

OPTIMIZACIÓN DE LA LOGÍSTICA DE OPERACIONES DE UNA PLANTA DE MOLIENDA DE SAL

Resumen / Abstract

El presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar un modelo de simulación mediante el uso del software Awesim para optimizar el sistema de producción y transporte de sal de una empresa minera del norte de Chile, con la finalidad de incrementar la productividad mediante la reducción de los tiempos de detención de la planta de producción, compatibilizando los ciclos de llenado de las tolvas de almacenamiento con los ciclos de transporte de los camiones.

The current work has as an objective to develop a model of simulation through the use of Awesim software. This will optimise the salt production and transportation system of a saltem in the north of Chile with the purpose of the increase of productivity by the reduction of the halting periods of the production plant and by making compatible the filling of the hoppers and the transportation cycles.

Palabras claves / Key words

Investigación de operaciones, simulación, minería
Operations research, simulation, mining

INTRODUCCIÓN

Antecedentes de la Compañía Minera

La Compañía Minera Explotadora de Sal fue constituida en el año 1905, con sus faenas en el salar grande de Tarapacá y embarques en la primera región al norte de Chile. La empresa, originalmente, solo produjo sal para el consumo humano, pero con el auge de la industria química, se introdujo el desarrollo para la producción de sal industrial, en volúmenes que prontamente superaron la inicial actividad.

A través de los años se realizaron importantes inversiones con la finalidad de ampliar la capacidad del puerto para permitir el embarque de buques de hasta 100 000 t, aumentó la maquinaria pesada, el número de camiones y se construyó una segunda planta de molienda y harneo, elevando su producción anual por sobre las 4 500 000 t.

Tipos de productos

Los principales productos que la empresa ofrece, son los siguientes:

- Cloruro de sodio para la Industria del Papel.
- Cloruro de sodio para la Industria Textil.
- Cloruro de sodio para la Industria de Vidrio.
- Cloruro de sodio para la Industria de Cloro Soda.

Raúl Zúñiga Arriaza, Ingeniero Industrial, Profesor Titular, Universidad Arturo Prat, Iquique

e-mail: razuniga@cec.unap.cl

Oscar Araya Pasten, Ingeniero Industrial, Profesor Titular, Gerente de Operaciones de la Compañía Minera Sal Lobos SA, Iquique, Chile

- Cloruro de sodio para la Industria Alimenticia.
- Cloruro de sodio para el deshielo de carreteras.

Estos definen tres líneas de productos:

- Sales industriales.
- Sales para la Industria Química.
- Sales para deshielo de carreteras.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La empresa se puede describir a través de sus tres Unidades de Negocios (UN-A, UN-B y UN-C), como se indica a continuación:

• **Unidad de Negocios UN-A:** Comprende el yacimiento y la mina.

Yacimiento: El cuerpo mineral corresponde a un depósito de cloruro de sodio sobre el 99 % de pureza, que tiene 40 km de longitud, 4 km de ancho y aproximadamente 60 m de profundidad.

Mina: La explotación, a rajo abierto, comprende las etapas de perforación, tronadura, carguío y transporte.

• **Unidad de Negocios UN-B:** Comprende los componentes descritos a continuación.

Transporte: El mineral extraído de la mina, se transporta en camiones de 60 t hasta la planta de chancado y harneo.

Planta: El proceso de tratamiento contempla un chancador primario, un secundario y los terciarios. La capacidad máxima nominal de la instalación es de 4 000 000 t/año.

Los productos obtenidos se transportan a las áreas de almacenamiento previo a su embarque, segregando estos de acuerdo con sus características químicas y granulométrica.

Embarque: Se dispone de un terminal de embarque de graneles capaz de movilizar 4 500 000 t/año.

El producto se transporta a las áreas de embarque por vía de camiones.

• **Unidad de Negocios UN-C:** Comprende los componentes descritos a continuación.

Ventas: Esta unidad es la encargada de la comercialización del producto, teniendo oficinas en Santiago de Chile y en Estados Unidos.

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo del proceso: El estudio se centra en las principales operaciones de la Unidad de Negocios UN-B.

MODELO DE SIMULACIÓN

Formulación del problema

Para el estudio se ha centrado la atención en las **plantas de molienda y clasificación** y el transporte hacia la **cancha de productos terminados** que se indica en la figura 1.

La situación problema que dio origen al estudio se puede resumir de la siguiente manera:

- Existe una subutilización de la flota de camiones que transporta cargas desde las tolvas de la planta de molienda y clasificación hacia la cancha de productos terminados. Se dispone de cuatro camiones para dichas operaciones, donde cada camión tiene una capacidad nominal de 20 t.

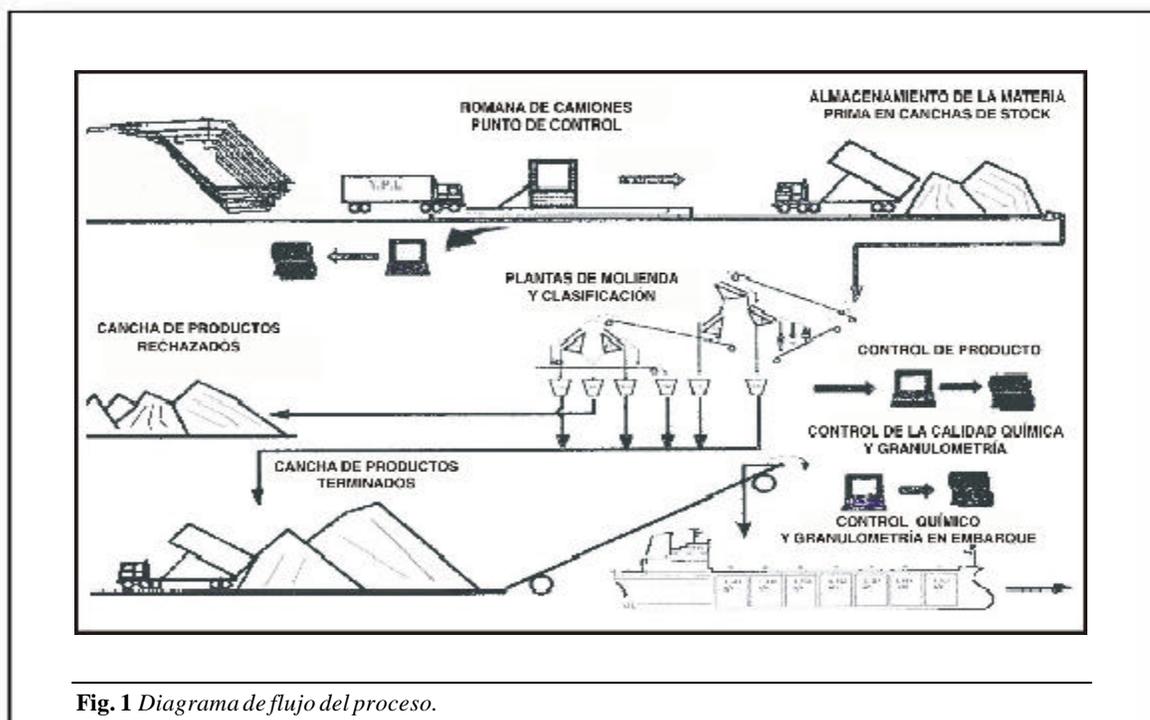


Fig. 1 Diagrama de flujo del proceso.

• Las paralizaciones de la planta durante el día, a consecuencia de que las tolvas registran distintos ciclos de llenado, debiendo contar en ese evento con un camión disponible, de lo contrario el flujo de alimentación se detiene.

Por lo tanto, se requiere optimizar el proceso de carguío y transporte desde la planta hasta las canchas de productos terminados, para evitar subutilizar la flota de camiones y evitar paralizar la planta en cualquier momento. Para lo cual se deben determinar los tiempos de carguío y transporte y controlar la cantidad de camiones en el proceso.

Se plantea que la optimización de la planta de chancado y la flota de camiones se puede lograr aplicando las herramientas de simulación, dada la complejidad del sistema.

Descripción del sistema a simular

De la planta de molienda se generan distintos tamaños (granulometría) de sal producidos por el chancado y harneo. Una vez que es procesada la sal, se descargan las distintas granulometrías en 4 tolvas diferentes (0, 1, 2 y 3), que a su vez tienen 2 tolvas adicionales (1-A y 1-B) que duplican la carga de 2 de los 4 tipos diferentes de productos.

De acuerdo con el proceso, cuando una tolva llega a su límite de carga (20 t), debe ser atendida de inmediato por un camión, ya que de lo contrario, la planta debe parar el proceso de producción. Así, la carga de una tolva se traslada a la cancha de productos terminados a través de los camiones.

En la situación actual se tienen los siguientes antecedentes:

• Se utilizan 4 camiones de 20 t para las labores de traslado de cargas desde las tolvas a las canchas de productos terminados. En general, se han considerado las siguientes características para los camiones:

• Los camiones de la flota son homogéneos en: velocidad sin carga, velocidad con carga, aceleración y largo del vehículo.

• Un camión puede estar en uno de los siguientes estados:

- Detenido y disponible para cargar.
- Cargando.
- Viajando lleno a un punto de descarga en las canchas de productos terminados.
- Descargando.
- Viajando vacío a un punto de carga en las tolvas.

En la tabla 1 se muestran los tiempos promedios de llenado de las tolvas y los tiempos de viaje de los camiones (tiempo del ciclo).

Para calcular los tiempos de los camiones se tomó el tiempo de ciclo de un camión considerando en dicho valor: el tiempo de carga en la tolva (cerca de cero), el tiempo de viaje con carga, el tiempo de descarga y el tiempo de regreso vacío a las tolvas.¹⁻²

TABLA 1 Tiempos promedio de llenado de las tolvas y tiempo de ciclo de los camiones*		
Tolvas	Tiempo de llenado de las tolvas (min)	Tiempo de viaje (ciclo: carga, viaje desde las tolvas hacia las canchas, descarga y regreso a las tolvas) (min)
0	10	8
1	31	6
1-A	53	6
1-B	9	6
2	14	10
3	33	10

* Fuente: Elaborada por los autores.

Diagrama del modelo de la situación actual en el software Awesim

Para el modelo se considera:

- **Entidades:** Cargas de sal producidas en cada llenado de una tolva (20 t por carga).
- **Recursos:** Camiones de 20 t.
- **Actividades de servicio:** Tiempo de ciclo de los camiones en minutos (ciclo: tiempo de carga, viaje desde las tolvas hacia las canchas y viaje de regreso a las tolvas).

Para el estudio del problema planteado, se utilizó el software de simulación Awesim, mediante el cual se efectuaron las simulaciones necesarias para estudiar alternativas de mejoramiento de la productividad.¹

En las figuras del anexo se puede observar el número total de cargas, el porcentaje de utilización y disponibilidad de los camiones, así como los principales nodos utilizados en el modelo.

Resultados del modelo de simulación para la situación actual

Para el análisis de la situación actual (situación 0) se corre el modelo de simulación.

Situación 0: Se simula considerando 4 camiones, 24 h de trabajo y la detención de la planta mientras no se encuentre un camión disponible para retirar la carga.

Los resultados obtenidos, más relevantes, son los que se presentan en la tabla 2.

Resultados para el modelo de la situación propuesta en software awesim

Para el análisis de la situación propuesta se ha realizado una serie de experimentos para diversos escenarios, siendo los más

relevantes los que se muestran a continuación a través de las distintas situaciones indicadas (1, 2 y 3).

Situación 1: Se tomó como base la situación actual (situación 0) y se consideró evaluar la colocación del sistema de descarga adicional para almacenamiento (buzones de espera) para aquellas cargas que no pueden descargar por no encontrar un camión disponible al momento de ser requerido.

Situación 2: A partir de la situación 2 se reduce un camión de la flota, por lo cual solo se trabaja con 3 camiones.

Situación 3: Resulta de una combinación de cierta parte de la situación 0 y de una parte de la situación 2, es decir, se considera la detención de la planta mientras no se encuentre un camión disponible para retirar la carga (situación 0) y se trabaja con solo 3 camiones (situación 3).

Los resultados obtenidos se indican en la tabla 3.

TABLA 2 Resultados del modelo de simulación para la situación actual*	
Resultados de la situación actual	Valores de la situación 0
Tiempo de trabajo real (min)	1 389
Tiempo de detención de la planta (min)	51
Número de camiones	4
Total cargas -tolvas	500
Total cargas adicionales en almacenamiento	0
Total cargas -sistema	500
Largo máximo de cola de cargas	0
Porcentaje de utilización promedio de camiones	69 %
Disponibilidad promedio de camiones	31 %
Tiempo promedio entre desvío - cargas a espera (min)	0
Desviación estándar del tiempo promedio entre desvío - cargas a espera (min)	0
Tiempo máximo entre los desvíos (min)	0
Tiempo de espera total de cargas (min)	0
Tiempo máximo de espera de una carga (min)	0
Tiempo de espera promedio por carga (min)	0

* Fuente: Elaborada por los autores.

RESULTADOS

De los datos de la tabla 2, se observa que la flota actual de camiones es utilizada a un 69 % como promedio de su capacidad nominal de transporte, es decir, existe un 31 % de capacidad ociosa, visualizándose que podría buscarse una alternativa para disminuirla a un porcentaje más óptimo.

Sin embargo, se generan colas de espera de cargas en las tolvas por no encontrar un camión disponible para cargar, por lo cual se detiene la planta.

En un día de 24 h de labor solo en dos ocasiones la cantidad de cargas en espera alcanzó un máximo de 2.

Dado que la capacidad ociosa de los camiones es de un 31%, lo cual se considera bastante alta y el tamaño máximo de las colas no supera las 2 cargas en espera, se permite proponer la siguiente solución:

- Utilizar solo 3 de los 4 camiones de 20 t para atender las tolvas de selección de material.
- Construir un sistema de dos buzones de espera adicionales, los que estarán unidos mediante una correa transportadora que descargarán las tolvas primarias, cuando estas estén llenas y no exista disponibilidad de camión.

Al observar los resultados simulados de la tabla 3 y los gráficos 1 y 2, se concluye que:

- Al utilizar un máximo de dos buzones de espera, como se indica en la situación 1, se obtiene un total de 520 cargas transportadas al día, pero utilizando 4 camiones con una utilización de solo un 69 % de su capacidad, lo que no hace muy atractiva la propuesta.

• La situación 2 mejora los resultados de la situación 1, en cuanto a que con solo 3 camiones se obtienen resultados prácticamente iguales a la situación 1, es decir, 519 cargas transportadas al día y con una utilización al 92 % de los camiones. Lo anterior se logra al agregar un buzón adicional a lo recomendado en la situación 1, es decir, agregar 3 buzones de espera adicionales.

- Lo anterior permite concluir que la situación 2 fue la preferida por el gerente de la empresa a la luz de los resultados, y la que se aplicó en definitiva.

Lo anterior significa aumentar la producción diaria en alrededor de un 4 % en relación con la situación actual (situación 0), lo que equivale a 380 t adicionales al día y 11 400 t adicionales al mes, lo que finalmente se traduce al año en 136 800 t. Las inversiones para lograr lo anterior son insignificantes frente al aumento de la producción y los ahorros de costos que significa el funcionamiento con un camión menos.

Los costos involucrados en el cambio propuesto son los siguientes:

- Costos de las detenciones en términos de menor producción de la planta.
- Costos de incorporar los cambios indicados, es decir, la construcción de los buzones de espera y correa transportadora de material.
- Disminución de costos operativos y de mantención por la eliminación de un camión de la flota de transporte.

TABLA 3
Resultados del modelo de simulación para la situación propuesta*

Resultados de la situación real (min)	Valores situación 1	Valores situación 2	Valores situación 3
Tiempo de trabajo real (min)	1 440	1 440	713
Tiempo de detención de la planta (min)	0	0	727
Número de camiones	4	3	3
Total de cargas -tolvas	473	182	254
Total de cargas adicionales en almacenamiento	47	337	0
Total de cargas -sistema	520	519	254
Largo máximo de cola de cargas	2	3	0
Porcentaje de utilización promedio de camiones	69 %	92 %	72 %
Porcentaje de disponibilidad promedio de camiones	31 %	8 %	28 %
Tiempo promedio entre desvíos -cargas a espera (min)	30	4,2	0
Desviación estándar de tiempo promedio entre desvios-cargas a espera (min)	31	3,4	0
Tiempo máximo entre los desvíos (min)	151	18	0
Tiempo de espera total de cargas (min)	51	727	
Tiempo máximo de espera de una carga (min)	4	7	0
Tiempo de espera promedio por carga (min)	1,1	2,2	0

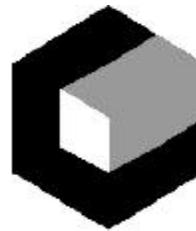
* Fuente: Elaborada por los autores.

CONCLUSIONES

La aplicación del modelo de simulación, ha permitido apoyar en forma efectiva las decisiones de operaciones y de logística de la planta de sal obteniéndose importantes ahorros económicos con dichos cambios. □

REFERENCIAS

- 1.PRITSKER, A. A. B.; J. J. O'REILL AND D. K. LAVAL: *Simulation with Visual SLAM and AWESIM*, Systems Publishing Corporation, USA, 1997.
- 2.NAYLOR, THOMAS: *Técnicas de simulación en computadoras*, Ed. Limusa, 1982.



Instituto Superior Politécnico
José Antonio Echeverría
cujae

ANEXOS

