

Aplicación del modelo de colas al acarreo minero. Caso Mina Magistral

Using the queuing theory in mine haulage. Case of Magistral mining operation

Oswaldo Ortiz Sánchez*, Godelia Canchari Silverio**

Recibido: Agosto 2015 - Aprobado: Diciembre 2015

RESUMEN

El estudio minimiza el tiempo improductivo o tiempos de espera de los equipos de carguío y acarreo entre puntos de carguío en interior mina y los puntos de descarga en superficie. Para ello se analiza el sistema existente que consiste en 4 puntos de carguío de materiales en interior mina y 4 puntos de descarga en superficie. Por aplicación de herramientas del modelo de colas se estima el costo de la espera y luego se estudia la posibilidad de reducir este costo incrementando puntos de carguío. La información que se analiza proviene de los tiempos de acarreo y demoras generadas entre los puntos de carguío y los puntos de descarga. La variable que se evalúa es el número de puntos de carguío vs. el costo de la demora de los transportadores más el costo unitario del uso de las tolvas en interior mina.

Palabras clave: Modelo; colas; interior mina; superficie; carguío; descarga; acarreo.

ABSTRACT

The study minimizes the cycle waiting time of loading and hauling equipment between loading points of the underground mining operation and unloading points on surface. For this purpose the existing loading and hauling system is first analyzed. Present system consists of four underground loading points and 4 unloading spots on surface. The waiting cost is estimated and then the increment in loading points underground is proved for reducing haulage cost which is a bearing component of the mining cost. By applying queuing techniques the possible reduction in waiting cost is obtained by increasing the number of loading points. The information gathered comes from loading and hauling times measured at site. Evaluated variables were number of loading points vs. waiting time cost of haulers and unit cost of underground ore and waste bins.

Keyword: Model; queuing; mine interior; surface; loading; unloading; hauling.

* Docente EAPIM unmsm - Email: oortiz@unmsm.edu.pe

** Docente EAPIM unmsm - Email: gcanchari@unmsm.edu.pe

I. INTRODUCCIÓN

En el acarreo de mineral y estéril de mina a superficie, se presenta el problema del mayor costo de acarreo por generación de tiempos de espera generalmente en los puntos de carguío en interior mina. Estos materiales provenientes de diferentes tajeos de la operación de minado, se almacenan en tolvas en interior mina para acarrearlos posteriormente a tolvas externas en superficie si es mineral y a botaderos de superficie si es estéril. El método más simple y versátil de acarreo a superficie es el camión de volteo posterior que, de acuerdo al número de unidades en operación, va a generar tiempos de espera que pueden tener un costo unitario elevado dependiendo del tamaño del equipo y otras variables. A mayor tamaño de camión mayor costo de la espera pero también menor costo unitario estando limitado además por la pendiente de la vía y las características de las tolvas en interior mina.

II. OBJETIVO DEL ESTUDIO

Minimizar el costo de operación mina por reducción del costo de la espera de la flota de camiones de volteo posterior por aplicación de los modelos de colas o líneas de espera. Analizar los puntos de carguío en relación al costo de acarreo incrementando o reduciendo estos puntos para bajar el costo de operación mina. Adicionalmente, se trata de aplicar un modelo de colas a un problema de simulación.

III. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

La reducción del costo de operación mina mediante aplicación de herramientas tales como simulación o teoría de colas es de gran importancia. En este caso se pretende utilizar herramientas matemáticas que nos ofrece el modelo de colas. El costo de la espera de la flota de acarreo puede minimizarse aplicando modelos de espera que eliminen o reduzcan al mínimo el tiempo perdido por los camiones de volteo posterior para lo cual debe contarse con un historial de acarreo y el ciclo del sistema. Simulación también puede aplicarse al problema propuesto pero requiere contar con un paquete de simulación costoso que no siempre está al alcance de operaciones mineras medianas y pequeñas. Generalmente en el ciclo de acarreo la variable es el número de transportadores que debe incrementarse o disminuirse

para minimizar la espera del sistema (cargadores + transportadores). En este estudio la variable es el número de puntos de carguío en interior mina que son tolvas fijas que pueden variar en número para minimizar los tiempos de espera de los transportadores y cargadores.

IV. DESARROLLO DEL ESTUDIO

4.1 Secuencia del estudio

Se procedió a la recopilación de información estadística de campo relacionada con el ciclo de acarreo en 4 perfiles entre interior mina y superficie. Se desglosó el ciclo en sus componentes tomando mediciones de campo de cada variable como: Estacionamiento para cargar, carguío, viaje cargado, viaje vacío, tiempo de estacionamiento para descargar y tiempo de descarga. Estas mediciones permitieron trazar curvas históricas de los componentes del ciclo. Para completar la información requerida se genera en el gabinete las variables del ciclo usando números aleatorios normales en base a las curvas históricas de los componentes del ciclo. El análisis de gran cantidad de información da confiabilidad al resultado. El método permite aceptar o rechazar la instalación de nuevos puntos de carguío y descarga basados en el costo mínimo del sistema.

4.2 Características del acarreo en mina Magistral.

Este sistema abastece mineral a la planta de concentración y acarrea el material estéril a los botaderos en superficie trabajando dos guardias por día de 8 horas c/u.

El perfil del acarreo consta de una rampa con dos tramos a pendientes de 10 % y 14 % con una sección de 6 x 5 m. en interior mina y un tercer tramo de vía a 0% pendiente en superficie. La rampa es afirmada y se inicia en bocamina con una longitud de 2 km en terreno firme y competente.

Los 4 puntos de carguío o tolvas de mineral o estéril se ubican a lo largo de la rampa. Los perfiles de acarreo mina-superficie se muestran en las Figs. N° 1 y 2 para mineral y desmonte respectivamente. Camiones volquete 6 x 4 son cargados con mineral o desmonte en estas tolvas. La distancia de transporte varía entre 1.90 a 3.00 km.

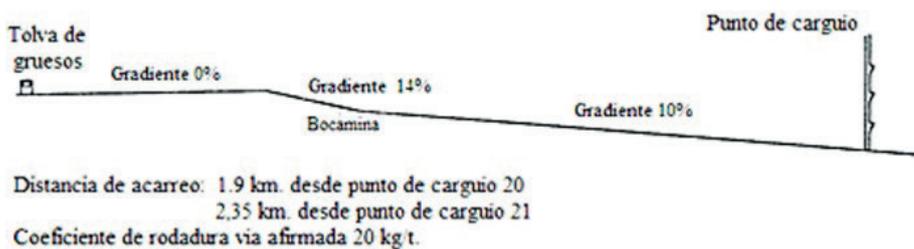


Figura N°1. Perfil de acarreo de mineral entre puntos de carguío N°s. 20 y 21 y tolva en superficie

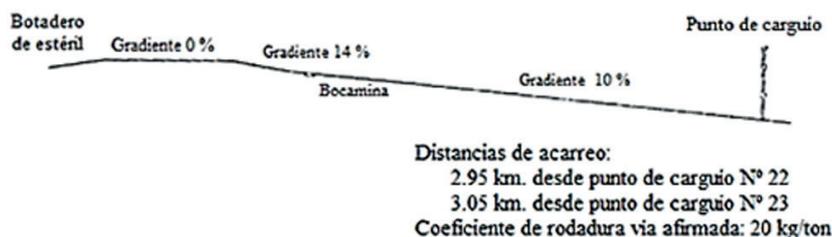


Figura N°2. Perfil de acarreo de estéril entre puntos de carguío N°s. 22 y 23 y botaderos

En el Anexo se dan los detalles del muestreo de los componentes de los ciclos de acarreo en mineral y estéril. Los ciclos promedios de transporte para mineral y desmonte se dan en las tablas 1 y 2 respectivamente. La tabla N° 3 presenta el promedio de los componentes del acarreo.

Tabla N° 1. Acarreo de mineral entre punto de carguío y planta de tratamiento*

Punto carguío	Distcia km	tvc. min.	tvv min.	td min.	tc min.	vc km/h	vv. km/h	Ciclo min.
20	1.90	7.42	3.94	0.72	6.37	14,50	20.00	18.49
21	2.35	8.19	4.22	0.72	6,20	13.50	20.00	19.33
Pmd	2.13	7.81	4.08	0.72	6.29	14.00	20.00	18.91

Tabla N° 2. Acarreo de estéril entre punto de carguío y botaderos*

Punto carguío	Distcia km	tvc. min.	tvv min.	td min.	tc min.	vc km/h	vv. km/h	Ciclo min.
22	2.95	9.54	5.13	0.68	6.38	14,50	20.00	21.73
23	3.05	10.04	4.81	0.69	5.55	14.00	16.50	21.09
Pmd	3.00	9.79	4.97	0.68	5.97	14.25	18.25	21.41

Tabla N° 3. Acarreo promedio de los 4 puntos de carguío*

Punto carguío	Distcia km	tvc. min.	tvv min.	td min.	tc min.	vc km/h	vv. km/h	Ciclo min.
Minrl	2.13	7.81	4.08	0.72	6.29	14,00	20.00	21.90
Esterl	3.00	9.79	4.97	0.68	5.97	14.25	18.25	21.42
Med. t	2.57	8.80	4.53	0.70	6.83	14.13	19.13	20.16

*tvc = tiempo de viaje cargado,

tvv = tiempo de viaje vacío,

td = tiempo de descarga,

tc = tiempo de carguío,

vc = velocidad cargado,

vv = velocidad vacío.

Tolvas 20 y 21 para mineral están ubicadas en interior mina, tienen el mismo perfil diferenciándose por su longitud de acarreo. Tolvas 22 y 23 para desmonte están ubicadas en la misma ruta pero a diferente distancia de recorrido. Todas las tolvas son accionadas por un sistema neumático que facilita la descarga sobre los camiones volquete y son operados por el mismo conductor del equipo de acarreo.

4.2.1. Equipo de Acarreo

La flota de acarreo está formada por 8 camiones Volvo de volteo posterior de 400 hp c/u equipados con tolva de 12 m³ o 20 tm. de capacidad.

4.2.2. Costo de equipo de acarreo

La tabla N° 4 presenta el costo unitario de producción de los equipos de acarreo constituido por los costos de operación y de propiedad.

Tabla N° 4. Costo de producción de camiones de acarreo US \$/h

Camión N°	Edad Años	Costo operac.	Costo capital	Costo produc.
1	10	40.40	8.80	49.20
2	08	38.70	9.00	47.70
3	07	37.60	10.20	47.80
4	07	36.80	10.10	46.90
5	05	33.60	34.70	68.30
6	05	33.50	34.70	68.20
7	03	28.50	44.50	73.00
8	03	28.30	44.50	72.80
Promedio		35	25	59

4.2.3. Carguío de Equipo de Acarreo

El carguío de los camiones se efectúa en tolvas con descarga de tipo neumático en interior mina tanto para mineral como para desmonte. Estas tolvas en número de 4 están instaladas a lo largo de la rampa y son dos para mineral de los tajeos subterráneos y dos acumulan estéril de las diferentes labores subterráneas.

4.2.4. Tolvas Neumáticas

Usan aire comprimido y son instalaciones que poseen una compuerta inferior accionada neumáticamente a voluntad del operador del camión. Su ciclo de apertura y cierre está en el orden de 10 a 15 segundos pero en el carguío el operador requiere controlar la salida del material por lo que puede tomar hasta 7 minutos siendo este tiempo también variable.

4.2.5. Costo de operación tolvas

El costo de operación de las tolvas neumáticas consta de la suma de los costos de aire comprimido, lubricación, materiales y reparación. El costo de capital no se incluye por considerar que se fabrican en la misma operación minera con material sobrante y están contabilizadas en otra área.

Costo del aire comprimido: Altitud de operación 4,200 msnm, presión atmosférica 0.56 bar, consumo de aire (CA) 64.7 pcm.

Luego: CA = 64.7 pcm. /34.6 pc/m³ = 1.87 m³/min. = 112.27 m³/hora

Por lo tanto:

. Costo aire comprimido: 112.27 x \$ 0.066/m³ \$/hora 7.41

. Lubricación: 0.02

. Materiales y reparación: 0.24

. Costo operativo total tolva \$/hora 7.67

La información estimada se usará en los modelos de línea de espera.

V. MODELO DE COLAS EN EL ACARREO DE MINA

5.1. Concepto General

Las líneas de espera se generan cuando unidades que llegan a recibir servicio deben esperar antes de que puedan obtenerlo. Si se conocen las leyes que gobiernan las llegadas, los tiempos de servicio y el orden en que las unidades que llegan se atienden, la espera puede analizarse matemáticamente.

Para simplificar el análisis se supone que la cola es estable donde la probabilidad de que “n” unidades que están en espera en cualquier instante, permanece igual en el tiempo.

A cualquier cola se asocia dos distribuciones: Una de entrada que describe el tipo de llegada o sea los intervalos de tiempo entre llegadas de los clientes al punto de servicio. La otra distribución es del tiempo de servicio (Hillier F, K. y otro, 1998, p. 683).

Las colas pueden ser de una o más líneas de espera con uno o más puntos de servicio y pueden tener fuente infinita o finita. Para el caso de este estudio se tiene el modelo de servicio múltiple de población finita.

En general la llegada de clientes no ocurre a intervalos regulares en el tiempo sino que tienden a agruparse o repartirse de cierta manera (Eppen G. D. y otros, 1997, p 593). La suposición de Poisson especifica este comportamiento postulando la existencia de una constante “λ” independiente del tiempo, de la longitud de la cola y de cualquier otra propiedad aleatoria de la misma tal que la probabilidad de una llegada entre el tiempo t y el tiempo t + Δt es λ Δt. para un intervalo

Δt pequeño. “λ” es la tasa media de llegadas de poisson o número de llegadas por unidad de tiempo y el tiempo medio entre llegadas consecutivas es 1/λ. Solo puede darse servicio si hay en el sistema una unidad que lo requiera. El tiempo de servicio sigue una distribución exponencial con tasa media de servicio “μ” y tiempo medio de servicio 1/μ. Para el caso de población finita donde M es la población total de clientes (camiones) y “n” es el número de clientes en el sistema, cualquier llegada provendrá de los M – n elementos que no están en el sistema. Entonces, la probabilidad que un cliente requiera servicio es: (M – n) μ (Mathur K. y otro, 1996, p. 738).

5.2 Modelo de cola de servicio múltiple

Este es el caso del sistema de acarreo en la mina Magistral, entre los puntos de carguío en interior mina y los puntos de descarga en superficie. Se plantea que existen k estaciones de servicio tal que 1 < k ≤ M.

Las expresiones que se aplican requieren la probabilidad P₀ de tener el sistema sin clientes (camiones) cuya expresión es (Taha H. A., 1981, p. 468):

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{n=k-1} \frac{M!}{(M-n)! n!} (\lambda/\mu)^n + \sum_{n=k}^{n=M} \frac{M!}{(M-n)! k! k^{n-k}} (\lambda/\mu)^n}$$

También, la probabilidad P_n de tener “n” clientes en el

sistema se calcula mediante las expresiones:

$$P_n = P_0 M! / [(M-n)! n!]. (\lambda / \mu)^n$$

cuando 0 < n ≤ k y

$$P_n = P_0 M! / [(M-n)! k! k^{n-k}]. (\lambda / \mu)^n$$

cuando k ≤ n ≤ M

El número esperado de clientes en el sistema (CS) se calcula mediante la expresión:

$$CS = \sum_{n=0}^{n=k-1} n P_n + \sum_{n=k}^{n=M} (n - k) P_n + k(1 - \sum_{n=0}^{n=k-1} P_n)$$

y el número esperado de clientes en cola (Lq) es:

$$Lq = \sum_{n=k}^{n=M} (n - k) P_n$$

Estas expresiones se aplican a colas finitas. Los modelos para colas infinitas son semejantes.

5.3. Recolección y análisis de datos

Las llegadas de los camiones a los puntos de carguío tanto en mineral como en desmonte fueron tomadas en el campo para las cuatro tolvas de carguío en interior mina. En estos puntos los conductores de los camiones proceden al llenado de las tolvas de sus unidades de acarreo accionando las descargas neumáticas de los chutes de las tolvas. Se registró además de llegadas, los tiempos de carguío en los 4 puntos como se indica en el Anexo. Estos tiempos permitieron el trazo de histogramas y de estos se obtuvieron distribuciones de frecuencia.

Para el cálculo de los histogramas se ordenaron los datos de menor a mayor obteniendo el número de intervalos de clase mediante la fórmula k = 1 + 3.2 log(n) donde k es el intervalo de clase y n el número de observaciones. Se estimó además el tamaño del intervalo de clase (C) mediante la expresión C = R/k donde R es el rango de variación de los tiempos de llegada y carguío en cada caso. La tabla N° 5 muestra los detalles.

Tabla N° 5. Resumen de datos para trazado de histogramas en 4 puntos de carguío

Punto carguío	Nº	Rango R	Intervalo k	Tamaño intervalo (C)
20	84	10.29 -12.90	7	0.37
21	81	10.29 -14.54	7	0.61
22	94	8.00 - 11.00	7	0.43
23	76	8.50 - 12.27	7	0.40

Punto carguío	Nº	Rango R	Intervalo k	Tamaño intervalo (C)
20	84	1.98 -10.85	7	1.27
21	81	1.98 - 8.00	7	0.86
22	94	1.98 -10.98	7	1.29
23	76	1.98 - 8.00	7	0.86

Las llegadas que se obtuvieron fueron de tipo poisson y los de servicio siguen curvas exponenciales.

5.4. Aplicación del Modelo

Para el uso de los modelos dados se requiere suponer que las llegadas a los puntos de carguío siguen una distribución poisson y los tiempos de servicio o carguío se ajustan a una distribución exponencial lo cual se cumple en la información recopilada.

5.4.1. Variables

Tiempo medio de llegadas de Tabla N° 3:

$$1/\lambda = 20.16 - 6.13 = 14.03 \text{ min. o sea } \lambda = 0.071$$

Tiempo medio de carguío de Tabla N° 3:

$$1/\mu = 6.13 \text{ min. O sea } \mu = 0.1631$$

5.4.2. Solución del modelo.

Los datos de campo fueron compilados y

ordenados para cada punto de carguío de los ciclos de acarreo que constan de 4 componentes: tiempo de carguío (tc), tiempo de viaje cargado (tvc), tiempo de viaje vacío (tvv) y tiempo de descarga (td). La información se presenta en el Anexo.

Se calcula la probabilidad de que no exista ningún transportador (camión) en el sistema (P_0) para $1 \leq k \leq M$. donde k = número de tolvas de almacenamiento en interior mina y M = número de camiones o clientes.

La tabla N° 6 presenta la tabulación de P_0 para diferente número de camiones (clientes) en el caso de llegadas en los intervalos $0 \leq n \leq k$ y $k \leq n \leq M$.

Tabla N° 6. P_0 vs. n° de camiones

n	M	$(\lambda/\mu)^n$	$[M!(\lambda/\mu)^n]/[(M-n)!n!]$	$\sum_{n=0}^{n=k-1}$
0	8	1	40320/40320*1 (1)	1.000
1	8	0.568	40320/5054*1(0.567)	4.533
2	8	0.323	40320/720*2(0.3225)	9.030
3	8	0.183	40320/120*6(0.1831)	10.254
Total				24.827
k=n-M				
4	8	0.104	40320/(24*24*1)(1)	1,001
5	8	0.059	40320/(6*24*4) (0.059)	4.130
6	8	0.033	40320/(2*24*16) (0.033)	1.731
7	8	0.019	40320/(1*24*64 (0.019)	0.498
8	8	0.010	40320/(1*24*256)(0.010)	0.966
Total				13.703

Luego $P_0 = 1 / (24.8268 + 13.703) = 0.03$.

Se tiene por lo tanto 3 % de probabilidad que el sistema esté vacío.

Luego:

$$P_n = P_0 M ! . (\lambda / \mu)^n / [(M - n) ! . n !] \text{ para } 0 \leq n \leq k \text{ y}$$

$$P_n = P_0 M ! . (\lambda / \mu)^n / [(M - n) ! . k ! . k^{n-k}] \text{ para } k \leq n \leq M$$

La tabla N° 7 presenta la tabulación para estos dos casos.

Tabla N° 7. P_n vs n° de camiones

n	M	$(\lambda/\mu)^n$	$P_0 [M!(\lambda/\mu)^n]/[(M-n)!k^{n-k}]$	
0	8	1.0000	0.03*40320*1 (1) 0.030	
1	8	0.5679	0.03*40320 / 5054*1 (0.5679) 0.136	
2	8	0.3225	0.03*40320 / 720*2 (0.3225) 0.271	
3	8	0.1832	0.03*40320 / 120*6 (0.1831) 0.307	
4	8	0.1040	0.03*40320 / 24*24 (0.1040) 0.210	
k ≤ n ≤ M				
4	8	0.104	0.03*40320 / (24*24*1)(0.104) 0.210	
5	8	0.059	0.03*40320 / (6+24*4) (0.059) 0.120	
6	8	0.033	0.03*40320 / (2*24*16) (0.033) 0.052	
7	8	0.019	0.03*40320 / (1*24*64 (0.019) 0.014	
8	8	0.010	0.03*40320 / (1*24*256)(0.010) 0.002	

Número de camiones en cola:

$$Lq = \sum_{n=k}^{n=M} (n - k) P_n$$

$$Lq = (4 - 4)*0.21 + (5 - 4)*0.12 +$$

$$(6 - 4)*0.052 + (7 - 4)*0.014 + \dots + (8 - 4)*0.002 = 0.2736$$

Para un ciclo de 13.33 minutos equivalentes a 0.22 horas se tiene: $L_q = 0.2736 / 0.22 = 1.24$

camiones/ hora.

Luego: Tiempo de espera / día de dos guardias 8 horas c/u.
 $Te = 8 \times 2 \times 1.24 = 19.84$ horas

5.5. Resultados sin cambios

Con los resultados anteriores se calcula el costo total de la espera del sistema de acarreo en las condiciones actuales entre las 4 tolvas ubicadas en interior mina y los puntos de descarga tanto en planta de concentración como en botaderos.

El costo total medio de acarreo es de US \$ 59.20/hora (Tabla N° 4) y el costo de operación de las tolvas se calculó en US \$ 7.70/hora. Los costos unitarios toman en cuenta 4000 horas de operación por año. Por lo tanto:

$$\text{Costo total anual de flota de acarreo} = 4000 \text{ hrs/año} \times 8 \text{ camiones} \times \text{US } \$ 59.20 = \text{US } \$ 1'894,400.$$

$$\text{Tiempo de espera/año: } 310 \text{ días/año} \times Te = 310 \text{ días/año} \times 19.84 \text{ hrs/día} = 6150 \text{ horas/año.}$$

Para un tiempo de carguío de 6.83 minutos/camión ó 0.1140 hrs/camión se tendrá:

$$\text{Costo de carguío US } \$/\text{hora} = 0.1140 \times 7,67 = 0.87$$

Luego: Costo total de acarreo de un camión en el sistema = Costo del camión + Costo de carguío:

$$59.27 + 0.87 = \text{US } \$ 60.14.$$

Costo de la espera = $60.14 \times 6150 \text{ h/año} = \$ 369,861$. Este monto representa el 19.52 % del costo de mantener la flota de camiones en el sistema.

5.6. Análisis con cambios

5.6.1. Carguío en 5 puntos

El acarreo actual tiene una pérdida de 19.84 horas/día que representa el 19.52 % del costo total de acarreo externo. Esta pérdida puede minimizarse agregando una tolva adicional de carguío en interior mina sin variar el número de transportadores. El análisis sigue las mismas pautas del caso anterior pero cambiando k a 5 tolvas de carguío. La tabla N° 8 presenta los cálculos para los casos

$$0 \leq n \leq k \text{ y } k \leq n \leq M.$$

Tabla N° 8. P₀ vs. n° de camiones para 5 tolvas de carguío

n	M	(λ/μ) ⁿ	[M!(λ/μ) ⁿ]/[(M-n)!n!]	Σ _{n=0} ^{k-1}
0 < n ≤ k				
0	8	1	40320/40320*1 (1)	1.000
1	8	0.568	40320/5054*1(0.567)	4.533
2	8	0.323	40320/(720*2)(0.3225)	9.030
3	8	0.183	40320/(120*6)(0.1831)	10.254
4	8	0.104	4032/(24*24) (0.1040)	7.280
Total				32.192
k ≤ n ≤ M				
5	8	0.059	40320/(6*120*1) (0.059)	3.340
6	8	0.033	40320/(2*120*5) (0.033)	1.108
7	8	0.019	40320/(1*120*25)(0.019)	0.255
8	8	0.010	40320/(1*120*125)(0.010)	0.066
Total				4.694

Con los datos anteriores calculamos el P₀:

para los dos intervalos: $0 \leq n \leq k \text{ y } k \leq n \leq M.$

$$P_0 = 1 / (32.192 + 4.694) = 0.0272$$

Lo cual nos indica que hay un 2.72 % de probabilidad de que el sistema se encuentre vacío.

Luego calculamos el P_n. La Tabla N° 9 presenta los detalles.

Tabla N° 9. P_n vs n° de camiones para 5 tolvas de carguío

n	M	(λ / μ) ⁿ	P ₀ [M !. (λ / μ) ⁿ] / [(M - n) k ! k ^{n-k}]
0 ≤ n ≤ k			
0	8	1.0000	0.027*40320*1 (1) 0.027
1	8	0.5679	0.027*40320/5040 1 (0.5679) 0.380
2	8	0.3225	0.027*40320 /720*2 (0.3225) 0.271
3	8	0.1832	0.027* 40320 / 120*6 (0.1831) 0.276
4	8	0.1040	0.027*40320 / 24*24 (0.1040) 0.196
5	8	0.0590	0.027*40320 / 6*120 (0.0590) 0.089
k ≤ n ≤ M			
5	8	0.059	0.027*40320 / (6*120*1) (0.059) 0.0890
6	8	0.033	0.027*40320 / (2*120*5) (0.033) 0.0299
7	8	0.019	0.027*40320 / (1*12*25) (0.019) 0.0068
8	8	0.010	0.027*40320 / (1*12 *125) (0.010) 0.0007

Con estos datos determinamos el número de camiones en cola (L_q):

$$L_q = (5 - 5) \times 0.089 + (6 - 5) \times 0.0299 + (7 - 5) \times 0.0068 + \dots + (8 - 5) \times 0.0007 = 0.04587 \text{ camiones/ciclo}$$

$$L_q = 0.04587 / 0.22 = 0.2085 \text{ camiones / hora}$$

Luego: Tiempo de espera/día = 0.2085 x 16 = 3.336 horas/día.

5.6.2. Resultados para cinco puntos

El costo anual de mantener la flota de camiones con 4 puntos de carguío es US \$ 1'896,640.

Costo anual de la flota de camiones al agregar la quinta tolva:

$$\text{Horas perdidas/año} = 310 \text{ días / año} \times 3.336 \text{ horas/día} = 1034.16$$

$$\text{Costo de la espera} = 60.14 \text{ US \$/hora} \times 1034.16 \text{ horas/año} = \text{US \$ } 62,194 \text{ /año.}$$

Este costo representa el 3.3 % del costo anual de mantener la flota de transportadores del sistema de acarreo. El sistema con 4 tolvas de carguío representa el 19.52 % del costo de transporte.

VI. CONCLUSIONES

El modelo de colas permite determinar los tiempos de espera o tiempos improductivos de transportadores de una operación minera. En la mina Magistral los costos de espera generan un gasto adicional de US \$ 369,860 por año constituyendo el 19.52 % del costo de acarreo.

- Agregando una tolva de carguío en interior mina se reduce el costo que originan los tiempos de espera de 19.52 % a 3.3 % lo que representa un gasto de solo US \$ 62,194 /año.
- La aplicación del modelo de colas nos permitió cuantificar en forma simple y rápida y a bajo costo la magnitud del ahorro esperado en el sistema de acarreo entre mina y superficie.
- Para afinar el ajuste de las curvas teóricas a los datos reales debe efectuarse muestreo adicional de campo ya que las distancias de acarreo van cambiando tanto en interior mina como en superficie especialmente la ubicación de los botaderos de estéril. Cambiar el número de unidades de acarreo para probar la influencia de esta variable en la reducción del tiempo de espera.

No obstante en este caso se tendría que variar el número de unidades en la flota de acarreo para analizar la mayor o menor inversión en camiones y compararlo con la mayor inversión en tolvas de mineral y desmonte en interior mina que a su vez está influenciada por el plan de minado subterráneo.

VII. ANEXO

DATOS DE CAMPO DEL CICLO DE ACARREO MINA - SUPERFICIE

Ciclo de acarreo de mineral. Carguío de camión en Tolva N° 21 (min)								
Ida	Descarga	Retorno	Carguío	Ida	Descarga	Retorno	Cargío	Fecha
cargado		vacío		cargado		vacío		
8.40	0.70	4.80	8.00	7.50	1.00	4.00	5.50	may-16
9.30	0.80	5.58	4.00	10.00	0.79	4.70	1.98	may-16
8.30	0.70	4.76	8.00	9.70	0.70	5.05	5.50	may-16
7.50	0.80	4.04	4.00	8.10	0.69	4.98	1.98	may-16
9.50	0.70	5.00	6.12	10.50	0.70	5.07	8.00	may-16
8.60	0.71	6.08	8.00	9.85	0.69	5.00	8.00	may-16
8.40	0.70	4.80	8.00	7.50	1.00	5.00	5.50	may-16
9.30	0.80	6.58	4.00	10.00	0.69	5.30	1.98	may-16
8.30	0.70	4.70	8.00	9.70	0.70	4.10	5.50	may-16
7.50	0.80	5.58	4.00	8.10	0.69	5.30	1.98	may-16
9.50	0.70	5.20	2.00	10.50	0.70	4.07	8.00	may-16
8.60	0.71	4.08	8.00	9.85	0.69	4.00	8.00	may-16
8.40	0.70	4.80	8.00	7.50	1.00	4.00	5.50	may-16
9.30	0.80	3.58	4.00	10.00	0.69	4.30	1.98	may-16
8.30	0.70	4.07	8.00	9.70	0.70	4.00	5.50	may-16
7.50	0.80	3.58	4.00	8.10	0.69	4.30	1.98	may-16
10.50	0.70	4.07	8.00	8.60	0.71	4.08	8.00	may-16
9.85	0.69	4.00	8.00	6.00	0.71	3.58	7.00	may-16
7.50	0.70	4.06	5.50	7.30	0.70	3.58	4.00	may-16
8.25	0.69	4.30	10.98	7.53	0.75	4.07	8.00	may-16
8.10	0.71	4.08	8.00	7.85	0.69	4.00	8.00	may-16
6.10	0.71	3.58	7.00	7.20	0.70	4.00	5.50	may-16
7.85	0.69	4.00	8.00	6.00	0.71	3.58	7.00	may-16
7.85	0.69	4.00	8.00	6.00	0.71	3.58	5.50	may-16
7.50	0.70	4.07	8.00	8.05	0.71	4.08	8.00	may-16
7.85	0.69	4.00	8.00	6.00	0.71	3.58	7.00	may-16
8.85	0.69	4.00	8.00	6.00	0.71	3.58	7.00	may-16
7.00	0.70	4.00	5.50	7.30	0.80	3.58	4.00	may-16
8.00	0.69	4.30	1.98	7.50	0.70	4.07	8.00	may-16
8.00	0.71	4.08	6.00	7.85	0.69	4.00	8.00	may-16
6.00	0.71	3.58	7.00	7.00	0.70	4.00	5.50	may-16
8.00	0.69	4.30	1.98	7.50	0.70	4.07	8.00	may-16
8.00	0.70	4.00	5.50	9.30	0.80	3.58	4.00	may-16
8.00	0.69	4.30	1.98	7.50	0.70	4.07	8.00	may-16
9.00	0.70	4.00	5.50	9.30	0.80	3.58	4.00	may-16
9.00	0.69	4.30	1.98	9.50	0.70	4.07	8.00	may-16
8.00	0.71	4.08	8.00	7.85	0.69	4.00	8.00	may-16
9.00	0.71	3.58	7.00	10.50	0.70	4.06	5.50	may-16
7.30	0.70	3.58	4.00	8.25	0.69	4.30	10.98	may-16
11.00	0.75	4.07	8.00	8.10	0.71	4.08	8.00	may-16
7.85	0.69	4.00	8.00	6.10	0.71	3.58	7.00	may-16

Ciclo de acarreo de mineral. Carguío de camión en Tolva N° 20 (min)

Ida cargado	Descarga	Retorno vacío	Carguío	Ida cargado	Descarga	Retorno vacío	Cargío	Fecha
7.00	0.70	4.00	5.50	8.00	0.69	4.30	1.98	may-16
7.30	0.80	3.58	4.00	7.50	0.07	4.07	8.00	may-16
7.00	0.70	4.00	5.50	7.30	0.80	3.58	4.00	may-16
8.00	0.69	4.30	1.98	7.50	0.70	4.07	8.00	may-16
7.00	0.70	4.00	5.50	7.30	0.80	3.58	4.00	may-16
8.00	0.69	4.30	1.98	7.50	0.70	4.07	8.00	may-16
8.00	0.71	4.08	8.00	7.85	0.69	4.00	8.00	may-16
6.00	0.71	3.58	7.00	7.50	0.70	4.06	5.50	may-16
7.50	0.70	4.06	5.50	7.30	0.80	3.58	4.00	may-16
8.00	0.69	4.30	10.98	7.50	0.70	4.07	8.00	may-16
8.00	0.71	4.08	8.00	7.85	0.69	4.00	8.00	may-16
6.00	0.71	3.58	7.00	7.00	0.70	4.00	5.50	may-16
7.30	0.80	3.58	4.00	8.00	0.69	4.30	1.98	may-16
7.50	0.70	4.07	8.00	8.00	0.71	4.08	8.00	may-16
7.85	0.69	4.00	8.00	6.00	0.71	3.58	7.00	may-16
7.00	0.70	4.00	5.50	7.30	0.80	3.58	4.00	may-16
8.00	0.69	4.30	1.98	7.50	0.70	4.07	8.00	may-16
8.00	0.71	4.08	8.00	8.85	0.69	4.00	8.00	may-16
6.00	0.71	3.58	7.00	8.07	0.70	4.00	5.50	may-16
7.36	0.80	3.58	4.00	8.40	0.69	4.30	1.98	may-16
7.55	0.70	4.07	8.00	8.00	0.71	4.08	8.00	may-16
7.85	0.69	4.00	8.00	6.00	0.71	3.58	7.00	may-16
7.00	0.70	4.00	5.50	7.30	0.80	3.58	4.00	may-16
8.00	0.69	4.30	1.98	7.50	0.70	4.07	8.00	may-16
8.00	0.71	4.08	8.00	7.85	0.69	4.00	8.00	may-16
6.00	0.71	3.58	7.00	7.85	0.69	4.00	8.00	may-16
7.50	0.70	4.07	8.00	8.00	0.71	4.08	8.00	may-16
7.85	0.69	4.00	8.00	6.00	0.71	3.58	7.00	may-16
7.50	0.70	4.07	8.00	7.85	0.69	4.00	8.00	may-16
7.85	0.69	4.00	8.00	6.00	0.71	3.58	7.00	may-16
7.30	0.80	3.58	4.00	8.00	0.69	4.30	1.98	may-16
7.50	0.70	4.07	8.00	8.00	0.71	4.08	8.00	may-16
10.85	0.69	4.00	8.00	6.00	0.71	3.58	7.00	may-16
6.00	0.71	3.58	7.00	7.00	0.70	4.00	5.50	may-16
7.30	0.80	3.58	4.00	8.00	0.69	4.30	1.98	may-16
8.00	0.69	4.30	1.98	7.50	0.70	4.07	8.00	may-16
7.85	0.69	4.00	8.00	6.00	0.71	3.58	7.00	may-16
6.00	0.85	3.58	7.00	7.85	0.69	4.00	8.00	may-16
6.00	0.85	3.58	7.00	7.50	0.70	4.07	8.00	may-16
8.05	0.71	4.08	8.00	7.85	0.69	4.00	8.00	may-16
6.00	0.71	3.58	7.00	7.00	0.70	4.00	5.50	may-16

Ciclo de acarreo de estéril. Carguío de camión en Tolva N° 22 (min)

Ida cargado	Descarga	Retorno vacío	Carguío	Ida cargado	Descarga	Retorno vacío	Cargío	Fecha
9.80	0.69	5.30	1.98	9.90	0.70	5.07	8.00	jun-16
9.10	0.70	5.00	5.50	10.02	0.30	4.80	3.98	jun-16
11.00	0.69	5.30	1.98	8.50	0.70	5.07	8.00	jun-16
10.00	0.30	4.80	3.98	11.00	0.69	5.30	2.98	jun-16
8.50	0.70	5.07	8.00	8.00	0.71	5.08	8.00	jun-16
9.30	0.70	5.58	4.01	10.25	0.69	5.30	10.94	jun-16
10.25	0.69	5.30	10.94	9.53	0.75	6.07	8.06	jun-16
9.10	0.71	6.08	8.00	8.85	0.69	5.00	8.00	jun-16
11.20	0.70	4.00	5.50	9.80	0.69	5.30	1.98	jun-16
9.80	0.69	5.30	3.98	9.90	0.70	5.07	8.00	jun-16
11.00	0.69	5.30	3.98	8.50	0.70	5.07	6.00	jun-16
8.00	0.71	5.08	7.03	9.85	0.69	5.00	8.04	jun-16
9.00	0.71	5.58	7.00	8.50	0.70	4.46	5.50	jun-16
9.30	0.70	5.58	4.00	10.25	0.69	5.30	10.98	jun-16
9.53	0.75	6.07	3.00	9.10	0.71	6.08	2.00	jun-16
8.85	0.69	5.00	8.00	9.10	0.71	4.58	7.50	jun-16
11.20	0.70	4.00	5.20	9.10	0.71	4.58	7.20	jun-16
11.20	0.70	4.00	5.10	9.80	0.69	5.30	2.98	jun-16
9.90	0.70	5.07	8.00	9.10	0.70	5.00	5.40	jun-16
10.02	0.30	4.80	3.28	11.00	0.69	5.30	7.28	jun-16
9.10	0.71	4.58	7.00	11.20	0.70	4.00	5.50	jun-16
9.80	0.69	5.30	3.98	9.90	0.70	5.07	8.00	jun-16
8.50	0.70	5.07	8.00	8.00	0.71	5.08	8.20	jun-16
9.85	0.69	5.00	8.00	9.00	0.72	5.58	7.00	jun-16
11.20	0.70	4.00	5.50	9.80	0.69	5.30	2.98	may-16
9.90	0.70	5.07	8.00	9.10	0.70	5.00	5.50	jun-16
10.02	0.30	4.80	3.58	11.00	0.69	5.30	2.98	jun-16
8.50	0.70	5.07	8.00	9.90	0.70	5.07	8.00	jun-16
9.10	0.70	5.00	5.50	10.02	0.30	4.80	4.58	jun-16
11.00	0.69	5.30	2.98	8.50	0.70	5.07	8.00	jun-16
9.10	0.71	6.08	8.00	8.85	0.69	5.00	8.00	jun-16
9.00	0.70	4.58	7.00	11.20	0.70	4.00	5.50	jun-16
9.80	0.69	5.30	2.98	9.90	0.70	5.07	8.00	jun-16
9.90	0.70	5.07	8.00	9.10	0.70	5.00	5.50	jun-16
10.02	0.30	4.80	3.58	11.00	0.69	5.30	2.98	jun-16
8.50	0.70	5.07	8.00	9.90	0.70	5.07	8.00	jun-16

Ciclo de acarreo de estéril (minutos). Carguío de camión en Tolva N° 23								
Ida	Descarga	Retorno	Carguío	Ida	Descarga	Retorno	Cargío	Fecha
cargado			vacío	cargado			vacío	
11.10	0.71	4.58	7.50	11.16	0.70	4.00	7.20	jun-16
10.15	0.71	4.60	7.20	10.25	0.72	4.60	5.60	jun-16
11.37	0.69	5.30	2.98	9.90	0.70	5.07	8.00	jun-16
9.10	0.70	5.00	5.40	10.02	0.60	4.80	3.29	jun-16
11.00	0.69	5.40	2.29	9.10	0.71	4.59	7.00	jun-16
11.20	0.70	5.00	5.50	9.80	0.69	5.30	2.98	jun-16
9.90	0.72	5.07	8.00	9.50	0.73	5.09	8.00	jun-16
9.00	0.71	5.08	8.40	10.15	0.69	5.90	8.45	jun-16
9.80	0.74	5.68	7.00	10.50	0.70	5.46	5.90	jun-16
9.30	0.70	5.58	4.00	9.10	0.71	4.60	7.20	jun-16
11.00	0.71	4.94	5.10	9.80	0.69	5.30	3.00	jun-16
9.80	0.72	5.30	3.90	9.90	0.73	5.07	8.00	jun-16
9.10	0.70	5.80	6.40	10.02	0.74	4.80	4.10	jun-16
11.00	0.69	5.30	2.98	9.10	0.71	4.58	7.00	jun-16
11.20	0.70	5.00	4.00	9.80	0.69	5.30	2.98	jun-16
9.90	0.70	5.07	8.00	11.40	0.70	5.07	8.00	jun-16
9.00	0.71	5.09	8.00	9.85	0.69	5.08	8.20	jun-16
9.00	0.71	5.58	7.00	10.50	0.70	4.46	5.50	jun-16
9.30	0.70	5.60	4.00	11.20	0.70	4.00	5.20	jun-16
11.20	0.71	4.00	5.20	9.10	0.70	4.58	7.20	jun-16
9.10	0.71	4.58	7.20	11.20	0.72	4.00	5.10	jun-16
11.20	0.72	4.00	5.10	9.85	0.69	5.30	2.98	jun-16
9.96	0.70	5.07	8.00	9.53	0.70	5.07	8.00	jun-16
9.53	0.70	5.08	8.09	9.23	0.70	4.46	5.50	jun-16
9.67	0.71	5.58	7.00	9.89	0.72	4.46	5.50	jun-16
10.24	0.70	5.59	7.04	11.27	0.70	4.06	5.20	jun-16
9.10	0.71	4.59	7.20	11.25	0.71	4.00	7.20	jun-16
9.80	0.60	5.30	2.98	9.90	0.70	5.07	8.00	jun-16
8.50	0.70	5.07	8.00	8.80	0.71	5.08	8.00	jun-16
8.50	0.70	4.46	5.59	9.30	0.70	5.58	4.00	jun-16
11.20	0.71	4.00	5.20	9.17	0.71	4.58	7.20	jun-16
9.80	0.69	5.30	2.98	9.88	0.69	5.00	8.00	jun-16
9.07	0.71	5.58	7.00	9.58	0.70	4.46	5.50	jun-16
9.37	0.70	5.58	4.00	11.27	0.70	4.00	5.20	jun-16
11.00	0.71	4.30	5.10	9.86	0.69	5.30	2.98	jun-16
6.00	0.69	3.58	7.00	7.00	0.70	4.00	5.50	jun-16
8.00	0.71	4.08	8.00	7.85	0.69	4.01	8.00	jun-16
7.20	0.70	4.00	5.50	7.50	0.70	4.97	8.02	jun-16

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Eppen G. D., Gould F. J, Schmidt C. P., Moore J. H., Weatherford L. R. (1998). Investigación de Operaciones en la ciencia administrativa. P. 581-585. México, México; Prentice Hall Inc.
- Hillier Frederick S. y Lieberman Gerald J. (1997). Introducción a la Investigación de Operaciones, p. 683. México, México. Editorial McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Mathur Kamlesh y Solow Daniel, (1996). Investigación de Operaciones. El arte de la toma de decisiones, p.734-742. México, México; Editorial Pearson education.
- Taha Hamdy A., (1981). Investigación de operaciones. Una introducción. p. 450-469.
- Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A. México, México.