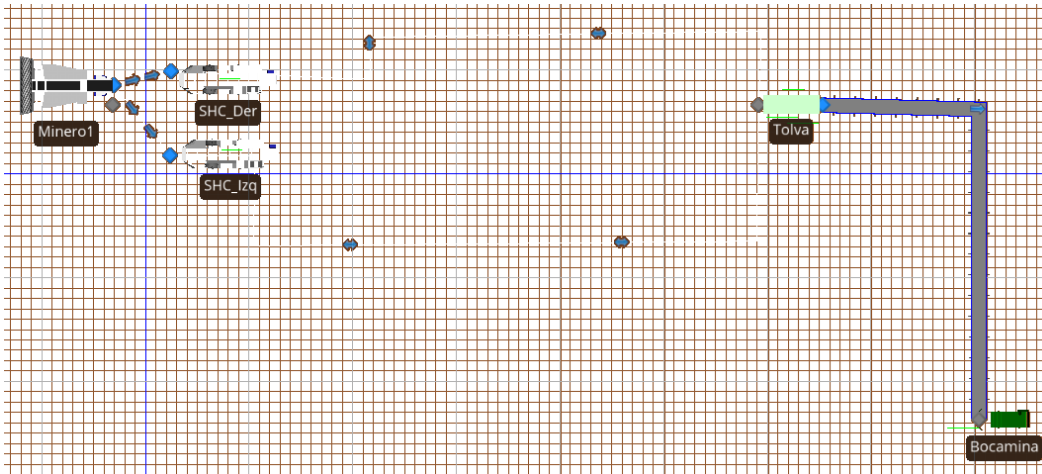
Fuente: Elaboración propia.

Presentación gráfica de las condiciones físicas del modelo

Para la comprensión del sistema modelado sobre el cual las propuestas se midieron, se presentan a continuación imágenes de un modelo programado el cual tiene la finalidad únicamente de mostrar físicamente la distribución y funcionamiento de dicho sistema.

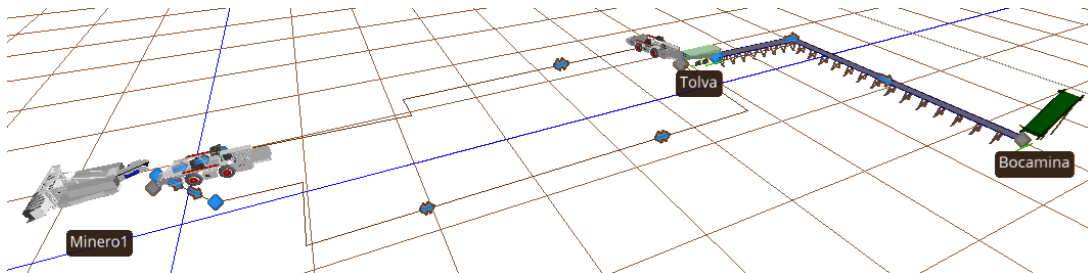


Figura 4.6 Plano del sistema simulado en 2D



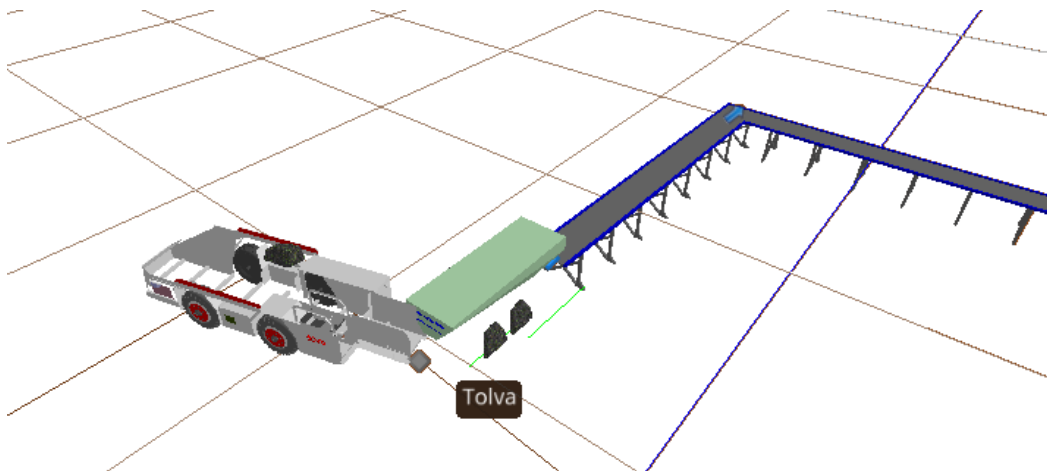
Fuente: Elaboración propia mediante captura de pantalla del modelo en SIMIO.

Figura 4.7 Plano del sistema simulado en 3D



Fuente: Elaboración propia mediante captura de pantalla del modelo en SIMIO.

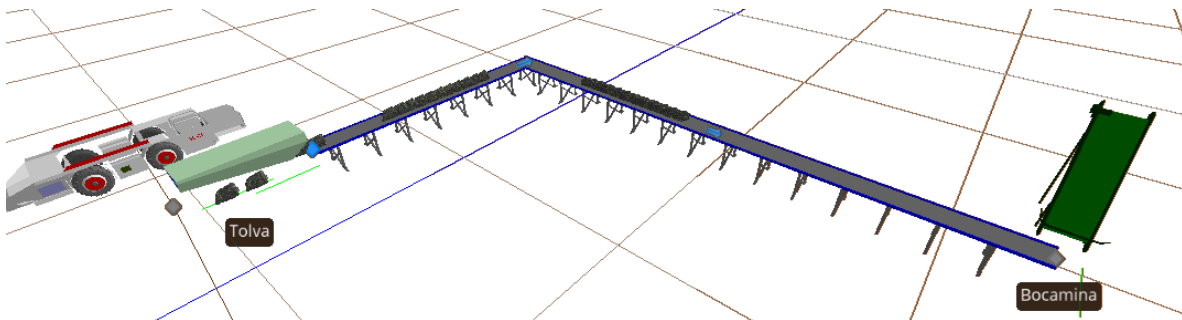
Figura 4.8 Descarga en tolva en modelo 3D



Fuente: Elaboración propia mediante captura de pantalla del modelo en SIMIO.

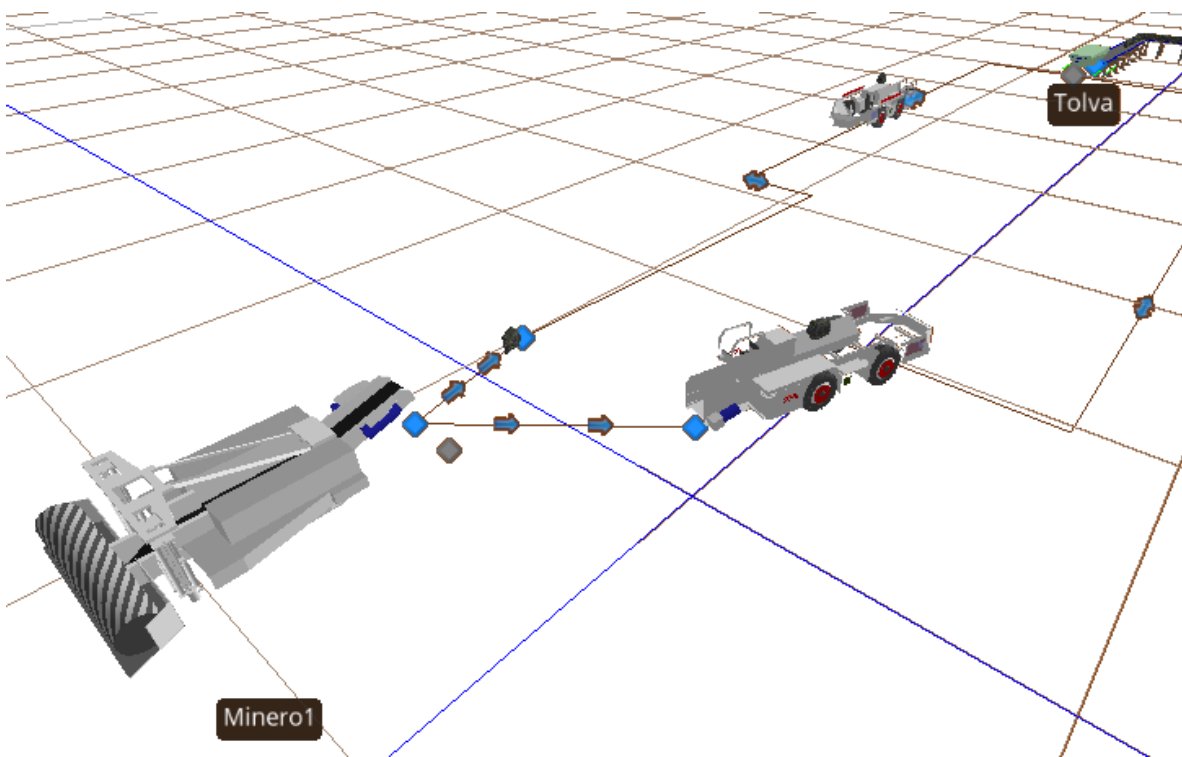


Figura 4.9 Banda transportadora en funcionamiento en modelo 3D



Fuente: Elaboración propia mediante captura de pantalla del modelo en SIMIO.

Figura 4.10 Minero Continuo y Carros Transportadores en modelo 3D



Fuente: Elaboración propia mediante captura de pantalla del modelo en SIMIO.



4.3 Estrategias de inventarios propuestas

Para el periodo de análisis se generaron estrategias de *inventarios* que corresponden al 25% de las interrupciones en el *minero continuo*. Las cuáles son las 13 interrupciones de mayor tiempo y que corresponden al tiempo acumulado de 73%, cuya información se puede encontrar en el anexo A y la gráfica correspondiente en el capítulo 1, en la página 14. Durante el periodo que se analiza, únicamente “Falla en Levante de cabezal (MC)” no tiene alguna adquisición por lo que no hay entrada del material a inventarios, por esto dicha interrupción no es considerada en las propuestas.

Las estrategias que se desarrollaron con la información disponible se presentan a continuación.

Tabla 4.11 Interrupciones a la operación y sus correspondientes refacciones

Interrupción	Refacción
Falla en cadena de conveyor (MC)	CONVEYOR CHAIN UNIT CIN DA-5502-LM P/N 2
Falla en Levante de cabezal (MC)	CUTTER HEAD CYLINDER P/N 392106-SR P/MIN
Falla en pala (MC)	CYLINDER STABILIZER SHOE (SPECIAL) P/N 3
Cambio de motores de tracción (MC)	TRAM MOTOR P/N 297607-SR TRAM MOTOR 297607-SR
Cambio de motores de corte (MC)	MTR CUTTER 950V 60 HZ 250 HP WITH RTD P/ CONDUIT HOSE P/N 301624 P/MINERO
Fuga de aceite hidráulico en el sistema (MC)	CONTINU
Falla en contactor de vacío de motor de sist. Hidráulico (MC)	CONTACTOR VACUUM 160 AMP CONVEYOR MOTOR
Drive dañado	DC DRIVE P/N 372752 (MOD 1210244 MCA RMS
Falla del estabilizador (MC)	PIN STAB LIFT No 82946029 P/N 290340 P/M STAB SEAL KIT P/N 605537 P/MINERO CONTIN
Falla en swing de conveyor (MC)	CYLINDER CONVEYOR SWING (SPECIAL) P/N 39
Daño en orugas de tracción (MC)	TRACK BELT ASSY P/N 397941 P/MINERO CONT PIN SWING No 82600248 P/N 314372 P/MINER
Portapica fisurado (MC)	HOLDER BIT ASSY J30 P/N 292449 (PORTA PI
Falla en sistema de levante del conveyor (MC)	CYLINDER CONVEYOR LIFT

Fuente: Elaboración propia.



Datos para el modelo de inventarios

Los datos para el estudio de inventarios fueron recolectados por el autor en archivos de la propia empresa. Las fuentes fueron reportes de compras obtenidos del sistema de planificación de recursos empresariales (ERP) usado por la empresa, el reporte de interrupciones del departamento de *operaciones mineras*, así también con reportes de manejo y asignación de recursos.

Los datos requeridos se enlistan a continuación.

- Demanda por año en unidades (D)
- Varianza de la demanda anual ($\text{var}D$)
- Costo de preparación en USD (K)
- Costo unitario por mantener en USD (h)
- Tiempo de entrega en años (L)
- Desviación del tiempo de entrega ($\text{desv}(L)$)
- Costo por faltante en USD (p)
- Precio unitario de la refacción en USD

La demanda fue obtenida del registro de compras. Para obtener la varianza se analizaron los requerimientos en el registro de interrupciones, dicha información se obtuvo con el software EasyFit, las distribuciones de la demanda para 3 refacciones es beta, para el resto, la distribución normal se ajusta mejor.

Los costos y precios fueron obtenidos principalmente del registro de compras y de reporte de asignación y manejo de recursos. El costo de preparación se calculó con información de pagos al transportista o, en su caso, de cobros directos del proveedor asociados al transporte. El costo por mantener fue obtenido usando el valor de la mercancía y su porcentaje correspondiente de insumo, considerando gastos asociados para su almacenamiento. Como costo por faltante se consideró el no producir por no existencia, o



en el caso de que hay otra opción a más alto costo se consideraba la diferencia como costo por faltante.

El precio unitario de la refacción se obtuvo de los reportes de compras, usando el precio más actual.

La información de la demanda se puede encontrar en el anexo D y los datos de los tiempos de entrega se encuentra en el anexo E.

Resultados del modelo de inventarios

Los resultados para el modelo de *inventarios* se obtuvieron en Excel, y a continuación se presentan tablas de los resultados.

Tabla 4.12 Modelo (r, q) para conveyor chain
CONVEYOR CHAIN UNIT CIN DA-5502-LM P/N 2

	Proveedor 3	Proveedor 1	
D =	17	17	(demanda por año)
K =	\$ 1,769.83	\$ 1,088.60	(costo de preparación)
h =	\$ 3,962.65	\$ 5,687.23	(costo unitario por mantener)
L =	0.411858975	0.00123531	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 11,003.52	\$ 2,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$25,283.28	\$36,286.80	
q* =	3.90	2.55	(cantidad económica de pedido)
r =	22.15	0.27	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	15.14	0.25	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$75,454.81	\$15,908.29	(Costo Total Variable)

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 4.13 Modelo (r, q) para cylinder cutter
CYLINDER CUTTER HEAD P/N 392106 P/MINERO

	Proveedor 1	Proveedor 2	
D =	23	23	(demanda por año)
K =	\$310.74	\$ 630.49	(costo de preparación)
h =	\$ 2,196.37	\$1,909.89	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	0.411858975	(tiempo de entrega en años)
p =	\$2,508.02	\$1,351.04	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$10,357.98	\$9,006.94	
q* =	2.55	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	1.08	19.92	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	1.05	10.45	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$7,908.53	\$27,398.54	(Costo Total Variable)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.14 Modelo (r, q) para cylinder stabilizer shoe
CYLINDER STABILIZER SHOE (SPECIAL) P/N 3

	Proveedor 1	
D =	2	(demanda por año)
K =	\$51.96	(costo de preparación)
h =	\$31.93	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	(tiempo de entrega en años)
p =	\$2,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$1,731.90	
q* =	2.55	(cantidad económica de pedido)
r =	0.16	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	0.16	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$86.49	(Costo Total Variable)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.14 Modelo (r, q) para tram motor
TRAM MOTOR P/N 297607-SR

	Proveedor 1	Proveedor 2	
D =	23	23	(demanda por año)
K =	\$629.63	\$1,215.90	(costo de preparación)
h =	\$4,450.32	\$3,683.25	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	0.027243589	(tiempo de entrega en años)
p =	\$2,508.02	\$19,425.23	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$20,987.50	\$17,370.00	
q* =	2.55	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	0.72	7.66	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	0.69	7.03	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$14,431.12	\$40,243.97	(Costo Total Variable)

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 4.15 Modelo (r, q) para motor cutter
MTR CUTTER 950V 60 HZ 250 HP WITH RTD P/

Proveedor 1		
D =	5	(demanda por año)
K =	\$800.40	(costo de preparación)
h =	\$1,229.87	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	(tiempo de entrega en años)
p =	\$2,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$26,680.00	
q* =	2.55	(cantidad económica de pedido)
r =	0.13	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	0.12	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$3,284.41	(Costo Total Variable)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.16 Modelo (r, q) para conduit hose
CONDUIT HOSE P/N 301624 P/MINERO CONTINU

Proveedor 2		
D =	10	(demanda por año)
K =	\$10.34	(costo de preparación)
h =	\$13.62	(costo unitario por mantener)
L =	0.094551282	(tiempo de entrega en años)
p =	\$6,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$147.75	
q* =	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	10.64	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	9.69	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$185.09	(Costo Total Variable)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.17 Modelo (r, q) para contactor vacumm
CONTACTOR VACUMM 160 AMP CONVEYOR MOTOR

	Proveedor 1	Proveedor 2	
D =	8	8	(demanda por año)
K =	\$64.44	\$130.75	(costo de preparación)
h =	\$158.43	\$137.77	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	0.128205128	(tiempo de entrega en años)
p =	\$2,508.02	\$280.19	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$2,148.10	\$1,867.91	
q* =	2.55	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	0.60	3.06	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	0.59	2.03	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$496.88	\$816.51	(Costo Total Variable)

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 4.18 Modelo (r, q) para drive DC
DRIVE DC RMS 60 HZ P/N 372752-NEW P/MINE

Proveedor 4		
D =	20	(demanda por año)
K =	\$793.10	(costo de preparación)
h =	\$2,089.12	(costo unitario por mantener)
L =	0.08974359	(tiempo de entrega en años)
p =	\$4,000.00	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$11,330.00	
q* =	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	9.42	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	7.62	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$24,063.30	(Costo Total Variable)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.19 Modelo (r, q) para pin stab lift
PIN STAB LIFT No 82946029 P/N 290340 P/M

	Proveedor 1	Proveedor 2	
D =	28	28	(demanda por año)
K =	\$4.97	\$10.03	(costo de preparación)
h =	\$42.80	\$36.99	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	0.091346154	(tiempo de entrega en años)
p =	\$2,508.02	\$22.49	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$165.78	\$143.29	
q* =	2.55	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	2.96	8.84	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	2.92	6.29	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$234.23	\$376.64	(Costo Total Variable)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.20 Modelo (r, q) para stab seal kit
STAB SEAL KIT P/N 605537 P/MINERO CONTIN

Proveedor 1		
D =	8	(demanda por año)
K =	\$9.42	(costo de preparación)
h =	\$23.17	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	(tiempo de entrega en años)
p =	\$2,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$314.16	
q* =	2.55	(cantidad económica de pedido)
r =	0.79	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	0.78	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$77.23	(Costo Total Variable)

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 4.21 Modelo (r, q) para pin swing
PIN SWING No 82600248 P/N 314372 P/MINER

Proveedor 2		
D =	28	(demanda por año)
K =	\$6.47	(costo de preparación)
h =	\$23.87	(costo unitario por mantener)
L =	0.099358974	(tiempo de entrega en años)
p =	\$6,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$92.48	
q* =	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	31.78	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	29.00	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$785.24	(Costo Total Variable)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.22 Modelo (r, q) para track belt assy
TRACK BELT ASSY P/N 397941 P/MINERO CONT

	Proveedor 1	Proveedor 2	
D =	4	4	(demanda por año)
K =	\$760.05	\$1,542.13	(costo de preparación)
h =	\$934.29	\$812.43	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	0.057692308	(tiempo de entrega en años)
p =	\$2,508.02	\$3,304.56	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$25,334.96	\$22,030.40	
q* =	2.55	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	0.11	0.91	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	0.10	0.68	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$2,479.28	\$3,720.52	(Costo Total Variable)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.23 Modelo (r, q) para weldt rack belt
WELDT TRACK BELT P/N 392747 P/MINERO CON

Proveedor 1		
D =	4	(demanda por año)
K =	\$713.03	(costo de preparación)
h =	\$876.49	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	(tiempo de entrega en años)
p =	\$2,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$23,767.57	
q* =	2.55	(cantidad económica de pedido)
r =	0.11	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	0.11	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$2,331.99	(Costo Total Variable)

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 4.24 Modelo (r, q) para holder bit assy
HOLDER BIT ASSY J30 P/N 292449 (PORTA
PI

Proveedor 1		
D =	30	(demanda por año)
K =	\$17.88	(costo de preparación)
h =	\$164.83	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	(tiempo de entrega en años)
p =	\$2,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$595.94	
q* =	2.55	(cantidad económica de pedido)
r =	2.72	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	2.68	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$863.00	(Costo Total Variable)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.25 Modelo (r, q) para cylinder conveyor lift
CYLINDER CONVEYOR LIFT (SPECIAL) P/N 392

Proveedor 2		
D =	14	(demanda por año)
K =	\$475.31	(costo de preparación)
h =	\$876.42	(costo unitario por mantener)
L =	0.099358974	(tiempo de entrega en años)
p =	\$6,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$6,790.15	
q* =	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	9.25	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	7.86	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$10,304.12	(Costo Total Variable)

Fuente: Elaboración propia.

Las tablas anteriores presentan la información necesaria para los cálculos y sus resultados. Más información de la aplicación del modelo se puede encontrar en el anexo F.

La información acerca de los costos totales variables anuales se pueden encontrar de manera resumida en la siguiente tabla.

Como se puede ver, el proveedor 1, encargado de las compras emergentes es el que menor costo total variable tiene, debido a sus condiciones de tiempo de entrega, principalmente. Sin embargo, falta ver si el costo total, es decir el costo total variable más el costo de compra de las unidades en demanda, también le permite al proveedor 1 tener los mejores costos.



Tabla 4.26 Costo total variable anual para las refacciones por proveedor

COSTO TOTAL VARIABLE ANUAL				
REFACCIÓN	Proveedor 1	Proveedor 2	Proveedor 3	Proveedor 4
CONVEYOR CHAIN UNIT CIN DA-5502-LM P/N 2	\$ 15,908.29		\$ 75,454.81	
CYLINDER CUTTER HEAD P/N 392106 P/MINERO	\$ 7,908.53	\$ 27,398.54		
CYLINDER STABILIZER SHOE (SPECIAL) P/N 3	\$ 86.49			
TRAM MOTOR P/N 297607-SR	\$ 14,431.12	\$ 40,243.97		
MTR CUTTER 950V 60 HZ 250 HP WITH RTD P/	\$ 3,284.41			
CONDUIT HOSE P/N 301624 P/MINERO CONTINU		\$ 185.09		
CONTACTOR VACUMM 160 AMP CONVEYOR MOTOR	\$ 496.88	\$ 816.51		
DRIVE DC RMS 60 HZ P/N 372752-NEW P/MINE				\$ 24,063.30
PIN STAB LIFT NO 82946029 P/N 290340 P/M	\$ 234.23	\$ 376.64		
STAB SEAL KIT P/N 605537 P/MINERO CONTIN	\$ 77.23			
PIN SWING NO 82600248 P/N 314372 P/MINER		\$ 785.24		
TRACK BELT ASSY P/N 397941 P/MINERO CONT	\$ 2,479.28	\$ 3,720.52		
WELDT TRACK BELT P/N 392747 P/MINERO CON	\$ 2,331.99			
HOLDER BIT ASSY J30 P/N 292449 (PORTA PI	\$ 863.00			
CYLINDER CONVEYOR LIFT (SPECIAL) P/N 392		\$ 10,304.12		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.27 Costo total anual para las refacciones por proveedor

COSTO TOTAL ANUAL DEL INVENTARIO				
COSTO TOTAL ANUAL	Proveedor 1	Proveedor 2	Proveedor 3	Proveedor 4
CONVEYOR CHAIN UNIT CIN DA-5502-LM P/N 2	\$ 632,783.89	\$ -	\$ 505,270.57	\$ -
CYLINDER CUTTER HEAD P/N 392106 P/MINERO	\$ 246,142.07	\$ 234,558.16	\$ -	\$ -
CYLINDER STABILIZER SHOE (SPECIAL) P/N 3	\$ 3,550.29	\$ -	\$ -	\$ -
TRAM MOTOR P/N 297607-SR	\$ 497,143.62	\$ 439,753.97	\$ -	\$ -
MTR CUTTER 950V 60 HZ 250 HP WITH RTD P/	\$ 136,684.41	\$ -	\$ -	\$ -
CONDUIT HOSE P/N 301624 P/MINERO CONTINU	\$ -	\$ 1,662.59	\$ -	\$ -
CONTACTOR VACUMM 160 AMP CONVEYOR MOTOR	\$ 17,681.68	\$ 15,759.79	\$ -	\$ -
DRIVE DC RMS 60 HZ P/N 372752-NEW P/MINE	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 250,663.30
PIN STAB LIFT NO 82946029 P/N 290340 P/M	\$ 4,876.07	\$ 4,388.76	\$ -	\$ -
STAB SEAL KIT P/N 605537 P/MINERO CONTIN	\$ 2,590.51	\$ -	\$ -	\$ -
PIN SWING NO 82600248 P/N 314372 P/MINER	\$ -	\$ 3,374.68	\$ -	\$ -
TRACK BELT ASSY P/N 397941 P/MINERO CONT	\$ 103,819.12	\$ 91,842.12	\$ -	\$ -
WELDT TRACK BELT P/N 392747 P/MINERO CON	\$ 97,402.27	\$ -	\$ -	\$ -
HOLDER BIT ASSY J30 P/N 292449 (PORTA PI	\$ 18,741.20	\$ -	\$ -	\$ -
CYLINDER CONVEYOR LIFT (SPECIAL) P/N 392	\$ -	\$ 105,366.22	\$ -	\$ -

Aunque no todas las refacciones se pueden adquirir con el proveedor 1, se puede ver que no es la mejor opción, teniendo mejores precios el proveedor 2 y proveedor 3. Además la tabla 4.27 muestra de manera clara los costos de una *política de inventarios* que garantiza la disponibilidad de las refacciones consideradas.



4.4 Impacto de las estrategias de inventarios en las interrupciones

Gracias a la conjugación de las herramientas de la *teoría de inventarios* y la *simulación*, se presentan 4 propuestas (con base en opiniones, las cuales se pueden consultar en el anexo G) en las cuales los *inventarios* juegan un rol importante. A continuación se describen cada uno de ellos y las posibilidades de reducciones de tiempos.

Propuesta 1

Eliminar compras emergentes, es decir, de último momento cuya entrega se realiza el mismo día.

Eliminando este tipo de compras se pueden ahorrar 3 horas, equivalente al tiempo entre el requerimiento y la entrega en mina. Esta reducción afecta a las refacciones con compras de este tipo en interrupciones de 4 horas o más.

Tabla 4.26 Interrupciones afectadas por la propuesta 1

Propuesta 1: eliminar compras emergentes	
Interrupción	Compras emergentes (mismo día que se requiere)
Falla en cadena de conveyor (MC)	Si
Falla en Levante de cabezal (MC)	Si
Falla en pala (MC)	Si
Cambio de motores de tracción (MC)	Si
Cambio de motores de corte (MC)	Si
Fuga de aceite hidráulico en el sistema (MC)	No
Falla en contactor de vacío de motor de sist. Hidráulico (MC)	Si
Drive dañado	No
Falla del estabilizador (MC)	Si
Falla en swing de conveyor (MC)	No
Daño en orugas de tracción (MC)	Si
Portapica fisurado (MC)	Si
Falla en sistema de levante del conveyor (MC)	No

Fuente: Elaboración propia.

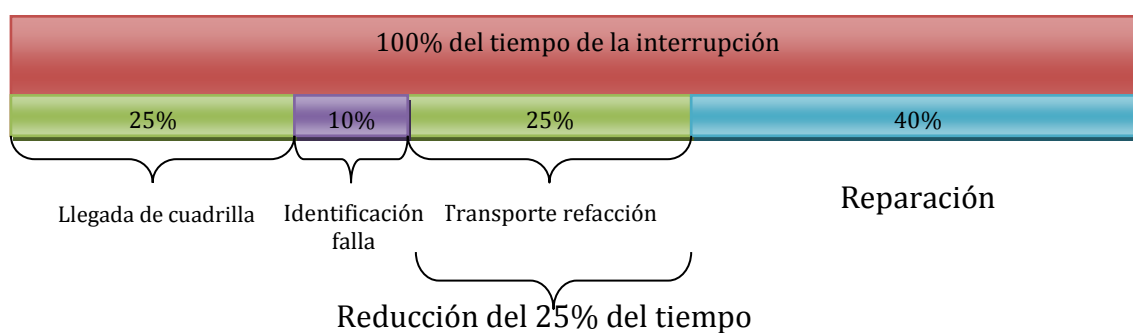


Propuesta 2

Tener la refacción cerca de la ubicación de uso.

Gracias a los inventarios controlados, se tienen las refacciones en el lugar adecuado en el momento adecuado, por lo cual se disminuye el tiempo correspondiente a la búsqueda de la refacción. Esto se traduce en una reducción de 25% del total de la interrupción, que afecta a las interrupciones de más de 30 minutos.

Figura 4.11 Reducción de la interrupción con la propuesta 2



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.27 Interrupciones afectadas por la propuesta 2

Propuesta 2: tener la refacción cerca de la ubicación de uso	
Interrupción	Almacenado a menos de 1000 metros de la ubicación de uso
Falla en cadena de conveyor (MC)	No
Falla en Levante de cabezal (MC)	No
Falla en pala (MC)	No
Cambio de motores de tracción (MC)	No
Cambio de motores de corte (MC)	No
Fuga de aceite hidráulico en el sistema (MC)	No
Falla en contactor de vacío de motor de sist. Hidráulico (MC)	No
Drive dañado	No
Falla del estabilizador (MC)	No
Falla en swing de conveyor (MC)	No
Daño en orugas de tracción (MC)	No
Portapica fisurado (MC)	No
Falla en sistema de levante del conveyor (MC)	No

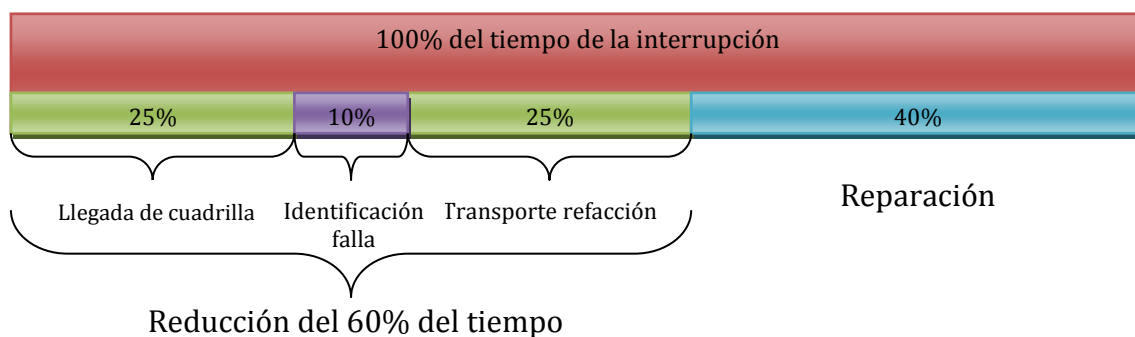
Fuente: Elaboración propia.



Propuesta 3

Tener la refacciones cerca del lugar de uso y programar las actividades de mantenimiento. Al haber refacciones disponibles se puede priorizar la atención y atender las interrupciones de una manera predictiva. Con lo anterior se programa la atención y se puede reducir el 60 por ciento del tiempo de las interrupciones mayores a 30 minutos.

Figura 4.12 Reducción de la interrupción con la propuesta 3



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.28 Interrupciones afectadas por la propuesta 2

Propuesta 3: tener la refacción cerca de la ubicación de uso programar interrupciones		
Interrupción	Almacenado a menos de 1000 metros de la ubicación de uso	Interrupciones programadas
Falla en cadena de conveyor (MC)	No	No
Falla en Levante de cabezal (MC)	No	No
Falla en pala (MC)	No	No
Cambio de motores de tracción (MC)	No	No
Cambio de motores de corte (MC)	No	No
Fuga de aceite hidráulico en el sistema (MC)	No	No
Falla en contactor de vacío de motor de sist. Hidráulico (MC)	No	No
Drive dañado	No	No
Falla del estabilizador (MC)	No	No
Falla en swing de conveyor (MC)	No	No
Daño en orugas de tracción (MC)	No	No
Portapica fisurado (MC)	No	No
Falla en sistema de levante del conveyor (MC)	No	No

Fuente: Elaboración propia.

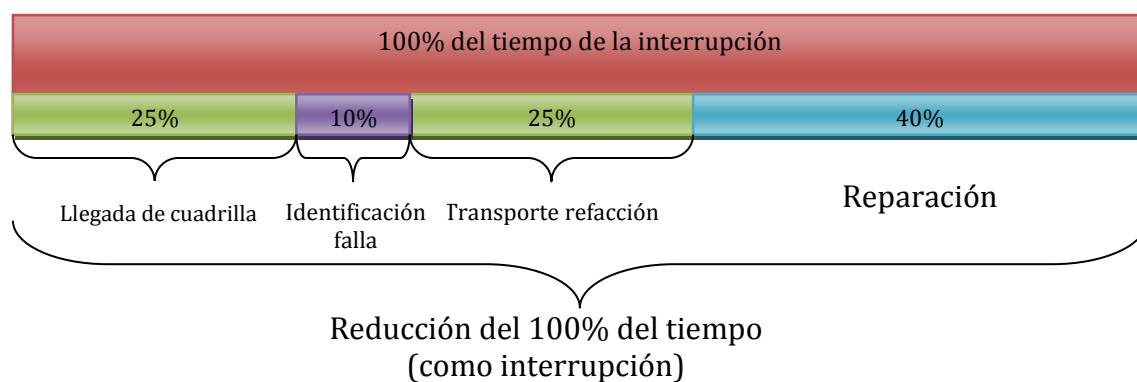


Propuesta 4

Pasar las actividades de las 13 interrupciones al mantenimiento semanal.

Las actividades realizadas durante estas interrupciones, pueden realizarse durante el servicio programado para mantenimiento. Con esto, el 100% de las interrupciones deja de afectar como interrupción y permite tener mayor tiempo operativo.

Figura 4.13 Reducción de la interrupción con la propuesta 4



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.29 Interrupciones afectadas por la propuesta 4

Propuesta 4: pasar actividades por interrupciones al mantenimiento semanal	
Interrupción	Actividad afecta como interrupción
Falla en cadena de conveyor (MC)	Si
Falla en Levante de cabezal (MC)	Si
Falla en pala (MC)	Si
Cambio de motores de tracción (MC)	Si
Cambio de motores de corte (MC)	Si
Fuga de aceite hidráulico en el sistema (MC)	Si
Falla en contactor de vacío de motor de sist. Hidráulico (MC)	Si
Drive dañado	Si
Falla del estabilizador (MC)	Si
Falla en swing de conveyor (MC)	Si
Daño en orugas de tracción (MC)	Si
Portapica fisurado (MC)	Si
Falla en sistema de levante del conveyor (MC)	Si

Fuente: Elaboración propia.



4.5 Medición del impacto de las propuestas

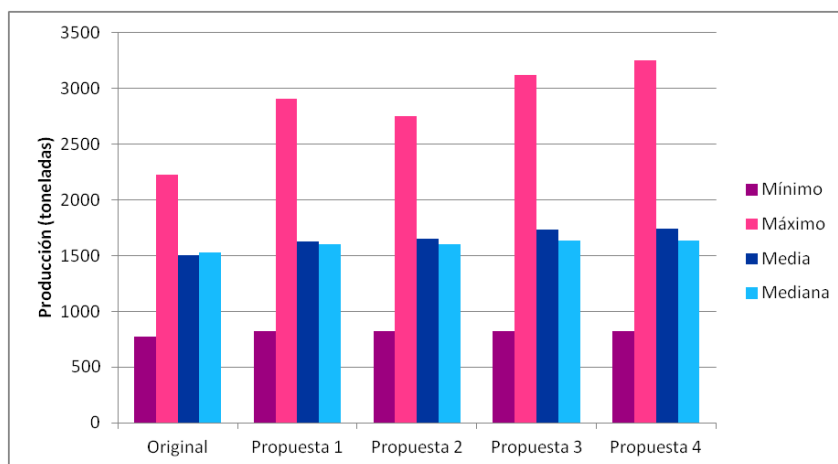
Con las cuatro propuestas presentadas y los datos originales, se tienen 5 escenarios. El factor de entrada a Simio, fue el tiempo de reparación del *minero continuo* y su respuesta, la media de producción de toneladas de mineral. Estos datos pueden verse en la tabla 4.30.

Tabla 4.30 Tiempos de reparación del minero continuo y media de producción resultante de 100 réplicas para los 5 escenarios

Escenario	Tiempo de reparación del minero continuo (horas)	Media de producción (toneladas métricas)
Original	Distribución uniforme Mínimo: 0.1635 Máximo: 5.08	1501.9
Propuesta 1	Distribución lognormal Media: -0.03606 Desviación estándar: 0.9638	1628.2
Propuesta 2	Distribución lognormal Media: -0.118 Desviación estándar: 0.9535	1653.75
Propuesta 3	Distribución lognormal Media: -0.3587 Desviación estándar: 0.8850	1730.75
Propuesta 4	Distribución lognormal Media: -2.309 Desviación estándar: 2.1306	1744.91

Fuente: Elaboración propia.

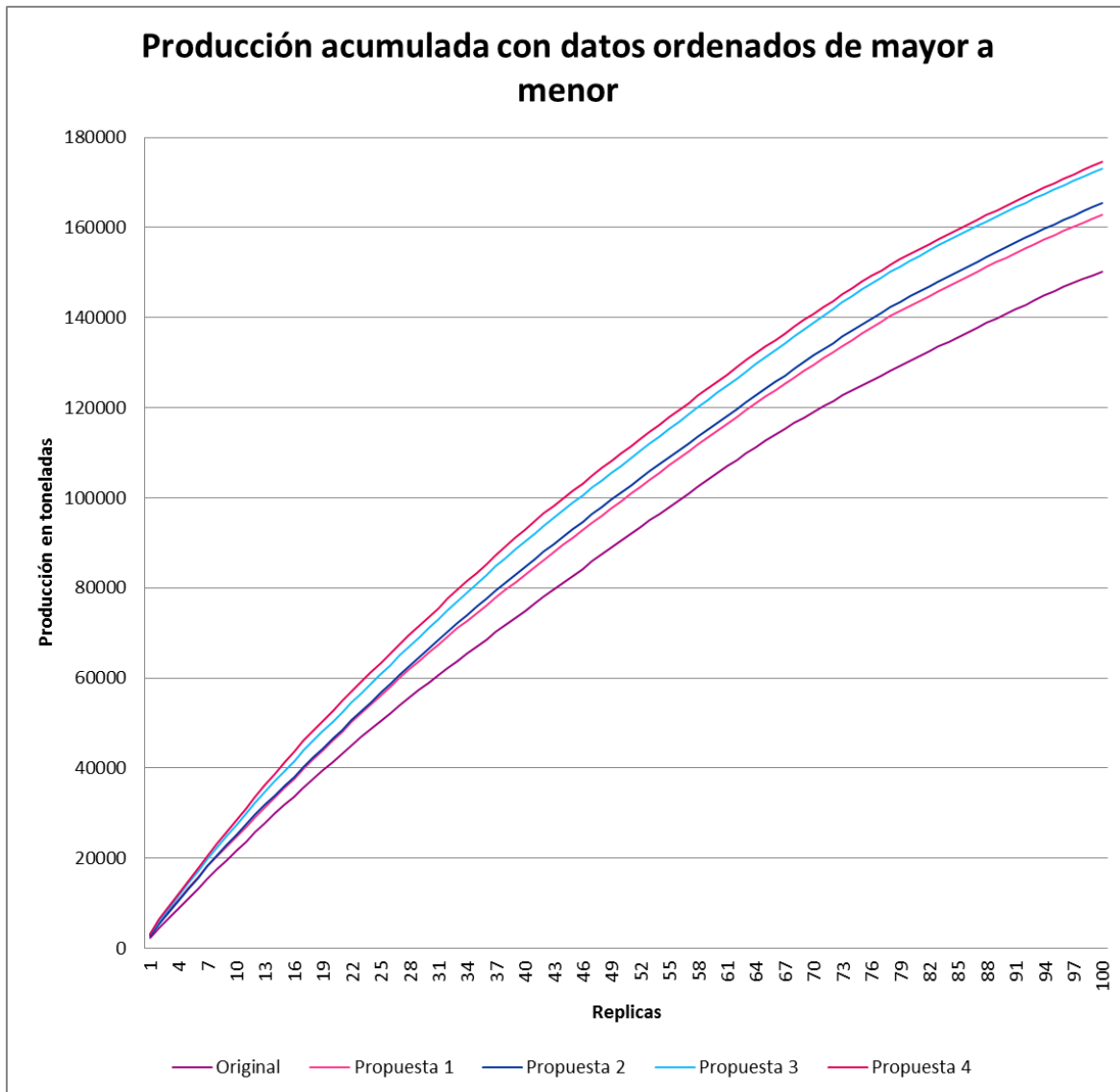
Gráfico 4.4 Mínimo, máximo, media y mediana resultante de 100 réplicas para los 5 escenarios



Fuente: Elaboración propia.



Gráfico 4.5 Producción acumulada en descendente para los resultados de los 5 escenarios después de 100 réplicas

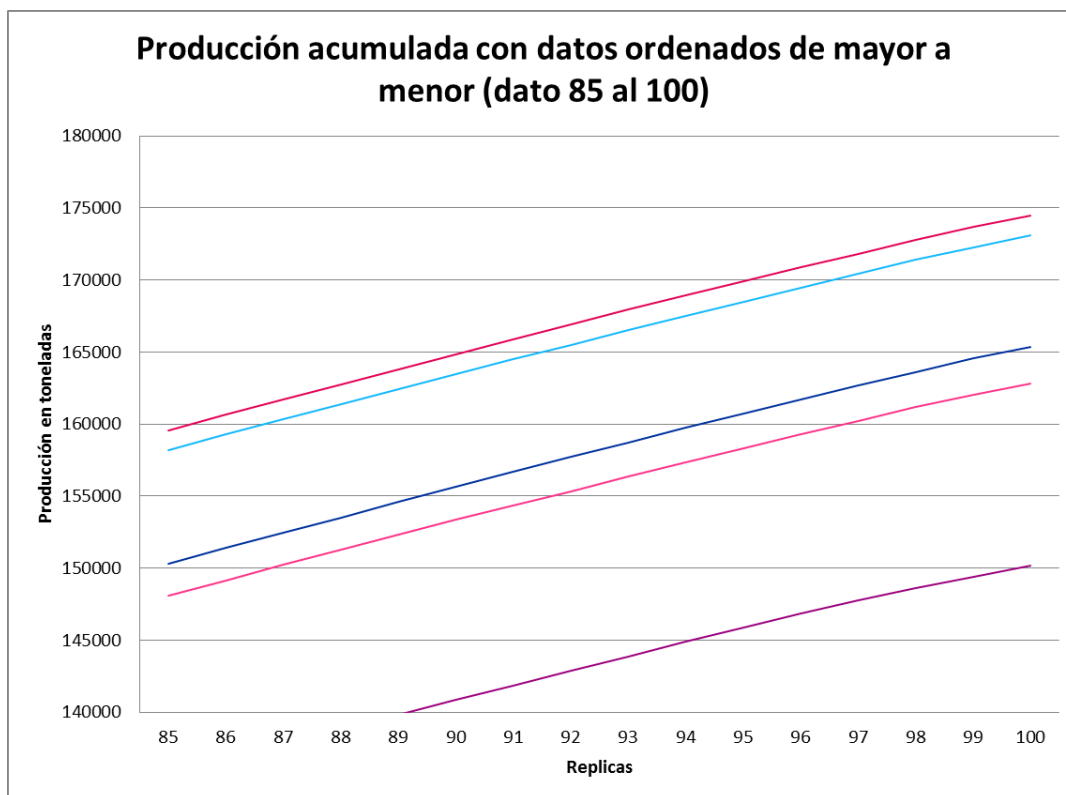


Fuente: Elaboración propia.

A continuación se encuentra el gráfico 4.6, donde se hace énfasis en mostrar los últimas 15 réplicas, para observar las diferencias acumulativas entre los 5 escenarios.



Gráfico 4.6 Producción acumulada en descendente para los resultados de los 5 escenarios después de 100 réplicas (dato 85 al 100)



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.31 Producción resultante para los 5 escenarios considerando de 1 a 4 meses

Producción (toneladas)					
Mes	Original	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3	Propuesta 4
1	52143	58071	58734	62881	65412
2	93466	102477	104342	110443	113104
3	128210	140299	142266	150135	151759
4	150190	162820	165375	173075	174491

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 4.32 Producción adicional que ofrecen las 4 propuestas sobre el escenario original considerando de 1 a 4 meses

Producción adicional al original (toneladas)				
Mes	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3	Propuesta 4
1	5928	6591	10738	13269
2	9011	10876	16977	19638
3	12089	14056	21925	23549
4	12630	15185	22885	24301

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.32 Producción adicional en porcentaje que ofrecen las 4 propuestas sobre el escenario original considerando de 1 a 4 meses

Porcentaje de incremento de la producción respecto al original				
Mes	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3	Propuesta 4
1	11%	13%	21%	25%
2	10%	12%	18%	21%
3	9%	11%	17%	18%
4	8%	10%	15%	16%

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 4.33 Valor de venta de la producción considerando el precio promedio de la roca fosfórica en el año 2012

		Original	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3	Propuesta 4
4 meses	Venta	\$ 27,917,317.20	\$ 30,264,981.60	\$ 30,739,905.00	\$ 32,171,181.00	\$ 32,434,387.08
	Venta extra		\$ 2,347,664.40	\$ 2,822,587.80	\$ 4,253,863.80	\$ 4,517,069.88
1 mes	Venta	\$ 9,692,340.84	\$ 10,794,237.48	\$ 10,917,475.92	\$ 11,688,320.28	\$ 12,158,782.56
	Venta extra		\$ 1,101,896.64	\$ 1,225,135.08	\$ 1,995,979.44	\$ 2,466,441.72
**Precio de venta promedio de 2012 \$185.88 USD/tonelada						

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.34 Tiempo disponible y tiempos por interrupciones en promedio para las 100 réplicas

Escenario	Interrupciones (horas)						Tiempo disponible*	Porcentaje del original**
	Operativas	Mantenimiento diario	Minero continuo	Carro transportadores derecho	Carro transportador izquierdo	Banda transportadora		
Original	6.82	0.67	10.11	4.48	3.49	2.85	3.55	
Propuesta 1	6.77	0.63	6.80	4.73	3.47	2.67	7.13	201%
Propuesta 2	6.59	0.62	6.58	4.81	3.24	2.49	7.72	217%
Propuesta 3	6.73	0.59	4.96	4.46	3.47	2.68	9.04	254%
Propuesta 4	6.59	0.63	3.26	4.84	3.30	2.45	11.07	312%

* 24 horas menos tiempo por interrupciones operativas, mantenimiento diario, minero continuo y banda transportadora.

**Adicional

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en los gráficos 4.4, 4.5 y 4.6, se presentan los resultados de las 100 réplicas para los 5 escenarios. Se observa que las 4 propuestas ofrecen mayor cantidad de toneladas de producción que el escenario original, como lo muestran las medias y los máximos obtenidos. Viendo sólo las medias, es claro que una propuesta mejora a la anterior, de manera que propuesta 1 es la de menos tonelaje, la propuesta 2 la incrementa, la propuesta 3 tiene un tonelaje más grande y la propuesta 4 es la que genera la mayor producción de mineral.



La gráfica 4.5 muestra las producciones acumuladas de cada escenario comenzando con el mayor tonelaje y terminado con el mínimo, para las 100 réplicas. Aquí se puede ver que las propuestas forman grupos de acuerdo al tonelaje que acumulan. El primer grupo, lo forman las propuestas 1 y 2, que son las que menor incremento en toneladas aportan, sin embargo, son las dos propuestas más sencillas de implementar. De este grupo la propuesta 1 parece ser mejor, ya que es más fácil de implementar; el segundo grupo lo forman las propuestas 3 y 4. En estas, el tonelaje obtenido es mayor, y visualmente parece, incluso, que casi doblan el incremento logrado por la propuesta 1 sobre las condiciones originales. De estas, la propuesta 3 es la más fácil de implementar y no tiene gran diferencia en producción con la propuesta 4.

En la tabla 4.31 se pueden ver las toneladas de producción obtenidas por cada propuesta de 1 a 4 meses, estando acomodadas las toneladas de mayor a menor, de manera que, el mes 1 tiene las producciones máximas y el mes 4 las mínimas. Los datos de esta tabla confirman las observaciones realizadas anteriormente, respecto a la gráfica 4.5.

La tabla 4.32 muestra los incrementos en toneladas de cada propuestas de 1 a 4 meses, con datos de la tabla 4.31. La tabla 4.32 presenta esta información de porcentaje. Viendo los datos mínimos (mes 4) vemos que al menos se logra una producción extra implementando alguna de estas propuestas. Este incremento va desde el 8% al 16%, dependiendo de la propuesta.

En la tabla 4.33, se muestra el tonelaje como valor de venta con precio promedio de 2012. Los incrementos en producción equivalen, entonces, a millones de USD. Estos incrementos van desde \$1.1 hasta \$2.47 millones de USD (para la producción de 1 mes de un frente de trabajo), dependiendo de la propuesta.

En la tabla 4.34 se ve el incremento en tiempo disponible logrado, incrementos de al menos el 101%, lo que muestra que la reducción en tiempo no tiene la tasa del incremento en producción, pero si es proporcional.



4.6 Implicaciones de las propuestas

Propuesta 1 – Eliminar compras emergentes

Para su aplicación se requiere que las compras sean planeadas y no se realicen compras emergentes, por lo que se necesita de una planeación de adecuada de los requerimientos.

Mantenimiento deberá realizar un pronóstico adecuado de los requerimientos y las fechas en que se requieren.

En caso no de implementarse al 100% el modelo de inventarios propuestos o de eventualidades (huracanes, accidentes, etc.), podrá requerirse de compras emergentes.

Propuesta 2 – Reducción del 25% de la interrupción

Para su aplicación se necesita tener las herramientas cerca del área del uso, lo que requiere de planeación para determinar el lugar en donde estará ubicada la refacción, adaptar la ubicación y programar las entregas para surtir las refacciones a los diferentes puntos donde se necesite. La gerencia de minas en conjunto con almacén deberán determinar el lugar en que se coloquen las refacciones. El almacén deberá agregar las refacciones a las entregas que ya hace en mina.

En caso de mal pronóstico el uso del lugar determinado será desperdiciado. En caso de fallar las entregas del almacén, la refacción podría no estar en el lugar designado en el momento adecuado.

Propuesta 3 – Reducción del 60% de la interrupción

Para su aplicación se necesita tener las refacciones cerca del área de uso y programar las actividades de interrupción. Además de las implicaciones de la propuesta 2, se requiere de



la programación y coordinación de las actividades. Mantenimiento deberá programar las actividades, de acuerdo a la disponibilidad del personal.

En caso de mala programación de las actividades o de poca disponibilidad de personal, la reducción de la interrupción no será posible.

Al ser programadas las actividades, este tiempo podría aprovecharse realizando en paralelo actividades de Interrupciones Operativas, pudiendo estas también ser programadas.

Propuesta 4 – Reducción del 100% de la interrupción

Para su aplicación se necesita que las actividades se realicen durante los mantenimientos programados. Para esto se requiere agregar las actividades al mantenimiento programado.

En caso de muchas actividades en el mantenimiento programado, algunas podrían quedar fuera del mantenimiento programado volviendo a ser interrupciones.



Conclusiones

El presente estudio se enfocó en atacar las interrupciones de la actividad extractiva en una empresa minera mexicana, ya que, algunas de las situaciones que más le afectan a la empresa es dejar de producir y la disponibilidad oportuna de refacciones. El fin, de atacar las interrupciones, es tener el mayor tiempo disponible para operar, cumpliendo con los objetivos establecidos para la investigación.

El estudio se centró en analizar un tipo de minado, de un total de tres. Este tipo de minado es el que mayor producción (toneladas) produjo alrededor de un año completo y es el que mayor tiempo acumulado por interrupción tuvo (ver capítulo 4, sección 4.1).

Como se menciona en el capítulo 1, las interrupciones donde una política de control de inventarios tiene mayor impacto, son las que ocurren en el *minero continuo*. El tipo de interrupciones que afectan principalmente a los equipos (p.e. *minero continuo*), son las relacionadas con el uso de refacciones y consumibles, por lo que estas interrupciones involucran inventarios (ver capítulo 1, sección 1.3)

Por lo anterior, se consideraron las interrupciones en los *carros transportadores*, las del tipo *operativas*, en las *bandas transportadoras* y en el *minero continuo*, de donde las interrupciones en el *minero continuo* resultaron tener una mayor área de oportunidad, por las siguientes razones:

- La mayoría de las actividades que interrumpen la operación involucran refacciones.
- Las actividades que interrumpen la operación con mayor tiempo involucran el uso de refacciones, no solo de simples reparaciones.
- Los tiempos de las interrupciones, tanto en duración de cada evento como en la suma total de las duraciones, resultaron ser de los más altos de los cuatro tipos de interrupciones considerados.



En el estudio se trabaja con el 30% de las actividades en el *minero continuo*, mismas que corresponden a las 13 actividades con mayor tiempo en el mismo equipo y representan el 80% del tiempo total interrumpido en el *minero continuo*.

Se usó la teoría de inventarios, mediante el modelo (r, q) , el cual disminuye la probabilidad de que haya faltantes durante el tiempo de entrega del producto. Dicho modelo se aplicó al inventario de las refacciones usadas en 13 las actividades que interrumpen la operación en el *minero continuo* (ver capítulo 4, sección 4.3). Se observó que existen cuatro proveedores, de los cuales la mejor opción es el proveedor 2, sin embargo, este no maneja todas las refacciones. En casos específicos, los proveedores 3 y 4 representan mejores alternativas (ver capítulo 4, sección 4.3). En general, lo deseable es evitar las compras emergentes, ya que tienen un costo total mayor al de las compras programadas.

Se desarrolló un modelo de simulación, el cual es una representación del sistema en el proceso extractivo, desde la extracción hasta el transporte del mineral a bocamina, pasando por el transporte interno mediante *carros transportadores* y *bandas transportadoras*. Uno de los aspectos más relevantes del modelo simulado es la representación de las interrupciones en la operación de los equipos, esto se logró mediante el uso de la lógica de confiabilidad (ver capítulo 4, sección 4.2). Cada tipo de interrupción es representado en el modelo mediante los tiempos de duración de las interrupciones y los tiempos entre interrupciones. Las propiedades correspondientes a las interrupciones en el *minero continuo* varían en cada uno de los escenarios, ya que sobre éstos tienen incidencia las ocurrencias relacionadas a las 13 refacciones.

El modelo de simulación fue validado mediante un enfoque basado en la *t* pareada, el cual fue seleccionado para este estudio debido a que el modelo es una aproximación del sistema real y porque, con este enfoque, se puede conocer la magnitud del rango resultante (ver capítulo 2, sección 2.2). Los resultados de la validación se pueden encontrar en el capítulo 4 (sección 4.2), donde se muestra que el modelo es considerado válido.

Se generaron cuatro propuestas, mediante opiniones de personas en contacto con la actividad extractiva. Estas propuestas son alternativas a las condiciones originales que



permanecen en la actividad extractiva. Las propuestas involucran la implementación de los inventarios, esto con base en las opiniones obtenidas. Gracias a la información del comportamiento de las interrupciones, distribuciones de probabilidad fueron ajustadas, para simular el comportamiento del sistema.

El modelo de simulación fue utilizado para evaluar las cuatro propuestas y las condiciones originales, es decir, 5 escenarios. De acuerdo a dicho modelo, todas las propuestas representan opciones para aumentar la producción, respecto al escenario original. Se observaron incrementos de al menos 8% de la producción, en el peor de los casos (ver capítulo 4, sección 4.5). La propuesta 4 mostró el mayor incremento en producción, lo cual implica que las 13 actividades se tengan que realizar de manera preventiva en el tiempo asignado para el mantenimiento, de manera que, anticipándose a la ocurrencia, la actividad no represente una interrupción. Implicaciones de cada una de las propuestas pueden encontrarse en el capítulo 4(sección 4.6).

Con lo anterior, se muestra que se realizó el estudio con una visión sistémica, donde se tomó a las actividades externas (manejo de inventarios) como actores de influencia en las actividades internas de la mina (actividad extractiva y sus interrupciones), elaborando y evaluando propuestas de mantenimiento, mediante simulación de procesos y optimización de inventarios, logrando propuestas para aumentar la producción.



Referencias

Bibliográficas

- Asxäter, Sven (2006). *Inventory control*. Estados Unidos: Springer Science+Business Media, LLC.
- Bustos Flores, Carlos Enrique & Chacón Parra, Galia Beatriz (2012). *Modelos determinísticos de inventarios para demanda independiente: Un estudio en Venezuela*. Contaduría y Administración, vol. 57, núm. 3, julio-septiembre, 2012, pp. 239-258, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Chung, Christopher A. (2003). *Simulation modelling handbook: a practical approach*. Estados Unidos: CRC Press, Inc.
- Hernández Sampieri, R. & Fernández Collado, C. (2010) *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores.
- Hillier, F. Millier, M. & Lieberman, G. (2000) *Introduction to Management Science: A Modelling and Case Studies Approach with Spreadsheets*. Estados Unidos: Irwin McGraw-Hill.
- Hillier, F.S. y Lieberman, G.J. (2005). *Introducción a la Investigación de Operaciones*; México : Mc. Graw-Hill.
- Law, Averril M. (2007) *Simulation Modeling and Analysis*; Estados Unidos: McGraw-Hill.
- McClave, J., Sincich, T. & Benson, G. (2000). *Statistics for business and economics*. Estados Unidos: Prentice Hall.
- Taha, H.A. (2012). *Investigación de Operaciones*. México : Pearson Educación.
- Runciman, N., Vagenas, N y Corkal, T. (1997). *Simulation of haulage truck loading techniques in an underground mine using WITNESS*. Simulation, vol. 68, núm. 5, pp. 291-299. Estados Unidos: Simulation Councils, Inc.



- Sagasti, Francisco R. y Mitroff, Ian I. (1973) *Operations research from the viewpoint of general systems theory*. Omega, vol. 1, núm. 6, diciembre 1973, pp. 695-709. Estados Unidos: Elsevier.
- Winston, W.L. (2005). *Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos*. México: Thomson.

En línea

- (2005). *Análisis de la estructura productiva y mercados de la roca fosfórica*. Colombia: Unión Temporal GI. Georecursos. Recuperado el 03/05/14 de <http://www.simco.gov.co/Portals/0/rocafosforica.pdf>
- (2014). *Mineral commodity summaries: phosphate rock*. Estados Unidos: U.S. Geological Survey. Recuperado el 29/04/14 de http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/
- de Ridder, M., de Jonn, S., Polchar, J. & Lingemann, S. (2012). *Risk and opportunities in the global phosphate rock market*. Países Bajos: TheHague Centre forStrategicStudies. Recuperado el 03/05/14 de http://www.phosphorusplatform.eu/images/download/HCSS_17_12_12_Phosphate.pdf
- de Wilt, J.G., de Vries, C.K., & van Haren, R.F.J. (2011). *The phosphate balance: current developments and future outlook*. Países Bajos: Innovation Network. Recuperado el 03/05/14 de http://www.courage2025.nl/templates/default/files/downloads/Courage_rapporten_essays/Fosfaat_in_Balans_def.pdf
- Nielson, H., & Sarudiansky, R. (2005). *Minerales para la Agricultura en Latinoamérica*. Argentina: CEPS, Centro de Estudios para la Sustentabilidad. Recuperado el 03/05/14 de http://www.unsam.edu.ar/institutos/centro_ceps/investigaciones/fertilizantes/capitulo3.pdf



- Pegden, C. Dennis & Sturrock, David T. (2014). *Rapid modelling solutions: Introduction to simulation and Simio*. Estados Unidos: Simio LLS. Recuperado el 24/02/2015 de <http://www.simio.com/about-simio/introduction-to-simio.htm>
- Simio (2015a). *Mining simulation software*. Estados Unidos: Simio LLC. Recuperado el 16/02/2015 de <http://www.simio.com/applications/mining-simulation-software/>
- Simio (2015b). *About Simio*. Estados Unidos: Simio LLC. Recuperado el 16/02/2015 de <http://www.simio.com/about-simio/>
- Ternium (2015). *Glosario*. Recuperado el 02/06/2015 de <http://www.ternium.com.mx/glosario/#m>
- Zavala Trías, S. (2009). *Guía a la redacción en el estilo APA*. Venezuela: Universidad Metropolitana. Recuperado el 03/12/13 de <http://www.cibem.org/paginas/img/apa6.pdf>



Anexos



Anexo A

Actividades que interrumpen la operación por tipo con tiempos

Tabla A1. 10 mayores tiempos por interrupciones operativas para 3 meses del año 2012

	Interrupción	Tiempo (horas)	Acumulado (horas)	% número fallas	% tiempo acumulado
1	Fortificación (anclaje)	970.41	970.41	1%	43%
2	Movimiento de Equipo para Cambio de Frente	206.78	1177.19	3%	52%
3	Cambio de Picas	142.84	1320.03	4%	58%
4	Acondicionando Ventilación	102.15	1422.18	6%	62%
5	Traslado Exterior Mina	92.8	1514.98	7%	66%
6	Marcación de Rumbos	77.1	1592.08	8%	70%
7	Traslado Interior Mina	73.22	1665.3	10%	73%
8	Llegada de Transporte a Mina	72.72	1738.02	11%	76%
9	Movimiento C.F	63.68	1801.7	13%	79%
10	Esperando Transporte exterior Mina	48.26	1849.96	14%	81%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A2. 10 mayores tiempos por interrupciones de los carros transportadores para 3 meses del año 2012

	Interrupción	Tiempo (horas)	Acumulado (horas)	% número fallas	% tiempo acumulado
1	Drive dañado	5.19	5.19	2%	15%
2	Acondicionando extensión para cable (SH)	5.08	10.27	4%	30%
3	Cambio de reductor de motor de conveyor (SH)	3.7	13.97	6%	41%
4	Falla en crucetas de flechas de transmision (SH)	3.67	17.64	8%	52%
5	Falla en motor de tracción (SH)	3.5	21.14	10%	62%
6	Falla Tracción (Obstruye Operación)	3.33	24.47	13%	72%
7	Falla en cabina de mando	2.75	27.22	15%	80%
8	Falla en reductor de motor de tracción (SH)	2	29.22	17%	86%
9	Calibración de Tracción (SH)	1	30.22	19%	89%
10	Daño interno en carrete (SH)	1	31.22	21%	92%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A3. 10 mayores tiempos por interrupciones del minero continuo para 3 meses del año 2012



“Elaboración y evaluación de propuestas de optimización de inventarios, para aumentar la producción, en un proceso extractivo”

	Interrupción	Tiempo (horas)	Acumulado (horas)	% número fallas	% tiempo acumulado
1	Falla en cadena de conveyor (MC)	92.57	92.57	2%	23%
2	Falla en Levante de cabezal (MC)	27.48	120.05	4%	30%
3	Falla en pala (MC)	22.34	142.39	6%	36%
4	Cambio de motores de tracción (MC)	22.17	164.56	8%	42%
5	Cambio de motores de corte (MC)	17.5	182.06	10%	46%
6	Fuga de aceite hidráulico en el sistema (MC)	16.01	198.07	12%	50%
7	Falla en contactor de vacío de motor de sist. Hidráulico (MC)	15.5	213.57	14%	54%
8	Drive dañado	14.67	228.24	16%	58%
9	Falla del estabilizador (MC)	14.43	242.67	18%	61%
10	Falla en swing de conveyor (MC)	13.92	256.59	20%	65%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A4. 10 mayores tiempos por interrupciones en las bandas transportadoras para 3 meses del año 2012

	Interrupción	Tiempo (horas)	Acumulado (horas)	% número fallas	% tiempo acumulado
1	Empate de banda 36"	116.83	116.83	2%	17%
2	Mantenimiento a B-54"	81.34	198.17	4%	28%
3	Empate de banda 54"	65.99	264.16	6%	38%
4	Banda desalineada 36"	48.59	312.75	8%	45%
5	Cambio de Motor de Cabezal de B-54"	41.99	354.74	10%	51%
6	Falla en motor	41.65	396.39	12%	57%
7	Reparación de empate 54"	32.15	428.54	14%	62%
8	Acondicionando faldon en tolva de descarga	29.51	458.05	16%	66%
9	Avance de banda	28.25	486.3	18%	70%
10	Falla en cople motriz	19.75	506.05	20%	73%

Fuente: Elaboración propia.



Anexo B

Actividades que interrumpen la operación por tipo (lista completa)

Tabla B1. Lista de interrupciones operativas (correspondientes al gráfico 1.6)

No.	Interrupción	No.	Interrupción
1	Fortificación (anclaje)	37	Revisión de Plan de Minado
2	Movimiento de Equipo para Cambio de Frente	38	Limpieza de Frente de Acarreo
3	Cambio de Picas	39	Cambio de Manguera de Ancladora
4	Acondicionando Ventilación	40	Control Remoto MC Descargado
5	Traslado Exterior Mina	41	Acondicionando Tolva de Descarga
6	Marcación de Rumbos	42	Rezagando Material Estéril (Exterior Mina)
7	Traslado Interior Mina	43	Descompactando Canalón (MC)
8	Llegada de Transporte a Mina	44	Rezaga de Lodo en Frente de Trabajo
9	Movimiento C.F	45	Falla en Equipo de Fortificación
10	Esperando Transporte exterior Mina	46	Movimiento Compresor
11	Lubricación de Orugas	47	Cable Prensado de Sh-car
12	Recibiendo Lámpara	48	Descompactado Placa Flexible (MC)
13	No Operó Por Día Festivo	49	Bombeo en Pileta
14	Capacitación de Personal	50	Movimiento de Equipo de fortificación (anclaje)
15	Acondicionando Cable (MC)	51	Limpieza de Área de Trabajo
16	Para Operación por Falla Estructural	52	Piedra Atorada en Polea de Cola
17	Revisión de Equipo (MC, Sh-car)	53	Cambio de Subestación del Sistema
18	Limpieza de Tolva de Descarga	54	Perforando Barrenos de Geología
19	Descompactando Cadena de Conveyer de MC	55	Visita de Comisión mixta.
20	MC Embancado	56	Acondicionando Compresor
21	Para Operación por Ancla Atorada en Cadena de Conveyer de MC	57	Acondicionando Equipo de Fortificación
22	Revisión de Área de Minado	58	Rebaje de Piso en Esteril
23	Rellenado de Aceite Hidráulico (MC)	59	Sh-car Embancado
24	Cable Prensado (MC)	60	Acondicionamiento de piso
25	Limpieza Polea de Cola	61	Limpieza de Comedor
26	Pláticas de 5 Minutos	62	Esperando Transporte a Interior Mina
27	Acondicionando Equipo de Trabajo	63	Cable Pisado de Sh-car
28	Acondicionando Máquina Ancladora	64	Movimiento de Equipo para Rebaje de Puente de Ventilación
29	Rebaje de Piso para Tolva de Descarga	65	Sh-car Mordaza suelta
30	Rebaje de Piso para Pileta	66	Tolva Ensolvada
31	Recuperando Cable (MC)	67	Reparación de Empate de Cable de MC
32	Espera de Arranque de Banda	68	Piedra Atorada en Tolva
33	Reparación de Empate de Sh-car	69	Opera Solo un Sh-car por Falta de Espacio
34	Movimiento de Ancla(s) de Sh-car(s)	70	Opera solo un sh-car por falta de personal.
35	Para Operación por Falta de Material de Fortificación	71	Sh-car no avanza por golpe en guardafango
36	Piedra Atorada en Polea Frontal		

Fuente: Elaboración propia.



Tabla B2. Lista de interrupciones en los carros transportadores (correspondientes al gráfico 1.7)

No.	Interrupción	No.	Interrupción
1	Drive dañado	25	falla electrica en sh-b
2	Acondicionando extensión para cable (SH)	26	Falla en Balacín de Mando de Tracción (SH)
3	Cambio de reductor de motor de conveyor (SH)	27	Falla en brazos de dirección (SH)
4	Falla en crucetas de flechas de transmision (SH)	28	Falla en cadena de conveyor (SH)
5	Falla en motor de tracción (SH)	29	Falla en Conecciones Tracción (SH)
6	Falla Tracción (Obstruye Operación)	30	Falla en conveyor (SH)
7	Falla en cabina de mando	31	Falla en Luces (SH)
8	Falla en reductor de motor de tracción (SH)	32	Falla en mando de tracción (SH)
9	Calibración de Tracción (SH)	33	Falla en motor de bomba hidráulica (SH)
10	Daño interno en carrete (SH)	34	Falla en panel de Tracción (SH)
11	Fuga de aceite hidráulico en el sistema (SH)	35	Falla en Rotor de Motor de Tracción (SH)
12	Falla en flechas de transmisión (SH)	36	Falla en Rótulas de Dirección (SH)
13	Falla en barras de dirección (SH)	37	Falla Interruptor de Tracción (SH)
14	SH-C Ponchado(obstruyendo operación) (SH)	38	Falla Relevador de Bomba de Sistema Hidraulico (SH)
15	Falla en el sistema de levante del conveyor (SH)	39	Falla Relevador de Sobrecarga (SH)
16	Cambio de Birlos de Llanta (SH)	40	Falla selector de bomba (SH)
17	Cambio de cable por desgaste (SH)	41	Falla Selector de Conveyor (SH)
18	Cambio de selector de dirección (SH)	42	Falla Switch de Bomba Hidraulica (SH)
19	Cambio en motor de tracción (SH)	43	Falla switch de conveyor (SH)
20	Daño en Barra de Retorno (SH)	44	Fuga de Hidraulico en Conector (SH)
21	Daño en Mangueras de Dirección (SH)	45	Llanta Desalineada (SH)
22	Daño en Selector de Conveyor (SH)	46	Paro control de emergencia (Sh-car)
23	Daño en Switch de Conveyor (SH)	47	Revisión a Guarda de Carrete (SH)
24	Daño en Terminal de Dirección (SH)	48	SH-C Ponchado

Fuente: Elaboración propia.



Tabla B3. Lista de interrupciones en las bandas transportadoras (correspondientes al gráfico 1.8)

No.	Interrupción	No.	Interrupción
1	Empate de banda 36"	26	Banda destensada 54"
2	Mantenimiento a B-54"	27	Patinada de banda 36"
3	Empate de banda 54"	28	Falla en catarinas
4	Banda desalineada 36"	29	Acondicionando Rodillos de B-54"
5	Cambio de Motor de Cabezal de B-54"	30	Instalacion de limpiadores a cabezal b-1-36"
6	Falla en motor	31	Empate de banda 48"
7	Reparación de empate 54"	32	Daño en Timer de Cabezal
8	Acondicionando faldon en tolva de descarga	33	Falla en Cable de Motor de Banda Transportadora
9	Avance de banda	34	Acondicionando Tolva de Descarga de 48"
10	Falla en cople motriz	35	Banda desenergizada
11	Limpieza de banda	36	Carro tensor de polea desalineado
12	Recorte de banda	37	Banda reventada
13	Daño en Swing de B-54"	38	Reparacion de banda de 54"
14	Mantenimiento a Bandas	39	Patinada de banda 54"
15	Daño en Fusible de Motor de B-54"	40	Revisión de empate 36"
16	Banda destensada 36"	41	Daño en chumacera de B-36"
17	Mantenimiento a B-36"	42	Falla en Catarina de B-36"
18	Instalación de rodillos	43	banda de 36" regresa carga.
19	Falla eléctrica en arrancador de banda	44	Acondicionando Estructura de B-36"
20	Movimiento de tolva de descarga	45	Recortando faldon
21	Cambio de polea	46	Soldando Placa en B-48"
22	Instalación de Limpiador	47	Daño en Catarina de B-36"
23	Reparación de empate 36"	48	Falla en Cadena de Catarina de B-36"
24	Banda desalineada 54"	49	Soldando Cabezal de B-36"
25	Acondicionando Estructura de B-54"		

Fuente: Elaboración propia.



Tabla B4. Lista de interrupciones en el minero continuo (correspondientes al gráfico 1.9)

No.	Interrupción	No.	Interrupción
1	Falla en cadena de conveyor (MC)	27	Cambio de Programa de Control (Software) de MC
2	Falla en Levante de cabezal (MC)	28	Daño en bomba hidráulica (Cambio) (MC)
3	Falla en pala (MC)	29	Falla en motor de sistema hidráulico (MC)
4	Cambio de motores de tracción (MC)	30	REVISIÓN DE EQUIPO (M.C.)
5	Cambio de motores de corte (MC)	31	Falla en motores de corte (MC)
6	Fuga de aceite hidráulico en el sistema (MC)	32	Fundas dañadas (MC)
7	Falla en contactor de vacío de motor de sist. Hidráulico (MC)	33	Falla en Ducto de Enfriamiento (MC)
8	Drive dañado	34	Revisión de Solenoide de Cabezal (MC)
9	Falla del estabilizador (MC)	35	Revisión de Swing de conveyor (MC)
10	Falla en swing de conveyor (MC)	36	Falla en drivers (MC)
11	Daño en orugas de tracción (MC)	37	Interface dañada
12	Portapica fisurado (MC)	38	Falla en Placa Protectora de Motor de Corte (MC)
13	Falla en sistema de levante del conveyor (MC)	39	Daño en válvula antichattering (Cambio) (MC)
14	Tracción se jala hacia un lado	40	Daño en Flecha de Motor de Conveyor (MC)
15	Falla en transformador de tracción (MC)	41	Falla en motores de conveyor (MC)
16	Antena dañada	42	Falla en interruptor CB-2 (Cambio) (MC)
17	Falla en banco de válvula (MC)	43	Radio control fallando
18	Cambio de Sprocket (MC)	44	Falla en Luces (MC)
19	Cabezal amarrado (MC)	45	Falla en interruptor CB-1 (Cambio) (MC)
20	Cambio de motores de conveyor (MC)	46	Daño en Manguera de Tanque de Enfriamiento (MC)
21	Falla en bomba hidráulica (M.C.)	47	Cambio de motor de sistema de enfriamiento (MC)
22	Falla en válvula piloto (MC)	48	Falla "solenoide dañada" (Cambio) (MC)
23	Falla en sistema enfriamiento (MC)	49	Fuga de Hidráulico en Conector de Tanque de Conveyor (MC)
24	Daño en conector (MC)	50	Falla Ventilador (MC)
25	Falla en motores de tracción (MC)	51	Modulo de traccion dañado
26	Cambio de transformador de tracción (Quemado) (MC)		

Fuente: Elaboración propia.



Anexo C

Hojas de cálculo para la validación del modelo de simulación

Tabla C1. Validación de las toneladas métricas secas diarias para un frente de trabajo

Replica j	X_j	Y_j	W_j	$W_j - \bar{W}(31)$	$(W_j - \bar{W}(31))^2$
1	1508.00	1482.00	26.00	-5.00	25.00
2	1495.00	1638.00	-143.00	-174.00	30276.00
3	1586.00	1118.00	468.00	437.00	190969.00
4	1716.00	1807.00	-91.00	-122.00	14884.00
5	1755.00	1495.00	260.00	229.00	52441.00
6	1534.00	2054.00	-520.00	-551.00	303601.00
7	1027.00	1794.00	-767.00	-798.00	636804.00
8	1326.00	1534.00	-208.00	-239.00	57121.00
9	1079.00	2327.00	-1248.00	-1279.00	1635841.00
10	2184.00	1597.00	587.00	556.00	309136.00
11	1742.00	858.00	884.00	853.00	727609.00
12	1066.00	1378.00	-312.00	-343.00	117649.00
13	1521.00	1118.00	403.00	372.00	138384.00
14	1053.00	2119.00	-1066.00	-1097.00	1203409.00
15	1534.00	1794.00	-260.00	-291.00	84681.00
16	1189.00	2358.00	-1169.00	-1200.00	1440000.00
17	2054.00	1443.00	611.00	580.00	336400.00
18	1430.00	2041.00	-611.00	-642.00	412164.00
19	1053.00	1508.00	-455.00	-486.00	236196.00
20	1664.00	1053.00	611.00	580.00	336400.00
21	1742.00	1755.00	-13.00	-44.00	1936.00
22	1898.00	1495.00	403.00	372.00	138384.00
23	1326.00	1105.00	221.00	190.00	36100.00
24	1586.00	1495.00	91.00	60.00	3600.00
25	1586.00	1280.00	306.00	275.00	75625.00
26	2171.00	663.00	1508.00	1477.00	2181529.00
27	1963.00	1157.00	806.00	775.00	600625.00
28	1924.00	1599.00	325.00	294.00	86436.00
29	1534.00	1937.00	-403.00	-434.00	188356.00
30	2067.00	1546.00	521.00	490.00	240100.00
31	1560.00	962.00	598.00	567.00	321489.00

Media 1576.55 1532.58 Total 12138170.00

N 31

$\bar{W}(31)$ 43.97

$\widehat{Var}[\bar{W}(31)]$ 13051.7957

$t_{30,0.95}$ 2.04227245

$t_{30,0.95} \sqrt{\widehat{Var}[\bar{W}(31)]}$ 233.318305

Mínimo Máximo

-189.35 277.29

Fuente: Elaboración propia.



Tabla C2. Validación del tiempo por interrupciones diario en el minero continuo

Replica j	X_j	Y_j	W_j	$W_j - \bar{W}(31)$	$(W_j - \bar{W}(31))^2$
1	2.92	6.18	-3.26	-34.26	1174.05
2	1.08	9.70	-8.62	-39.62	1569.39
3	0.88	2.16	-1.29	-32.29	1042.54
4	3.92	2.94	0.98	-30.02	901.46
5	0.50	5.48	-4.98	-35.98	1294.61
6	0.00	1.30	-1.30	-32.30	1043.29
7	0.54	3.11	-2.57	-33.57	1126.64
8	2.67	4.96	-2.29	-33.29	1108.09
9	0.42	1.68	-1.26	-32.26	1040.85
10	3.50	6.12	-2.62	-33.62	1130.17
11	0.00	7.38	-7.38	-38.38	1472.74
12	1.08	6.87	-5.79	-36.79	1353.72
13	3.33	10.28	-6.95	-37.95	1440.00
14	4.21	6.04	-1.83	-32.83	1077.83
15	0.00	4.71	-4.71	-35.71	1275.51
16	2.21	9.21	-7.00	-38.00	1444.02
17	0.00	4.90	-4.90	-35.90	1288.91
18	0.67	5.42	-4.75	-35.75	1277.99
19	2.00	2.36	-0.36	-31.36	983.25
20	1.71	4.67	-2.96	-33.96	1153.43
21	0.00	2.76	-2.76	-33.76	1140.01
22	0.00	4.90	-4.90	-35.90	1288.78
23	0.50	5.32	-4.82	-35.82	1282.80
24	0.00	9.15	-9.15	-40.15	1612.05
25	1.00	3.52	-2.52	-33.52	1123.48
26	0.00	1.63	-1.63	-32.63	1064.55
27	0.00	5.42	-5.42	-36.42	1326.42
28	2.08	1.34	0.74	-30.26	915.83
29	1.84	3.09	-1.25	-32.25	1040.12
30	0.00	1.77	-1.77	-32.77	1073.96
31	0.00	6.02	-6.02	-37.02	1370.29

Media 1.19516129 4.85 Total 37436.77

N 31

$\bar{W}(31)$ -3.66

$\widehat{Var}[\bar{W}(31)]$ 40.25459162

$t_{30,0.95}$ 1.697260887

$t_{30,0.95} \sqrt{\widehat{Var}[\bar{W}(31)]}$ 10.76852735

Mínimo Máximo

-14.42 7.11

Fuente: Elaboración propia.



Tabla C3. Validación del tiempo por interrupciones diario en el carro transportador derecho

Replica j	X_j	Y_j	W_j	$W_j - \bar{W}(31)$	$(W_j - \bar{W}(31))^2$
1	0.00	3.87	-3.87	-34.87	1216.17
2	0.00	7.24	-7.24	-38.24	1462.08
3	0.92	6.59	-5.67	-36.67	1344.63
4	0.00	1.78	-1.78	-32.78	1074.76
5	1.42	2.39	-0.97	-31.97	1022.10
6	0.00	1.99	-1.99	-32.99	1088.49
7	0.33	5.13	-4.80	-35.80	1281.88
8	0.00	4.75	-4.75	-35.75	1278.12
9	0.00	2.40	-2.40	-33.40	1115.87
10	0.00	4.36	-4.36	-35.36	1250.36
11	11.83	3.15	8.68	-22.32	498.10
12	0.00	3.77	-3.77	-34.77	1209.22
13	0.00	4.55	-4.55	-35.55	1263.51
14	0.00	1.71	-1.71	-32.71	1069.82
15	0.84	5.64	-4.81	-35.81	1282.19
16	0.00	2.57	-2.57	-33.57	1126.79
17	0.00	4.64	-4.64	-35.64	1270.41
18	0.00	6.17	-6.17	-37.17	1381.44
19	5.34	5.70	-0.36	-31.36	983.67
20	0.00	6.62	-6.62	-37.62	1415.23
21	6.00	3.44	2.56	-28.44	808.79
22	0.00	5.35	-5.35	-36.35	1320.96
23	1.17	6.28	-5.11	-36.11	1303.87
24	0.00	0.99	-0.99	-31.99	1023.14
25	0.00	7.93	-7.93	-38.93	1515.72
26	0.00	3.30	-3.30	-34.30	1176.58
27	6.71	10.00	-3.29	-34.29	1175.82
28	0.00	2.66	-2.66	-33.66	1132.68
29	3.00	4.38	-1.38	-32.38	1048.35
30	0.00	2.79	-2.79	-33.79	1141.71
31	3.04	3.10	-0.06	-31.06	964.58
Media	1.309354839	4.36		Total	36247.02
N		31			
$\bar{W}(31)$		-3.05			
$\widehat{Var}[\bar{W}(31)]$		38.97528526			
$t_{30,0.95}$		1.697260887			
$t_{30,0.95} \sqrt{\widehat{Var}[\bar{W}(31)]}$		10.59603183			
	Mínimo		Máximo		
		-13.65		7.54	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla C4. Validación del tiempo por interrupciones diario en el carro transportador izquierdo

Replica j	X_j	Y_j	W_j	$W_j - \bar{W}(31)$	$(W_j - \bar{W}(31))^2$
1	0.00	3.62	-3.62	-34.62	1198.44
2	0.25	1.31	-1.06	-32.06	1028.08
3	0.00	2.24	-2.24	-33.24	1104.65
4	4.77	3.20	1.57	-29.43	866.13
5	0.00	0.31	-0.31	-31.31	980.13
6	0.00	3.52	-3.52	-34.52	1191.36
7	0.00	1.44	-1.44	-32.44	1052.39
8	1.25	3.75	-2.50	-33.50	1121.92
9	0.00	3.89	-3.89	-34.89	1217.34
10	4.50	5.03	-0.53	-31.53	994.34
11	0.00	3.99	-3.99	-34.99	1224.50
12	3.83	4.32	-0.49	-31.49	991.43
13	0.00	4.37	-4.37	-35.37	1250.69
14	0.00	3.17	-3.17	-34.17	1167.56
15	0.34	0.93	-0.60	-31.60	998.28
16	4.25	5.99	-1.74	-32.74	1072.21
17	0.00	3.03	-3.03	-34.03	1158.37
18	7.34	5.49	1.85	-29.15	849.79
19	0.00	3.17	-3.17	-34.17	1167.51
20	2.71	5.63	-2.92	-33.92	1150.27
21	0.00	7.18	-7.18	-38.18	1457.76
22	2.17	3.64	-1.48	-32.48	1054.92
23	0.00	3.33	-3.33	-34.33	1178.71
24	0.00	4.12	-4.12	-35.12	1233.35
25	0.00	4.22	-4.22	-35.22	1240.37
26	4.50	3.21	1.29	-29.71	882.60
27	0.00	4.17	-4.17	-35.17	1237.20
28	0.71	1.21	-0.50	-31.50	992.20
29	0.00	1.32	-1.32	-32.32	1044.39
30	1.25	6.27	-5.02	-36.02	1297.49
31	0.00	1.81	-1.81	-32.81	1076.60
Media	1.221290323	3.51		Total	34480.96
N		31			
$\bar{W}(31)$		-2.29			
$\widehat{Var}[\bar{W}(31)]$		37.07630142			
$t_{30,0.95}$		1.697260887			
$t_{30,0.95} \sqrt{\widehat{Var}[\bar{W}(31)]}$		10.33467456			
	Mínimo		Máximo		
		-12.63		8.04	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla C5. Validación del tiempo por interrupciones diario del tipo operativo

Replica j	X_j	Y_j	W_j	$W_j - \bar{W}(31)$	$(W_j - \bar{W}(31))^2$
1	4.43	5.40	-0.97	-31.97	1021.92
2	4.72	3.39	1.33	-29.67	880.57
3	6.31	5.41	0.90	-30.10	905.83
4	7.99	7.40	0.59	-30.41	924.92
5	14.26	5.40	8.86	-22.14	490.25
6	6.83	11.43	-4.60	-35.60	1267.48
7	7.71	7.44	0.27	-30.73	944.32
8	8.71	7.40	1.31	-29.69	881.37
9	10.04	5.40	4.64	-26.36	694.85
10	12.91	5.41	7.50	-23.50	552.39
11	6.84	5.42	1.42	-29.58	874.88
12	9.08	5.40	3.68	-27.32	746.16
13	7.71	2.83	4.88	-26.12	682.25
14	6.26	5.42	0.84	-30.16	909.82
15	7.56	7.43	0.13	-30.87	953.20
16	7.75	7.44	0.31	-30.69	942.08
17	11.41	5.38	6.03	-24.97	623.32
18	9.47	5.43	4.04	-26.96	727.04
19	11.31	4.20	7.11	-23.89	570.50
20	4.30	5.35	-1.05	-32.05	1027.20
21	9.78	5.37	4.41	-26.59	707.17
22	10.29	5.41	4.88	-26.12	682.50
23	8.58	5.40	3.18	-27.82	774.00
24	7.66	7.39	0.27	-30.73	944.27
25	12.61	11.42	1.19	-29.81	888.52
26	9.36	11.39	-2.03	-33.03	1090.88
27	6.50	5.45	1.06	-29.94	896.53
28	8.64	7.41	1.22	-29.78	886.73
29	8.60	4.19	4.41	-26.59	706.81
30	7.97	11.44	-3.47	-34.47	1188.08
31	8.89	4.23	4.66	-26.34	693.95

Media 8.531478495 6.37 Total 26079.79

N 31

$\bar{W}(31)$ 2.16

$\widehat{Var}[\bar{W}(31)]$ 28.0427866

$t_{30,0.95}$ 1.697260887

$t_{30,0.95} \sqrt{\widehat{Var}[\bar{W}(31)]}$ 8.987919759

Mínimo Máximo

-6.83 11.15

Fuente: Elaboración propia.



Tabla C6. Validación del tiempo por interrupciones diario en bandas transportadoras

Replica j	X_j	Y_j	W_j	$W_j - \bar{W}(31)$	$(W_j - \bar{W}(31))^2$
1	0.13	1.90	-1.77	-32.77	1074.15
2	0.00	3.26	-3.26	-34.26	1174.00
3	0.28	0.90	-0.62	-31.62	999.74
4	0.00	4.60	-4.60	-35.60	1267.61
5	0.25	6.99	-6.74	-37.74	1424.15
6	0.00	3.39	-3.39	-34.39	1182.81
7	0.00	3.90	-3.90	-34.90	1218.21
8	0.25	6.14	-5.89	-36.89	1360.87
9	0.00	3.26	-3.26	-34.26	1174.02
10	0.00	0.89	-0.89	-31.89	1017.10
11	0.00	0.27	-0.27	-31.27	978.11
12	0.00	5.61	-5.61	-36.61	1339.97
13	0.00	1.13	-1.13	-32.13	1032.51
14	0.14	6.53	-6.39	-37.39	1398.02
15	0.33	1.57	-1.24	-32.24	1039.26
16	0.00	5.19	-5.19	-36.19	1309.77
17	0.50	3.10	-2.60	-33.60	1128.77
18	0.17	5.90	-5.74	-36.74	1349.58
19	0.00	3.56	-3.56	-34.56	1194.15
20	0.13	1.29	-1.16	-32.16	1034.37
21	0.31	4.55	-4.25	-35.25	1242.36
22	0.00	3.25	-3.25	-34.25	1173.39
23	0.00	5.89	-5.89	-36.89	1361.21
24	0.00	1.60	-1.60	-32.60	1062.89
25	0.00	5.62	-5.62	-36.62	1341.04
26	0.75	1.16	-0.41	-31.41	986.74
27	0.00	4.31	-4.31	-35.31	1246.77
28	0.08	0.72	-0.64	-31.64	1001.11
29	0.17	5.04	-4.88	-35.88	1287.23
30	0.00	1.27	-1.27	-32.27	1041.29
31	0.00	0.27	-0.27	-31.27	977.63

Media 0.11 3.33 Total 36418.84

N 31.00

$\bar{W}(31)$ -3.21

$\widehat{Var}[\bar{W}(31)]$ 39.16

$t_{30,0.95}$ 1.70

$t_{30,0.95} \sqrt{\widehat{Var}[\bar{W}(31)]}$ 10.62

Mínimo Máximo

-13.83 7.41

Fuente: Elaboración propia.



Tabla C7. Validación del tiempo por interrupciones diario en el mantenimiento diario

Replica j	X_j	Y_j	W_j	$W_j - \bar{W}(31)$	$(W_j - \bar{W}(31))^2$
1	0.13	0.29	-0.17	-31.17	971.42
2	0.00	0.63	-0.63	-31.63	1000.52
3	0.28	0.57	-0.30	-31.30	979.42
4	0.00	0.56	-0.56	-31.56	995.87
5	0.25	0.39	-0.14	-31.14	969.84
6	0.00	0.75	-0.75	-31.75	1008.17
7	0.00	0.55	-0.55	-31.55	995.23
8	0.25	0.72	-0.47	-31.47	990.56
9	0.00	0.54	-0.54	-31.54	995.04
10	0.00	0.53	-0.53	-31.53	993.91
11	0.00	0.37	-0.37	-31.37	984.31
12	0.00	0.63	-0.63	-31.63	1000.42
13	0.00	0.52	-0.52	-31.52	993.59
14	0.14	0.91	-0.77	-31.77	1009.38
15	0.33	0.61	-0.28	-31.28	978.27
16	0.00	0.64	-0.64	-31.64	1000.87
17	0.50	0.70	-0.20	-31.20	973.54
18	0.17	0.58	-0.42	-31.42	987.09
19	0.00	0.51	-0.51	-31.51	992.83
20	0.13	0.65	-0.52	-31.52	993.66
21	0.31	0.54	-0.23	-31.23	975.52
22	0.00	0.44	-0.44	-31.44	988.74
23	0.00	0.59	-0.59	-31.59	998.23
24	0.00	0.57	-0.57	-31.57	996.85
25	0.00	0.47	-0.47	-31.47	990.15
26	0.75	1.00	-0.25	-31.25	976.56
27	0.00	0.51	-0.51	-31.51	992.79
28	0.08	0.63	-0.55	-31.55	995.44
29	0.17	0.42	-0.26	-31.26	976.89
30	0.00	0.42	-0.42	-31.42	987.11
31	0.00	0.88	-0.88	-31.88	1016.24

Media 0.11 0.59 Total 30708.44

N 31.00

$\bar{W}(31)$ -0.47

$\widehat{Var}[\bar{W}(31)]$ 33.02

$t_{30,0.95}$ 1.70

$t_{30,0.95} \sqrt{\widehat{Var}[\bar{W}(31)]}$ 9.75

Mínimo Máximo

-10.23 9.28

Fuente: Elaboración propia.



Anexo D

Demanda variable de los inventarios

Tabla D1. Demanda variable de las refacciones

Distribución	Refacción	Anual	Varianza	Alfa	Beta
Beta	CONVEYOR CHAIN UNIT CIN DA-5502-LM P/N 2	17	0.1955	0.0724	0.1223
Beta	CYLINDER CUTTER HEAD P/N 392106 P/MINERO	23	0.2285	0.0330	0.0428
Normal	CYLINDER STABILIZER SHOE (SPECIAL) P/N 3	2	0.1515		
Normal	TRAM MOTOR P/N 297607-SR	23	1.9015		
Normal	MTR CUTTER 950V 60 HZ 250 HP WITH RTD P/	5	0.2652		
Beta	CONDUIT HOSE P/N 301624 P/MINERO CONTINU	10	0.1994	0.0288	0.0615
Normal	CONTACTOR VACUMM 160 AMP CONVEYOR MOTOR	8	1.1515		
Normal	DRIVE DC RMS 60 HZ P/N 372752-NEW P/MINE	20	2.9697		
Normal	PIN STAB LIFT No 82946029 P/N 290340 P/M	28	4.0606		
Normal	STAB SEAL KIT P/N 605537 P/MINERO CONTIN	8	0.7879		
Normal	PIN SWING No 82600248 P/N 314372 P/MINER	28	3.5152		
Normal	TRACK BELT ASSY P/N 397941 P/MINERO CONT	4	0.4242		
Normal	WELDT TRACK BELT P/N 392747 P/MINERO CON	4	0.4242		
Normal	HOLDER BIT ASSY J30 P/N 292449 (PORTA PI	30	3.9091		
Normal	CYLINDER CONVEYOR LIFT (SPECIAL) P/N 392	14	1.4242		

Fuente: Elaboración propia, con datos de la empresa.



Anexo E

Tiempo de entrega variable de los inventarios

Tabla E1. Tiempo de entrega proveedor 1

Tiempo de entrega	
Varianza	4.1472E-06
Media	0.00123531

Fuente: Elaboración propia, con datos de la empresa.

Tabla E2. Tiempo de entrega proveedor 2

Refacción \ Mes	Varianza	Media
CYLINDER CUTTER HEAD P/N 392106 P/MINERO	0.0007	0.41
TRAM MOTOR P/N 297607-SR	9.8E-05	0.03
CONDUIT HOSE P/N 301624 P/MINERO CONTINU	0.00023	0.09
CONTACTOR VACUMM 160 AMP CONVEYOR MOTOR	0.00022	0.13
PIN STAB LIFT No 82946029 P/N 290340 P/M	0.00014	0.09
PIN SWING No 82600248 P/N 314372 P/MINER	0.00032	0.10
TRACK BELT ASSY P/N 397941 P/MINERO CONT	0.00027	0.06
CYLINDER CONVEYOR LIFT (SPECIAL) P/N 392	0.00026	0.10

Fuente: Elaboración propia, con datos de la empresa.

Tabla E3. Tiempo de entrega proveedor 3

Tiempo de entrega	
Varianza	0.00070322
Media	0.41185897

Fuente: Elaboración propia, con datos de la empresa.

Tabla E4. Tiempo de entrega proveedor 4

Tiempo de entrega	
Varianza	8.9654E-05
Media	0.08974359

Fuente: Elaboración propia, con datos de la empresa.



Anexo F

Hojas de cálculo para el modelo de inventarios

Tabla F1. Modelo (r, q) para conveyor chain

CONVEYOR CHAIN UNIT CIN DA-5502-LM P/N 2

	Proveedor 3	Proveedor 1	
D =	17	17	(demanda por año)
K =	\$ 1,769.83	\$ 1,088.60	(costo de preparación)
h =	\$ 3,962.65	\$ 5,687.23	(costo unitario por mantener)
L =	0.411858975	0.00123531	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 11,003.52	\$ 2,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$ 25,283.28	\$ 36,286.80	
q* =	3.90	2.55	(cantidad económica de pedido)
r =	22.15	0.27	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	15.14	0.25	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$ 75,454.81	\$ 15,908.29	(Costo Total Variable)

Modelo (r,q) para faltantes como ventas pendientes

desv(L)	0.026518353	0.002036462	
L	0.411858975	0.00123531	
E(D)	17	17	
k	\$ 1,769.83	\$ 1,088.60	
h	\$ 3,962.65	\$ 5,687.23	
cb	\$ 11,003.52	\$ 2,508.02	
varD	0.195508757	0.195508757	
q*	3.90	2.55	unidades
E(X)	7.001602567	0.021000267	
sigmaX (L fija)	0.28376405	0.015540717	
Para L fija			
Pr(X>=r*)	0.082550042	0.340286497	
r*	7.40	0.03	unidades
stock de seguridad	0.39	0.01	unidades
<u>Para L Variable</u>			
varX (L variable)	119.0324282	0.357402687	
sigmaX (L variable)	10.91019836	0.597831654	
z	1.388121392	0.411681352	
r	22.15	0.27	unidades
Stock de seg	15.14	0.25	unidades
CTV L variable	\$ 75,454.81	\$ 15,908.29	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla F2. Modelo (r, q) para cylinder cutter

CYLINDER CUTTER HEAD P/N 392106 P/MINERO

	Proveedor 1	Proveedor 2	
D =	23	23	(demanda por año)
K =	\$ 310.74	\$ 630.49	(costo de preparación)
h =	\$ 2,196.37	\$ 1,909.89	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	0.411858975	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 2,508.02	\$ 1,351.04	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$ 10,357.98	\$ 9,006.94	
q* =	2.55	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	1.08	19.92	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	1.05	10.45	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$ 7,908.53	\$ 27,398.54	(Costo Total Variable)

Modelo (r,q) para faltantes como ventas pendientes

desv(L)	0.002036462	0.026518353	
L	0.00123531	0.411858975	
E(D)	23	23	
k	\$ 310.74	\$ 630.49	
h	\$ 2,196.37	\$ 1,909.89	
cb	\$ 2,508.02	\$ 1,351.04	
varD	0.195508757	0.195508757	
q*	2.55	3.90	unidades
E(X)	0.028412126	9.472756414	
sigmaX	0.015540717	0.28376405	
Para L fija			
Pr(X>=r*)	0.097133964	0.239510514	
r*	0.05	9.67	unidades
stock de seguridad	0.02	0.20	unidades
<u>Para L Variable</u>			
varX (L variable)	0.653877046	217.8785821	
sigmaX (L variable)	0.808626642	14.76071076	
z	1.298056477	0.707877992	
r	1.08	19.92	unidades
Stock de seg	1.05	10.45	unidades
CTV L variable	\$ 7,908.53	\$ 27,398.54	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla F3. Modelo (r, q) para cylinder stabilizer shoe

CYLINDER STABILIZER SHOE (SPECIAL) P/N 3

Proveedor 1		
D =	2	(demanda por año)
K =	\$ 51.96	(costo de preparación)
h =	\$ 31.93	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 2,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$ 1,731.90	
q* =	2.55	(cantidad económica de pedido)
r =	0.16	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	0.16	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$ 86.49	(Costo Total Variable)

Modelo (r,q) para faltantes como ventas pendientes

desv(L)	0.002036462	
L	0.00123531	
E(D)	2	
k	\$ 51.96	
h	\$ 31.93	
cb	\$ 2,508.02	
varD	0.228469582	
q*	2.55	unidades
E(X)	0.00247062	
sigmaX	0.016799724	
Para L fija		
Pr(X>=r*)	0.016241228	
r*	0.04	unidades
stock de seguridad	0.04	unidades
Para L Variable		
varX (L variable)	0.005406509	
sigmaX (L variable)	0.073528966	
z	2.138422652	
r	0.16	unidades
Stock de seg	0.16	unidades
CTV L variable	\$ 86.49	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla F4. Modelo (r, q) para tram motor

TRAM MOTOR P/N 297607-SR

	Proveedor 1	Proveedor 2	
D =	23	23	(demanda por año)
K =	\$ 629.63	\$ 1,215.90	(costo de preparación)
h =	\$ 4,450.32	\$ 3,683.25	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	0.027243589	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 2,508.02	\$ 19,425.23	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$ 20,987.50	\$ 17,370.00	
q* =	2.55	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	0.72	7.66	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	0.69	7.03	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$ 14,431.12	\$ 40,243.97	(Costo Total Variable)

Modelo (r,q) para faltantes como ventas pendientes

desv(L)	0.002036462	0.009902474	
L	0.00123531	0.027243589	
E(D)	23	23	
k	\$ 629.63	\$ 1,215.90	
h	\$ 4,450.32	\$ 3,683.25	
cb	\$ 2,508.02	\$ 19,425.23	
varD	1.901515152	1.901515152	
q*	2.55	3.90	unidades
E(X)	0.028412126	0.626602557	
sigmaX	0.048466074	0.227605136	
Para L fija			
Pr(X>=r*)	0.196814347	0.032125446	
r*	0.07	1.05	unidades
stock de seguridad	0.04	0.42	unidades
<u>Para L Variable</u>			
varX (L variable)	0.657351262	14.43068851	
sigmaX (L variable)	0.810772016	3.798774606	
z	0.853055198	1.850434902	
r	0.72	7.66	unidades
Stock de seg	0.69	7.03	unidades
CTV L variable	\$ 14,431.12	\$ 40,243.97	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla F5. Modelo (r, q) para motor cutter

MTR CUTTER 950V 60 HZ 250 HP WITH RTD P/

Proveedor 1

D =	5	(demanda por año)
K =	\$ 800.40	(costo de preparación)
h =	\$ 1,229.87	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 2,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$ 26,680.00	
q* =	2.55	(cantidad económica de pedido)
r =	0.13	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	0.12	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$ 3,284.41	(Costo Total Variable)

Modelo (r,q) para faltantes como ventas pendientes

desv(L)	0.002036462	
L	0.00123531	
E(D)	5	
k	\$ 800.40	
h	\$ 1,229.87	
cb	\$ 2,508.02	
varD	0.265151515	
q*	2.55	unidades
E(X)	0.006176549	
sigmaX	0.018098184	
Para L fija		
Pr(X>=r*)	0.250196869	
r*	0.02	unidades
stock de seguridad	0.01	unidades
<u>Para L Variable</u>		
varX (L variable)	0.031422717	
sigmaX (L variable)	0.177264538	
z	0.673870359	
r	0.13	unidades
Stock de seg	0.12	unidades
CTV L variable	\$ 3,284.41	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla F6. Modelo (r, q) para conduit hose
CONDUIT HOSE P/N 301624 P/MINERO CONTINU

Proveedor 2		
D =	10	(demanda por año)
K =	\$ 10.34	(costo de preparación)
h =	\$ 13.62	(costo unitario por mantener)
L =	0.094551282	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 6,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$ 147.75	
q* =	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	10.64	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	9.69	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$ 185.09	(Costo Total Variable)

Modelo (r,q) para faltantes como ventas pendientes

desv(L)	0.015249259	
L	0.094551282	
E(D)	10	
k	\$ 10.34	
h	\$ 13.62	
cb	\$ 6,508.02	
varD	0.515151515	
q*	3.90	unidades
E(X)	0.945512819	
sigmaX	0.220699425	
Para L fija		
Pr(X>=r*)	0.000815632	
r*	1.64	unidades
stock de seguridad	0.70	unidades
<u>Para L Variable</u>		
varX (L variable)	9.46298387	
sigmaX (L variable)	3.076196332	
z	3.150257972	
r	10.64	unidades
Stock de seg	9.69	unidades
CTV L variable	\$ 185.09	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla F7. Modelo (r, q) para contactor vacumm

CONTACTOR VACUMM 160 AMP CONVEYOR MOTOR

	Proveedor 1	Proveedor 2	
D =	8	8	(demanda por año)
K =	\$ 64.44	\$ 130.75	(costo de preparación)
h =	\$ 158.43	\$ 137.77	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	0.128205128	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 2,508.02	\$ 280.19	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$ 2,148.10	\$ 1,867.91	
q* =	2.55	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	0.60	3.06	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	0.59	2.03	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$ 496.88	\$ 816.51	(Costo Total Variable)

Modelo (r,q) para faltantes como ventas pendientes

desv(L)	0.002036462	0.014971134	
L	0.00123531	0.128205128	
E(D)	8	8	
k	\$ 64.44	\$ 130.75	
h	\$ 158.43	\$ 137.77	
cb	\$ 2,508.02	\$ 280.19	
varD	1.151515152	1.151515152	
q*	2.55	3.90	unidades
E(X)	0.009882479	1.025641025	
sigmaX	0.037715752	0.384226688	
Para L fija			
Pr(X>=r*)	0.020144224	0.239507345	
r*	0.09	1.30	unidades
stock de seguridad	0.08	0.27	unidades
Para L Variable			
varX (L variable)	0.081404845	8.22236769	
sigmaX (L variable)	0.285315344	2.867467121	
z	2.050779263	0.707888197	
r	0.60	3.06	unidades
Stock de seg	0.59	2.03	unidades
CTV L variable	\$ 496.88	\$ 816.51	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla F8. Modelo (r, q) para drive DC

DRIVE DC RMS 60 HZ P/N 372752-NEW P/MINE

Proveedor 4

D =	20	(demanda por año)
K =	\$ 793.10	(costo de preparación)
h =	\$ 2,089.12	(costo unitario por mantener)
L =	0.08974359	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 4,000.00	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$ 11,330.00	
q* =	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	9.42	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	7.62	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$ 24,063.30	(Costo Total Variable)

Modelo (r,q) para faltantes como ventas pendientes

desv(L)	0.009468576	
L	0.08974359	
E(D)	20	
k	\$ 793.10	
h	\$ 2,089.12	
cb	\$ 4,000.00	
varD	2.96969697	
q*	3.90	unidades
E(X)	1.794871793	
sigmaX	0.516247292	
Para L fija		
Pr(X>=r*)	0.101761954	
r*	2.45	unidades
stock de seguridad	0.66	unidades
<u>Para L Variable</u>		
varX (L variable)	35.92555467	
sigmaX (L variable)	5.993793012	
z	1.271575718	
r	9.42	unidades
Stock de seg	7.62	unidades
CTV L variable	\$ 24,063.30	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla F9. Modelo (r, q) para pin stab lift

PIN STAB LIFT No 82946029 P/N 290340 P/M

	Proveedor 1	Proveedor 2	
D =	28	28	(demanda por año)
K =	\$ 4.97	\$ 10.03	(costo de preparación)
h =	\$ 42.80	\$ 36.99	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	0.091346154	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 2,508.02	\$ 22.49	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$ 165.78	\$ 143.29	
q* =	2.55	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	2.96	8.84	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	2.92	6.29	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$ 234.23	\$ 376.64	(Costo Total Variable)

Modelo (r,q) para faltantes como ventas pendientes

desv(L)	0.002036462	0.011953491	
L	0.00123531	0.091346154	
E(D)	28	28	
k	\$ 4.97	\$ 10.03	
h	\$ 42.80	\$ 36.99	
cb	\$ 2,508.02	\$ 22.49	
varD	4.060606061	4.060606061	
q*	2.55	3.90	unidades
E(X)	0.034588675	2.557692305	
sigmaX	0.070824477	0.609032631	
Para L fija			
Pr(X>=r*)	0.001554634	0.228897973	
r*	0.24	3.01	unidades
stock de seguridad	0.21	0.45	unidades
<u>Para L Variable</u>			
varX (L variable)	0.976752174	71.66392296	
sigmaX (L variable)	0.988307732	8.465454681	
z	2.956723487	0.742481021	
r	2.96	8.84	unidades
Stock de seg	2.92	6.29	unidades
CTV L variable	\$ 234.23	\$ 376.64	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla F10. Modelo (r, q) para stab seal kit

STAB SEAL KIT P/N 605537 P/MINERO CONTIN

Proveedor 1

D =	8	(demanda por año)
K =	\$ 9.42	(costo de preparación)
h =	\$ 23.17	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 2,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$ 314.16	
q* =	2.55	(cantidad económica de pedido)
r =	0.79	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	0.78	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$ 77.23	(Costo Total Variable)

Modelo (r,q) para faltantes como ventas pendientes

desv(L)	0.002036462	
L	0.00123531	
E(D)	8	
k	\$ 9.42	
h	\$ 23.17	
cb	\$ 2,508.02	
varD	0.787878788	
q*	2.55	unidades
E(X)	0.009882479	
sigmaX	0.031197346	
Para L fija		
Pr(X>=r*)	0.002946096	
r*	0.10	unidades
stock de seguridad	0.09	unidades
<u>Para L Variable</u>		
varX (L variable)	0.080664314	
sigmaX (L variable)	0.284014637	
z	2.75372127	
r	0.79	unidades
Stock de seg	0.78	unidades
CTV L variable	\$ 77.23	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla F11. Modelo (r, q) para pin swing
PIN SWING No 82600248 P/N 314372 P/MINER

Proveedor 2		
D =	28	(demanda por año)
K =	\$ 6.47	(costo de preparación)
h =	\$ 23.87	(costo unitario por mantener)
L =	0.099358974	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 6,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$ 92.48	
q* =	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	31.78	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	29.00	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$ 785.24	(Costo Total Variable)

Modelo (r,q) para faltantes como ventas pendientes

desv(L)	0.018027632	
L	0.099358974	
E(D)	28	
k	\$ 6.47	
h	\$ 23.87	
cb	\$ 6,508.02	
varD	1.515151515	
q*	3.90	unidades

E(X)	2.782051277
sigmaX	0.387999871

Para L fija

Pr(X>=r*)	0.000510522	
r*	4.06	unidades
stock de seguridad	1.27	unidades

Para L Variable

varX (L variable)	77.92475034	
sigmaX (L variable)	8.827499665	
z	3.28466305	
r	31.78	unidades
Stock de seg	29.00	unidades

CTV L variable \$ 785.24

Fuente: Elaboración propia.



Tabla F12. Modelo (r, q) para track belt assy

TRACK BELT ASSY P/N 397941 P/MINERO CONT

	Proveedor 1	Proveedor 2	
D =	4	4	(demanda por año)
K =	\$ 760.05	\$ 1,542.13	(costo de preparación)
h =	\$ 934.29	\$ 812.43	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	0.057692308	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 2,508.02	\$ 3,304.56	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$ 25,334.96	\$ 22,030.40	
q* =	2.55	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	0.11	0.91	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	0.10	0.68	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$ 2,479.28	\$ 3,720.52	(Costo Total Variable)

Modelo (r,q) para faltantes como ventas pendientes

desv(L)	0.002036462	0.016400055	
L	0.00123531	0.057692308	
E(D)	4	4	
k	\$ 760.05	\$ 1,542.13	
h	\$ 934.29	\$ 812.43	
cb	\$ 2,508.02	\$ 3,304.56	
varD	0.424242424	0.424242424	
q*	2.55	3.90	unidades
E(X)	0.004941239	0.230769231	
sigmaX	0.022892593	0.156446555	
Para L fija			
Pr(X>=r*)	0.237583496	0.239510337	
r*	0.02	0.34	unidades
stock de seguridad	0.02	0.11	unidades
Para L Variable			
varX (L variable)	0.020628911	0.930034522	
sigmaX (L variable)	0.143627681	0.964382975	
z	0.714097338	0.707878563	
r	0.11	0.91	unidades
Stock de seg	0.10	0.68	unidades
CTV L variable	\$ 2,479.28	\$ 3,720.52	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla D13. Modelo (r, q) para weldt rack belt
WELDT TRACK BELT P/N 392747 P/MINERO CON

Proveedor 1		
D =	4	(demanda por año)
K =	\$ 713.03	(costo de preparación)
h =	\$ 876.49	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 2,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$ 23,767.57	
q* =	2.55	(cantidad económica de pedido)
r =	0.11	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	0.11	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$ 2,331.99	(Costo Total Variable)

Modelo (r,q) para faltantes como ventas pendientes

desv(L)	0.002036462	
L	0.00123531	
E(D)	4	
k	\$ 713.03	
h	\$ 876.49	
cb	\$ 2,508.02	
varD	0.424242424	
q*	2.55	unidades
E(X)	0.004941239	
sigmaX	0.022892593	
Para L fija		
Pr(X>=r*)	0.222884993	
r*	0.02	unidades
stock de seguridad	0.02	unidades
<u>Para L Variable</u>		
varX (L variable)	0.020628911	
sigmaX (L variable)	0.143627681	
z	0.762486018	
r	0.11	unidades
Stock de seg	0.11	unidades
CTV L variable	\$ 2,331.99	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla F 14. Modelo (r, q) para holder bit assy

HOLDER BIT ASSY J30 P/N 292449 (PORTA PI)

Proveedor 1

D =	30	(demanda por año)
K =	\$ 17.88	(costo de preparación)
h =	\$ 164.83	(costo unitario por mantener)
L =	0.00123531	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 2,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$ 595.94	
q* =	2.55	(cantidad económica de pedido)
r =	2.72	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	2.68	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$ 863.00	(Costo Total Variable)

Modelo (r,q) para faltantes como ventas pendientes

desv(L)	0.002036462	
L	0.00123531	
E(D)	30	
k	\$ 17.88	
h	\$ 164.83	
cb	\$ 2,508.02	
varD	3.909090909	
q*	2.55	unidades
E(X)	0.037059295	
sigmaX	0.069490564	
Para L fija		
Pr(X>=r*)	0.005588543	
r*	0.21	unidades
stock de seguridad	0.18	unidades
<u>Para L Variable</u>		
varX (L variable)	1.119739559	
sigmaX (L variable)	1.058177471	
z	2.537113043	
r	2.72	unidades
Stock de seg	2.68	unidades
CTV L variable	\$ 863.00	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla F15. Modelo (r, q) para cylinder conveyor lift
CYLINDER CONVEYOR LIFT (SPECIAL) P/N 392

Proveedor 2		
D =	14	(demanda por año)
K =	\$ 475.31	(costo de preparación)
h =	\$ 876.42	(costo unitario por mantener)
L =	0.099358974	(tiempo de entrega en años)
p =	\$ 6,508.02	(costo por faltante)
Precio Unitario =	\$ 6,790.15	
q* =	3.90	(cantidad económica de pedido)
r =	9.25	(punto de reorden)
Stock de seguridad =	7.86	(unidades) con L variable
CTV L variable =	\$ 10,304.12	(Costo Total Variable)

Modelo (r,q) para faltantes como ventas pendientes

desv(L)	0.016054752	
L	0.099358974	
E(D)	14	
k	\$ 475.31	
h	\$ 876.42	
cb	\$ 6,508.02	
varD	0.696969697	
q*	3.90	unidades

E(X)	1.391025638
sigmaX	0.263154316

Para L fija

Pr(X>=r*)	0.037484007	
r*	1.86	unidades
stock de seguridad	0.47	unidades

Para L Variable

varX (L variable)	19.48554861	
sigmaX (L variable)	4.414243832	
z	1.780659985	
r	9.25	unidades
Stock de seg	7.86	unidades

CTV L variable \$ 10,304.12

Fuente: Elaboración propia.



Anexo G

Opiniones de trabajadores respecto a la implementación de la política de inventarios

Las opiniones obtenidas se obtuvieron enviando el siguiente mensaje a ingenieros que laboran en la empresa y que están en contacto con las situaciones sobre las que este estudio es realizado:

Si se mejorara la disponibilidad de algunas refacciones usadas en las interrupciones que mayor tiempo consumen, ¿Qué medidas se podrían aplicar que no se aplican actualmente? El objetivo es identificar medidas que afecten las interrupciones mejorando el manejo de inventarios.

Las refacciones que se consideran son para interrupciones (reparaciones) en el minero continuo.

G.R.

“Mira Carlos, pues si ya tienes comprobado una política de inventarios, que haga que siempre haya disponibilidad, yo diría que se podría mejorar la disponibilidad en mina. Sabes que hay refacciones se encuentran cerca de la mina, pero tenerlas siempre disponibles podría hacer que estas ubicaciones sean más cercanas a donde opera el equipo.”

V.H.

“Pues cada mes presentamos las actividades de mayor interrupción, desconozco como sean los resultados que tú tienes, pero estoy seguro deben ser muy parecidos a los que mes a mes vemos. Siempre he pensado que están actividades principales se podrían atender de manera preventiva, mandándola al mantenimiento programado. Espero esto te sirva.”

D.M.

“El transporte de las refacciones al lugar donde se va a hacer la reparación a veces es tarda mucho. A mí me toca ver más cuando las refacciones son requeridas de urgencia. Una opción es que se programen las reparaciones anticipadamente de manera que no interfiera en la operación. O no esperar a que falle el equipo, aunque interrumpa la operación”.



R.F.

“Asegurando la disponibilidad de las refacciones que dices, se pueden reducir los tiempos que está parado el equipo. Se puede tener más cerca las refacciones del minero continuo, no digo que a un lado, porque algunas de las refacciones deben de ser caras, pero si más cerca de lo actual. Pero también mantenimiento debería de hacer reparaciones de manera anticipada, de preferencia sin interrumpir la operación.”

C.H.

“Seguramente mejoraría el proceso de compra, de hacerlo así, daría una mejor planeación y con ello pues no habría necesidad de andar haciendo compras urgentes. También se podrían planear las interrupciones, como esa técnica en la que se hacen actividades antes de detener la maquinaria para disminuir el tiempo que realmente está detenido el minero continuo.”

E.V.

“Seguramente se podría eliminar la consignación de estas refacciones. Siempre se involucra tiempo para los requerimientos de consignación, no solo del tiempo de traslado, sino también aquí, ya sabes todo el papeleo que tenemos que hacer, esperar por la orden de la gente de (proveedor 1).”

M.V.

“Pues te ahorras la consignación y estar soportando a estos amigos de (proveedor 1) que nos cobran muy bien por el servicio. Tú sabes bien que siempre buscamos una manera más económica que la actual para hacer mejor el trabajo. Otra sería que pudiéramos programar las actividades que más se repiten, pero pues con ya se necesitaría gente que este al pendiente de la programación, porque entre los que estamos actualmente, nomás no.”

E.M.

“Tener ese manejo de inventarios que dices permitiría que las compras normales tengan mejor disponibilidad, así talvez podríamos deshacernos de a consignación para algunas de esas refacciones. También nos daría la posibilidad de en ocasiones hacer el mantenimiento



semanal como se debe. Te ha tocado presenciar a ti que a veces nos quedamos esperando refacciones y cuando las recibimos ya es una urgencia, teniendo disponible la refacción no habría la necesidad de parar la operación, tu puedes ver que a veces la consignación tiene disponible a tiempo la refacción, y para las refacciones que no están en consignación es la misma, por los recargos que se pagan.”

O.S.

“A los trabajadores de mina siempre les molesta que se interrumpa la operación, para ellos lo importante es tener más bono, y pues entre más tiempo mejor. Así que no les caería mal que las reparaciones se hagan en el mantenimiento. Pero también el tiempo podría disminuir si se las reparaciones se organizarán en lugar de esperar a que ya no funcione el minero (continuo), la gente se queja mucho de que la cuadrilla de mantenimiento tarda mucho en llegar y súmale el tiempo en que van por la refacción, si se organizan y adelantan a la falla pues la cuadrilla ya sabe a dónde ir y se perdería menos tiempo.”



Anexo H

Glosario

Ancla: Estructura metálica que se coloca en las paredes o techos de la mina para fortalecer la resistencia estructural.

Baja capacidad: Es el tiempo en el cual sólo uno de los dos carros transportadores está fuera de operación.

Banda transportadora: El sistema de bandas transportadoras está dedicado a transportar el mineral por trayectos de hasta 2000 metros por sección. La banda transportadora tiene movimiento originado por un cabezal localizado al final de la estructura de la sección, y el movimiento se mantiene por un conjunto de rodillos.

Beneficio de minerales: Conjunto de operaciones empleadas en el tratamiento de menas y minerales por medio físicos y mecánicos, con el fin de separar los componentes valiosos de los constituyentes no deseados con el uso de las diferencias en sus propiedades.

Bocamina: Hace referencia a la parte exterior (a la intemperie) inmediata a la mina, por donde hay acceso y salida del interior.

Capacidad de carga: El nivel máximo que un equipo puede soportar ya sea para transportar o almacenar.

Carro transportador: Equipo dedicado al transporte del mineral dentro de mina, con una altura adecuada para las condiciones de la mina. Usa alimentación de corriente eléctrica.

Compras emergentes: Adquisiciones que se realizan el mismo día, posibles gracias a que el proveedor maneja un stock cercano a la mina.

Compras planeadas: Adquisiciones que se realizan con al menos un mes de anticipación.



Compresor: Equipo generador neumático que alimenta la ancladora.

Estéril: Es el material minado con nulo o escaso concentrado, no suficiente para ser aprovechado.

Frente de trabajo: Es la unidad de trabajo en la que se realiza la actividad de extracción y transporte interno hasta la banda transportadora. Describe tanto al equipo utilizado como al personal que lo opera.

Galería: Es el espacio dentro de un mina que se encuentra en medio de dos paredes.

Generador: Equipo que adecúa la corriente eléctrica al voltaje que requiere la maquinaria usada.

Mina: Unidad en la cual se realizan actividades de extracción de algún mineral metálico o no metálico. En este caso, la mina es subterránea, y para este trabajo, su mención hace referencia a todo el sistema de galerías subterráneas.

Mineral: Es el material minado que contiene algún porcentaje de roca fosfórica, el cual es factible de ser aprovechado.

Minero continuo: Equipo que extrae el mineral, por rotación del cabezal, ocasionando desprendimiento del material. Este equipo funciona mediante alimentación eléctrica con cables de alto voltaje. El equipo se controla mediante un control remoto.

Perforadora: Maquina que hace barrenos en la estructura de la mina para colocar anclas.

Sistema de ventilación: Conjunto de galerías en paralelo a las galerías de operación, dedicado a la ventilación de la mina.

Tiempo perdido: Es el tiempo en el cual no hay operación.



Tolva: Estructura con diseño en caída donde es descargado el mineral, el cual cae por gravedad hacia el inicio de la banda transportadora.