

MODELO CONCEPTUAL DE SISTEMAS DE CARGA Y ACARREO DE MINERAL EN MINAS A CIELO ABIERTO

Salomón Liliana¹; Ortiz Alexis²

lilianasalomon14@gmail.com¹; alexisortizuseche@gmail.com²

<https://orcid.org/0000-0003-4176-654X>¹; <https://orcid.org/0000-0002-4187-2329>²

Universidad Nacional Experimental de Guayana UNEG, Venezuela

Estado Bolívar - Venezuela

Recibido (18/05/20), Aceptado (29/05/20)

Resumen: Investigación en el ámbito operacional aplicada a minas a cielo abierto, bajo un enfoque sistémico, que permitió la modelización de sistemas de carga y acarreo de mineral. Sub procesos considerados de mayor impacto en la estructura de costos mineros, representando entre un 50% a 60%. Las actividades consistieron en cronograma de muestreo a las minas de hierro San Isidro, Los Barrancos, Las Pailas, Cerro Bolívar y Altamira. Se consideró el grado de complejidad de estos procesos por la cantidad de variables e interacciones encontradas, dando lugar a un Modelo Conceptual denominado FRED, cuyos componentes son: (1) Frente de Excavación; (2) Rutas; (3) Equipos Mineros; y (4) Destinos del Mineral. El Modelo FRED, representó la plataforma para el diseño de una herramienta computacional bajo el lenguaje Java Script, denominado ACATEU, que admite la configuración de las entidades descritas anteriormente; lo que significa una ventaja comparativa sobre otros modelos, dado que permite combinar escenarios de operación en minas a cielo abierto de acuerdo a variables no convencionales.

Palabras Clave: Carga- acarreo, enfoque sistémico, herramienta computacional, modelo conceptual.

CONCEPTUAL MODEL OF OPEN PIT ORE LOADING AND TRANSPORT SYSTEMS

Abstract: Operational research applied to open-pit mines, under a systemic approach, which allowed the modelling of mineral loading and transport systems. Sub-processes considered to have the greatest impact on the mining cost structure, representing between 50% and 60%. Activities included sampling schedules for the San Isidro, Los Barrancos, Las Pailas, Cerro Bolívar and Altamira iron mines. The degree of complexity of these processes was considered by the number of variables and interactions found, resulting in a Conceptual Model called FRED, whose components are: (1) Excavation Front; (2) Routes; (3) Mining Equipment; and (4) Mineral destinations. The FRED Model, represented the platform for the design of a computational tool under the Java Script language, called ACATEU, which supports the configuration of the entities described above; which means a comparative advantage over other models, since it allows to combine operating scenarios in open pit mines according to unconventional variables.

Keywords: Load-carry, systemic approach, computational tool, conceptual model.

I. INTRODUCCIÓN

Como una de las industrias más globales, la industria minera se encarga de la obtención de las materias primas en su estado natural. Se enfoca en encontrar, extraer, procesar y comercializar los recursos minerales de la tierra para suministrar los metales y minerales que ayudan al mundo a crecer [1]. Sin embargo, aunque la minería sigue siendo cuestionada por el impacto negativo al ambiente, el Banco Mundial estima que cerca de 3.5 billones de personas viven en países ricos en petróleo, gas o minerales y que con un buen gobierno y una gestión transparente, los ingresos de las industrias extractivas pueden tener un impacto en la reducción de la pobreza y el fomento de la prosperidad compartida, respetando las necesidades de la comunidad y el medio ambiente [2]. Uno de los factores principales que ha impulsado el crecimiento de la actividad minera a nivel mundial, está relacionado al tipo de explotación que predomina, la cual obedece al método de fosa abierta (open pit) y tajo abierto (open cut). Esto debido al fácil acceso a minerales ubicados en zonas difíciles; a la evolución de la tecnología minera para el manejo de grandes volúmenes de material; elevada automatización; mejores registros de seguridad que la minería subterránea; y uso de nuevos avances en el área de voladura, haciendo rentable la extracción del mineral de bajo tenor, por tonelada de material removido.

Dentro de los sub procesos de mayor impacto para el cumplimiento de las metas de despacho de mineral en operaciones a cielo abierto, se encuentra el de carga y acarreo por la condición de manejo de grandes volúmenes de material, dentro del cual se encuentra mena y materia prima no conforme (mpnc), desde los frentes de producción de la mina hacia los muelles y/o estaciones de carga y depósitos; que en el caso de la minería de hierro oscila entre 10 mil a 200 mil toneladas métricas por día [3].

Estos sub procesos tienen como objetivo fundamental el de retirar o cargar el material volado del frente de excavación y transportarlo adecuadamente a los distintos destinos, dependiendo del esquema de operación. En función de este objetivo, la productividad en la mina está relacionada con las toneladas de material (mena/mpnc) acarreado por turno de trabajo.

Existe una marcada correspondencia entre el tamaño de la producción y la productividad, siendo uno de los factores más importante el tamaño de los equipos utilizados en las actividades de explotación (carga y acarreo) [4]. Por ende, uno de los problemas más difíciles para la optimización de la explotación minera superficial es la elección de la flota óptima de camiones y cargadores [5].

Debido a esta mecanización, existe un impacto considerable en la estructura de costos de la mina, representando la carga-acarreo entre un 50% a 60%, encontrándose el porcentaje restante a los otros sub procesos mineros como la perforación, la voladura y los servicios auxiliares. Esto implica, que cualquier ahorro generado por una mejora en la carga y el acarreo impactan directamente en un costo menor por tonelada de material transportado. Por lo tanto, es necesario obtener una alta productividad con la correcta asignación de camiones y palas, como indican varios estudios [6]-[7]- [8].

Este es uno de los mayores desafíos de la gerencia de planificación de mina, dado que uno de los problemas más frecuentes son los llamados tiempos muertos o demoras relacionadas a camiones que esperan para ser cargados o cobertura insuficiente de la demanda de palas, que se traduce en sub utilización del equipo. En ambos casos, existe una disminución en el tiempo efectivo de operación de carga-acarreo.

Otra consideración importante es el ciclo minero en su contexto holístico, dado que involucra tiempos variables en función a la calidad de la voladura o fragmentación del material, rendimientos de los equipos de carga y acarreo, distancias que varían de acuerdo al cambio en los frentes de excavación, variaciones en las condiciones de la mina y los diferentes destinos que se pueden presentar.

Por otra parte, en un análisis sistémico del proceso minero, se plantea la interdependencia de la preparación del terreno, la excavación y la carga, el transporte y el tratamiento de minerales, lo que se traduce en que "el costo óptimo por tonelada no puede obtenerse tratando de minimizar cada uno de los costos operativos individuales"[9].

Por estas razones, un modelo debe considerar (1) la heterogeneidad de la flota de equipos; (2) el carácter dinámico y estocástico de las variables inmersas en el ciclo minero; y (3) la interdependencia de variables clave a lo largo del proceso integral; permitiendo una planificación más ajustada a las condiciones particulares y reales de la mina.

Es por ello, que partiendo de un enfoque sistémico, esta investigación se circunscribió a la construcción de un modelo conceptual del sistema de carga y acarreo de mineral en minas a cielo abierto, como base para la optimización vía simulación de las variables clave que intervienen en el sistema integrado.

Este artículo está estructurada como sigue: fundamentación ontoepistemológica; aspectos metodológicos; modelo conceptual del sistema de carga y acarreo de mineral en minas a cielo abierto; Red de Petri del sistema; y finalmente, las conclusiones.

II. DESARROLLO

A. Fundamentación ontoepistemológica de la investigación

La investigación está circunscrita en una concepción sistémica, basada en la Teoría General de Sistemas (TGS). Bertalanffy como su creador señala al respecto, que teoría no debe entenderse en su sentido restringido, esto es, matemático, sino que la palabra teoría está más cercana, en su definición, a la idea del paradigma de Kuhn, en términos de un modelo general para entender la realidad [9].

La TGS no es sólo un modelo conceptual que permite construir una interpretación abstracta de la realidad. A partir de la teoría de sistemas se generan modelos mentales diferentes para analizar y comprender esa realidad. Modelos que son más aptos para realizar interpretaciones e intervenciones, cuando mayor es el relacionamiento entre las partes y del conjunto con el medio que lo rodea y condiciona [10].

Por lo tanto, se aboga por una visión holística en el estudio del sistema minero o proceso de extracción de mineral en minas a cielo abierto, como entidades, más que como conglomerados de partes. Considerando como entidades, los frentes de excavación, las palas, camiones, cargadores, rutas y destinos.

El interés de este enfoque se dirige al desempeño del sistema completo, aun cuando se examina el impacto en una sola de sus partes (carga-acarreo). Esto, dado que hay algunas propiedades del sistema que sólo pueden tratarse desde una perspectiva holística. Estas propiedades se derivan de las relaciones entre las partes de los sistemas: cómo interactúan y encajan entre sí [11].

Otra perspectiva abordada en la investigación, es la relacionada a la complejidad. Dado que una operación minera a cielo abierto es un sistema complejo, que enfrenta condiciones operativas afectas a factores de variabilidad, como la duración de los tiempos de carga, descarga y transporte; y que adicionalmente tiene la necesidad de tomar un gran número de decisiones operacionales en tiempo real durante un turno de operación. Esta complejidad también es referida en cuanto a la cantidad de componentes que tiene y por la diversidad de configuraciones que puede adoptar dependiendo de las iteraciones entre los estados iniciales, sus propios patrones de comportamiento y el contexto en el que opera [12].

III. METODOLOGÍA

A. Tipo de estudio

Teniendo en cuenta las acciones clave del objetivo

general y los objetivos específicos, y el alcance de la teoría de sistemas, se puede decir que la investigación desarrollada se ajustó a un nivel descriptivo-analítico, al proponer el diagnóstico, determinación de variables clave, parámetros, indicadores operativos y ejes estratégicos de acción para la conceptualización de sistemas de carga y acarreo de mineral, circunscrito en el Proceso de Extracción de Mineral.

La investigación descriptiva tiene como objetivo la descripción del evento de estudio. Este tipo de investigación se asocia al diagnóstico y el propósito es exponer el evento estudiado, haciendo una enumeración detallada de sus características. Como complementariedad implica más bien la reinterpretación de lo analizado en función de algunos criterios, dependiendo de los objetivos del análisis [13].

Por lo que los mencionados niveles (descriptivo-analítico) estudian el sistema de carga y acarreo de mineral desde las variables emergentes y sus principales interrelaciones, dentro de un sistema mayor (proceso minero), enfatizando en general los parámetros de mayor criticidad e impacto a la productividad.

B. Diseño de la investigación

Atendiendo a los aspectos operativos de la investigación, el diseño fue de campo, dado que la información recolectada con relación al sistema de carga y acarreo de mineral en minas a cielo abierto, fue tomada directamente en su ambiente natural o de desarrollo, constituido por las operaciones en minas de hierro del Cuadrilátero San Isidro, Cerro Bolívar y Altamira. Localizadas en Ciudad Piar, estado Bolívar, operadas por la empresa Ferrominera Orinoco.

En este contexto, el estudio abarcó la actividad “Extracción de Mineral” descrito en el “Proceso Producción de Mineral Fino y Grueso, Código: 908-Fp” comprendido por la extracción y el acarreo del mineral de hierro desde los frentes de producción, y desde las plantas de trituración hasta las estaciones de carga, para su posterior entrega a transporte ferroviario [14].

C. Actividades de campo

Las actividades consistieron en cronograma de muestreo a los diferentes yacimientos de mineral. En estas visitas se realizaron entrevistas al personal de producción y mediciones a diferentes ciclos de carga y acarreo [15]. A continuación se detallan las actividades de campo:

TABLA I. Plan de actividades - Ferrominera Orinoco-Ciudad Piar.

Propósito	Actividades
1. Revisión de los planes de mina a corto, mediano y largo plazo.	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión Normativa Minera Regional, Nacional e Internacional. • Análisis del Plan de Mina y Planes Subyacentes (RRHH, ambiente, seguridad, mantenimiento, aseguramiento de la calidad, otros).
1. Caracterización del Proceso de Minería.	<ul style="list-style-type: none"> • Configuración actual de frentes de mina/centro de acopio. • Determinación de mapa de proceso Minero (estratégicos – claves –apoyo). • Caracterización de proceso carga y acarreo (entradas- proveedores internos/externos – clientes internos/externos). • Distribución de tiempos de operación. • Estructura de costos minería.
1. Análisis rendimientos, disponibilidad, eficiencia e quipos mineros.	<ul style="list-style-type: none"> • Listado de equipos mineros/cantidad/status/función/ubicación. • Plan de mantenimiento. • Tipos de paradas y frecuencia por equipo. • Revisión de estudios realizados a equipos mineros. • Revisión de históricos de rendimientos y confiabilidad.
1. Medición de variables de operación	<ul style="list-style-type: none"> • Toneladas de material (t/turno). • Distancias de acarreo (m). • Tiempos de carga/ descarga de palas y cargadores (seg). • Tiempos de maniobra, acarreo, ida – retorno (seg.) • Tiempos de demoras (seg.) • Tiempo efectivo de trabajo por turno (h/turno).

D. Técnicas e instrumentos de recolección de la información

Las técnicas de recolección de datos utilizadas en la comprensión de la realidad en su contexto natural y sistémico fueron la revisión documental, técnicas de muestreo, observación directa, entrevista semiestructurada y taller de reflexión colectiva. Se detallan a continuación:

1)Revisión documental: Esta técnica se utilizó con el fin de hacer una revisión de toda la documentación referente a los sistemas de carga y acarreo de mineral a cielo abierto en el contexto de las empresas mineras a nivel nacional e internacional, las características de los equipos mineros, la revisión de registros históricos de producción FMO, entre otras documentaciones asociadas a planes estratégicos y mineros.

2)Técnicas de muestreo: Estas técnicas son de suma importancia para cualquier investigación inferencial, ya que como lo plantea [16], “cualquier procedimiento de muestreo que produzca inferencias que sobreestimen, o subestimen, de forma consistente alguna característica de la población se dice que está sesgado”. Por lo tan-

to, se ejecutó un cronograma de muestreo que abarcó las diferentes minas, esquemas operativos, teniendo en cuenta las combinaciones de pala-camión y configuraciones de minas.

3)Entrevistas semiestructurada: Las entrevistas realizadas al personal activo y jubilado de la Gerencia de Minería - Ciudad Piar, fue de gran utilidad para el entendimiento del proceso minero y su evolución a la luz del proceso económico, social y político del país. En este sentido, cabe resaltar la entrevista realizada al Sr. Cesar Ron, trabajador jubilado de Ferrominera Orinoco, quien comenzó en la industria minera en el año 1961 con la Orinoco Mining Company subsidiaria de la United States Steel Corp, desempeñándose como Operador de Palas (Palero).

4)Taller de reflexión colectiva: Este taller se llevó a cabo en la Gerencia de Minería con la participación del Superintendente de Minas, Superintendente de Producción, Superintendente de Planificación y Control, Superintendente de Servicios y Desarrollo y el Jefe del Área de Planificación de Minas. Tuvo como objetivo

“Identificar las variables clave del sistema de acarreo de mineral en minas a cielo abierto” en el contexto de una reflexión colectiva [17].

E. Tabulación, medición y análisis de la información

Las técnicas de tabulación, medición y análisis de datos se seleccionaron en función de los objetivos específicos planteados en la investigación y en los datos obtenidos en la revisión documental, el muestreo de variables fundamentales del proceso de carga y acarreo de mineral, entrevistas y el taller de reflexión colectiva.

Dentro del análisis cuantitativo y cualitativo de los datos, se empleó (1) la técnica estadística de estimación paramétrica; (2) el análisis estructural; y (3) Redes de Petri.

1) Técnica de estimación paramétrica: Para el caso de la presente investigación, se estimaron como principales parámetros los promedios de: tiempo de maniobra del camión en la excavadora; tiempo de carga de camiones por excavadora; tiempo de ida del camión; distancia recorrida; tiempo de descarga del camión; tiempo de retorno del camión; tiempo de espera del camión por excavadora; y número de pases de la excavadora para el llenado del camión.

Esto permitió la estimación del tiempo promedio de ciclo de acarreo de mineral desde frentes de producción

hasta plantas, muelles y/o depósitos, para distintas combinaciones de excavadoras – camiones roqueros.

2) Técnica de Análisis Estructural: El Análisis Estructural es una herramienta de estructuración de una reflexión colectiva. Esta reflexión se dio a partir de la realización de un Taller con la Gerencia de Minería y las Superintendencias. Ofrece la posibilidad de describir un sistema con ayuda de una matriz que relaciona todos sus elementos constitutivos, haciendo aparecer las principales variables influyente y dependientes y por ello las variables esenciales a la evolución del sistema.

3) Redes de Petri (RdP): Considerado la carga y el acarreo de mineral como un sistema de eventos discretos, se desarrolló bajo la metodología de Redes de Petri (RdP). Estas son aplicadas para la modelación de sistemas las cuales ofrecen una forma de representación gráfica y matemática de los sistemas modelados. La formalidad matemática de la RdP proporciona herramientas de análisis para los posibles estados a los que el sistema modelado pudiera alcanzar [18].

Los componentes para la aplicación de RdP se explican en la tabla II. Formalmente, una Red de Petri se define como una quintupla, $RP = (P, T, F, W, M_0)$ donde:

Aunado a la complejidad, aspectos como las condiciones del frente de excavación por efecto de la voladu-

TABLA II. Componentes de RdP

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$	Conjunto finito lugares.
$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$	Conjunto finito de transiciones.
$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$	Conjunto de arcos dirigidos de la RdP = subconjunto del producto cartesiano de todos los nodos P y T.
$W: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$	Función de pesos de los arcos.
$M_0: P \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$	Marcado inicial de la red.
$P \cap T = \emptyset$ y $P \cup T \neq \emptyset$	

IV. RESULTADOS

A. Modelo conceptual del sistema de carga y acarreo de mineral

Un sistema minero a cielo abierto representado básicamente por las actividades de perforación, voladura, extracción y acarreo de mineral, es un proceso com-

plejo, dinámico e interrelacionado que requiere de un análisis sistémico para su correcta comprensión. Esta complejidad quedó sustentada en las cuarenta y ocho variables definidas en el análisis estructural planteado, dando como resultado las variables clave e interrelaciones representadas en la figura 1.

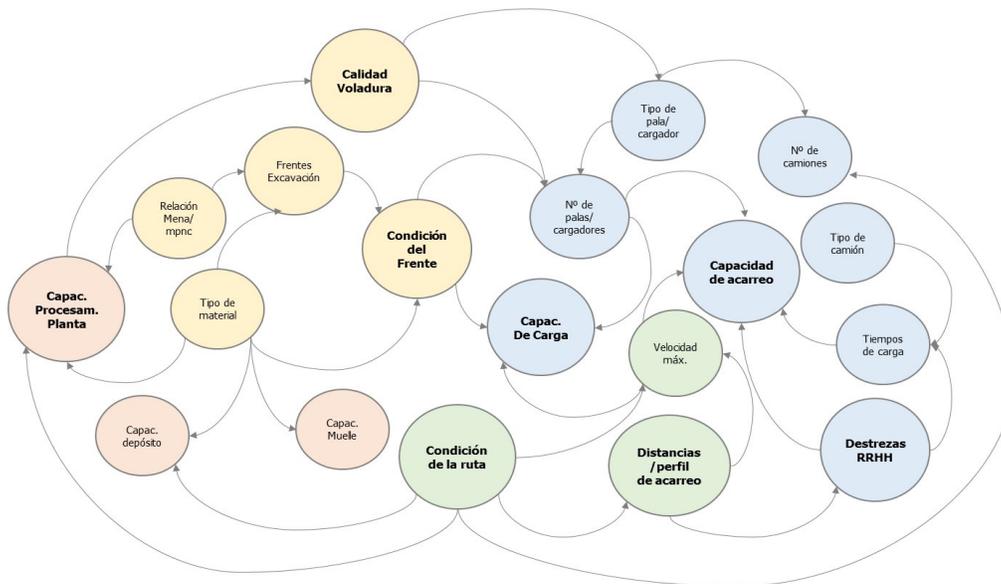


Figura 1. Interdependencia de variables en sistema carga-acarreo [19]- [20].

ra, distancias entre las diferentes zonas de explotación, condiciones de las rutas, tiempos de carga y de acarreo, avance en las minas son aspectos cambiantes que definen este sistema como estocástico, debido a que la operación del sistema varía a lo largo del tiempo de acuerdo a unas leyes no determinísticas, teniendo un efecto en los costos y por ende en la productividad.

Asimismo, las características de alto costo de inversión y gran variedad de marcas, modelos y tamaños de equipos mineros como palas, cargadores frontales y camiones, conduce cada día más a la búsqueda de herramientas para el análisis de la eficiencia de los equipos existentes y los proyectos de inversión futura, en función de encontrar la configuración óptima de equipos para la operación.

También se derivan otros aspectos no menos impor-

tantes relacionados con la seguridad en mina, dado por la velocidad máxima de acarreo de acuerdo al perfil de la ruta, condiciones ambientales cambiantes, tipo de material acarreado y equipos con tecnologías cada vez más sofisticadas. Esto, conlleva al fortalecimiento continuo de la capacidad técnica del recurso humano y el desarrollo de habilidades en gestión de la calidad, para un mejoramiento continuo.

De allí, que la función objetivo que se desprende del modelo propuesto es la de maximizar el volumen de carga y acarreo de material (mena/mpnc), efectuada por cargadores y camiones, desde los distintos frentes de excavación hasta sus respectivos destinos (planta, muelle, depósitos), con criterios de eficiencia, costos, calidad, seguridad y ambiente (ver figura 2).



Figura 2. Componentes del modelo conceptual propuesto (FRED).

Estos componentes se asocian al ciclo minero representado como una red de transporte: las palas o puntos de carga como nodos oferentes, los sitios de vaciado como nodos demandantes y las rutas entre estos puntos como los arcos del sistema.

B.Red de Petri del sistema de carga y acarreo de mineral

De acuerdo a los componentes definidos, el modelo considera un sistema minero en donde se tiene un frente de excavación, donde arriban camiones para ser cargados por palas o excavadoras. Para este sistema los lugares P_i son identificados en la tabla III, siendo que sólo se consideran dos estados de transición $T = \{t_0, t_1\}$

TABLA III. Definición lugares –transiciones.

P_0	FExcav	Frente de excavación
P_1	Planta	Planta de trituración
P_2	OpPlanta	Operador de planta
P_3	MPNC	Depósito mpnc
P_4	Muelle	Muelle o estación de carga

La Red de Petri (RdP) correspondiente al sistema mostrado en la figura 2, se representa en la figura 3, donde los estados que se describen en el sistema se denotan como lugares de la RdP.

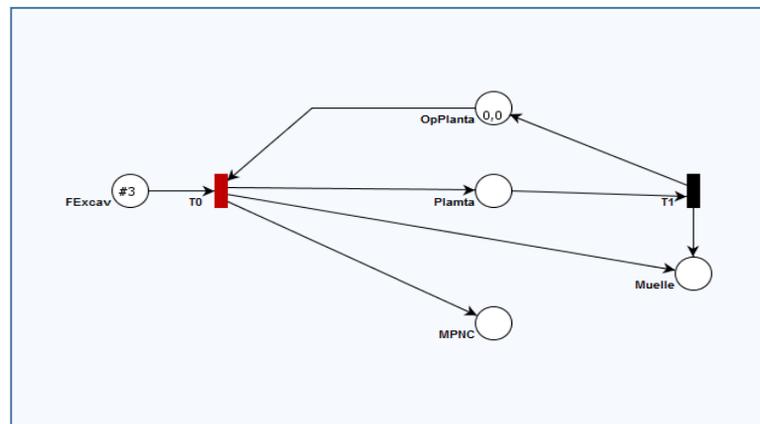


Figura 3. RdP del sistema de carga- acarreo

El estado inicial del sistema modelado por la RdP de la figura 3, indica que existen camiones en el frente de excavación (P_0), que el proceso de carga y las condiciones operativas en mina están listas (P_2) para recibir el material en la planta de trituración (P_1), así como el depósito de materia prima no conforme (P_3) y el muelle (P_4) están habilitados para recibirlos.

El marcado de este estado sería $M_0 = (10100)$, que corresponden a los tokens de los lugares $M_0 = (p_0 p_1 \dots p_4)$, respectivamente. Bajo estas condiciones, la transición t_0 se encuentra habilitada, es decir, para que un camión sea cargado por la pala. La restricción obligatoria en este punto es que el material esté disponible en el frente de excavación (volado/fragmentado).

El estado de la RdP $M_1 = (11000)$ después del disparo de t_0 , indica que el mineral todo en uno extraído

en el frente de producción está disponible en planta, y el muelle también disponible para recibirla. Los estados subsiguientes quedan de la forma: $M_2 (10100)$, $M_3 (01000)$ y $M_4 (00100)$, obtenidos después del disparo de t_1 , donde el frente de excavación, la planta de trituración y los depósitos de MPNC y muelle se encuentran disponibles para continuar con el proceso, cuyo disparo generaría el marcado M_0 , el cual corresponde al estado inicial del sistema.

La figura 4, describe el modelo conceptual del sistema de carga- acarreo en RdP, que fue de utilidad para el desarrollo del modelo de simulación de eventos discretos como herramienta computacional útil para la generación de escenarios operativos que conducen a la optimización del sistema.

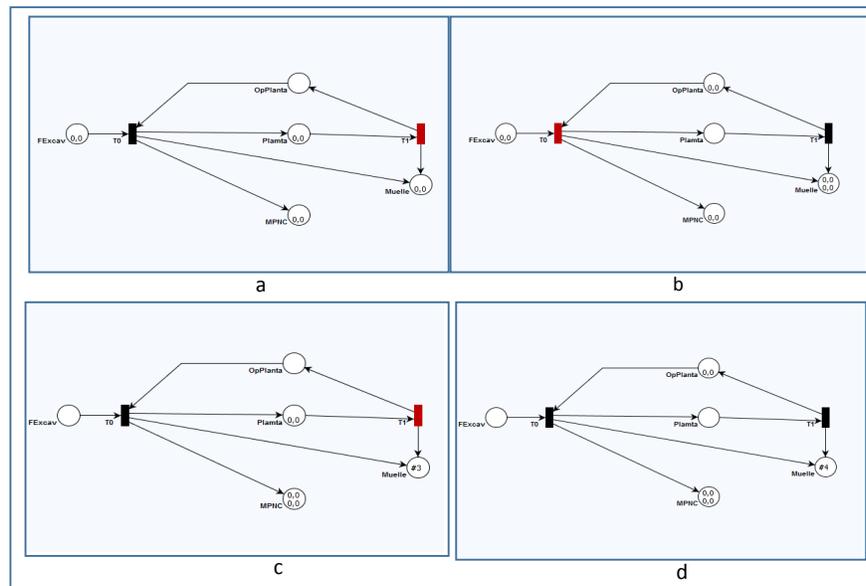


Figura 4. Simulación en RdP del sistema de carga- acarreo

La descripción de variables de entrada consideradas en el modelo se detalla a continuación.

TABLA IV. Variables de entrada definidas para el sistema de carga-acarreo de mineral.

Componente	Variable	Unidad
Frentes de Excavación	Frentes de excavación	excavación
	Condición del frente de excavación	%
	Turnos por día	turnos
	Mena	%
	Materia prima no conforme	%
Rutas	Distancia a nivel	m
	Distancia en bajada	m
	Distancia en subida	m
	Velocidad máxima permitida	km/h
	Condición de la ruta	%
Equipos	Nº de palas	palas
	Nº de cargadores	cargadores
	Nº de camiones	camiones
	Capacidad de pala	yd ³
	Capacidad de cargador frontal	yd ³
	Capacidad de camión	ton
	Condición de la pala	%
	Condición del cargador frontal	%
	Condición del camión	%
	Tiempo carga pala	seg
	Tiempo descarga pala	seg
	Tiempo descarga cargador.	seg
	Tiempo descarga camión	seg
	Velocidad pala	km/h
	Velocidad cargador	km/h
	Velocidad de carga cargador	km/h
Velocidad camión cargado	km/h	
Velocidad máxima camión	%	
Probabilidad de falla		
Destinos	Plantas	plantas
	Muelles	muelles
	Depósitos	depósitos

V. CONCLUSIONES

El Análisis Estructural realizado al proceso de extracción de mineral, en conjunto con las variables emergentes que surgieron al integrar el aporte subjetivo proveniente de la experiencia de la alta y media gerencia y los elementos de la racionalidad objetiva dada por el análisis estadístico realizado a las operaciones en minas, determinaron las variables y parámetros del sistema de carga y acarreo, bajo un enfoque sistémico.

Dentro de las variables de mayor impacto definidas en el modelo conceptual del sistema de carga y acarreo de mineral se encuentran: la condición del frente de excavación, producto del resultado de la voladura; la relación mena/mpnc; rendimiento de equipos de carga y acarreo; condiciones de las rutas; distancias de acuerdo a perfiles de acarreo; velocidad máxima de seguridad; destinos habilitados por tipo de material; entre otros. Este modelo contribuye al análisis de estos sistemas partiendo de cuatro componentes: frente de excavación – equipos – rutas y destinos. Permitiendo un análisis bajo una visión integradora de las operaciones en minas.

La modelación del sistema a través de una Red de Petri, representada como una red de transporte, permitió definir los frentes de excavación en donde se ubica el equipo de carga, como nodos oferentes; los sitios de descarga o destinos como nodos demandantes y las rutas entre estos puntos como los arcos del sistema. Bajo esta configuración, la función objetivo se fundamentó en la maximización del volumen de carga y acarreo de material (mena/mpnc), efectuada por palas- cargadores frontales y camiones, desde el frente de excavación hasta sus respectivos destinos (planta, muelle, depósitos).

El modelo conceptual, evidenció el carácter dinámico, complejo y variante del sistema de carga y acarreo de mineral, lo cual sirvió como plataforma para el diseño de una herramienta computacional bajo el lenguaje JAVA SCRIPT [21], que admite la configuración de las entidades descritas anteriormente; lo que significa una ventaja comparativa sobre otros modelos, porque permite combinar escenarios de acuerdo a variables no convencionales cómo: condición de frentes de excavación, flotas heterogéneas, relación mena/mpnc, condición de las rutas, perfil de acarreo y distintos destinos de descarga. Esto, considerando restricciones como la velocidad máxima de acarreo para distintas rutas; restricción de equipo de carga por frente de excavación; y la carga de camiones, dada su máxima capacidad.

Esta herramienta computacional, permitirá a la gerencia de minería a cielo abierto la simulación del sistema de carga - acarreo de mineral, fundamentado en parámetros de eficiencia y productividad, así como la

configuración en función de las premisas encontradas en el plan de mina. Estas premisas, están relacionadas principalmente con las distintas combinaciones de equipos mineros, dada la disponibilidad física y especificaciones de calidad del mineral.

REFERENCIAS

- [1]Anglo American (2018, mayo, 8). Anual Report 2017: Building on Firm Foundations Delivering a Sustainable Future [Online]. Recuperado: <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/documents/annual-updates-2018/aa-annual-report-2017.pdf>
- [2]Banco Mundial, ¿Dónde está la riqueza de las naciones? Medir el capital para el siglo XXI. Colombia: Mayor Ediciones S.A., 2009.
- [3]L. Salomón, A. Ortiz y V. Cordero, “Enfoque Sistémico en el Análisis de Operaciones en Minería a Cielo Abierto”, en XIV Jornadas de Investigación Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UNEXPO), Puerto Ordaz, Bolívar, 2016, pp. 160-165.
- [4]M. Romero, “Análisis de la productividad de empresas productoras de mineral de hierro: CVG Ferrominera Orinoco, C.A. vs Empresas Internacionales”, Trabajo de Grado de Maestría, Universidad Católica Andrés Bello (UCAB), Ciudad Guayana, Bolívar, 2004.
- [5]C. Burt, and L. Caccetta, “Match factor for heterogeneous truck and loader fleets”, International journal of mining, reclamation and environment, vol.21, no.4, pp. 262 – 270, 2007.
- [6]C. Burt, “An optimisation approach to materials handling in surface mines”, PhD. Tesis, Mathematics and Statistics, Curtin University of Technology, Bentley, Perth, Australia, 2008.
- [7]S. Alarie, and M. Gamache, “Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines”, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, vol.16, no.1, pp.59–76,2002.
- [8]S. Ercelebi, and A. Bascetin, “Optimization of shovel-truck system for surface mining”, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 109, July 2009.
- [9]L. Bertalanffy, Teoría general de los sistemas. México: Fondo de Cultura Económica, 1968.
- [10]L. Bertalanffy, Tendencias en la Teoría General de Sistemas. Madrid: Alianza, 1981.
- [11]R. Ackoff, El paradigma de Ackoff. Una administración Sistémica. México: Limusa, S.A., 2004.
- [12]C. Petrella (2007, junio). Aportes del Enfoque Sistémico a la comprensión de la realidad [Online]. Recuperado:<http://www.fing.edu.uy/catedras/disi/DISI/pdf/>

Teoriadesistemasaplicadoaorganizaciones.pdf

[13] J. Hurtado, El proyecto de investigación: comprensión holística de la metodología y la investigación. Caracas: Ediciones Quirón-Sypal, 2010.

[14] Ferrominera Orinoco, Proceso de Explotación de Mineral de Hierro. Jefatura de Área de Planificación de Mina, Ciudad Piar, 2015.

[15] L. Salomón, “Modelo de Optimización de Sistemas de Acarreo de Mineral en Minas a Cielo Abierto”, Ferrominera Orinoco, Ciudad Piar, Informe Pasantía, 2016.

[16] R. Myers, D. Montgomery, and C. Anderson, Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments. 4ta ed. New York: John Wiley and Sons, Inc, 2002.

[17] L. Salomón, A. Ortiz, y M. D’Armas, “Análisis Estructural de la Minería de Hierro”, en 15 th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Global Partnerships for Deve-

lopment and Engineering Education, Boca Raton FL, July 2017, pp. 1-7.

[18] L. Murillo, “Redes de Petri: Modelado e implementación de algoritmos para autómatas programables”. Tecnología en Marcha, vol. 21, no. 4, pp. 102-125, octubre-diciembre 2008.

[19] L. Salomón, A. Ortiz y V. Cordero, “Productividad del proceso minero, más allá de la producción”, Revista Universidad, Ciencia y Tecnología, vol.22, no. 89, pp. 04-16, diciembre 2018.

[20] L. Salomón, y A. Ortiz, “Sistemas de carga y acarreo de mineral en minas a cielo abierto”, Revista Mundo Ferrosiderúrgico, vol.04, no. 21, pp. 23-30, noviembre -diciembre 2015.

[21] S. Molea, U. Silva, “Prototipo de simulación del proceso de carga y acarreo de mineral todo en uno (TEU). Caso: Ferrominera Orinoco- Ciudad Piar”, Trabajo de Grado, Universidad Nacional Experimental de Guayana (UNEG), Puerto Ordaz, Bolívar, 2019.

RESUMEN CURRICULAR



Liliana María Salomón López, Ingeniero Industrial (UNEG, 1999). Magister en Gerencia, mención Operaciones y Producción (UNEG, 2011); Trabajo de Grado con Mención Publicación. Doctorante en Ciencias de la Ingeniería (UNEXPO –actual). Profesora Agregado Departamento de Ciencia y Tecnología – Área de Conocimiento Matemática, en las asignaturas Estadística I y II en los Proyectos de Carrera de Ingeniería Industrial e Informática, Universidad Nacional Experimental de Guayana (2003-actual). Responsable del Departamento de Ciencia y Tecnología ante el Consejo de Publicaciones de la UNEG (Periodo 2006 -2010). Editora de la Revista del Departamento de Ciencia y Tecnología (CITEG) (Periodo 2007 -2010). Secretaria de Junta Directiva de la APUNEG (Periodo 2007 -2009). Secretaria de Junta Directiva del Fondo de Jubilaciones y Pensiones del Personal Docente (Periodo 2010-2012).



Ortiz Useche, Ingeniero Industrial (UNET, 1982), Magister en Gerencia, mención Operaciones y Producción (UNEG, 1998). Doctor Industrial (2013), Universidad Politécnica de Madrid, España (UPM). Amplia experiencia laboral en Ferrominera Orinoco (1983-2002), que comprendió el desempeño en las operaciones de producción minera; la implementación del Proyecto de Productividad en la Gerencia de Ferrocarril; Jefe de Planificación de la Calidad y Jefe de Ingeniería Industrial. Profesor Asociado Jubilado de la Universidad Nacional Experimental de Guayana. Consultor Integral en el Manual FIM Productividad – Formado por FIM PRODUCTIVIDAD. Consultor en la norma CVG Excelencia de Gestión – Formado por OMEGA Consultores. Auditor Líder Norma ISO 9000 – Formado por FUNDAMETAL. Consultor del Programa de Asistencia Integral a la Pequeña y Mediana Empresa, (Paipyme Pard) "Gestión Empresarial: Programa Para la Excelencia" programa auspiciado por Petróleos de Venezuela.