
GESTIÓN DE OPERACIONES DE REFINO Y MOLDEO EN LA PRODUCCIÓN DE COBRE

LORENA PRADENAS*
GINO NÚÑEZ*
VÍCTOR PARADA**
JACQUES FERLAND***

Resumen

En este estudio se aborda el problema de programación de tareas en equipos de refinado y moldeo, que surge típicamente en una fundición de concentrados de cobre. Para resolver el problema se propone un método heurístico y se implementa un sistema computacional que, mediante una interfaz simple y fácil de usar, permite programar las operaciones con bajo tiempo computacional.

Palabras Clave: Refinado y moldeo; Programación de tareas; Método heurístico.

1. Introducción

Una fundición de concentrados de cobre recibe un flujo de mineral húmedo proveniente de una etapa previa y presenta diversas operaciones típicas, tales como: almacenamiento y preparación de carga, fusión, conversión, refinado y moldeo, limpieza de escorias y absorción de gases (en planta de ácido). En la primera operación, el flujo de mineral húmedo es secado en hornos rotatorios. En la fusión, el flujo de mineral seco es alimentado a reactores donde es sometido a altas temperaturas para su purificación, como resultado se obtiene un producto intermedio que contiene de 62 a 75 % de cobre, el cual es ingresado a la etapa de conversión, donde se realiza una nueva purificación, generando un

*Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción.

**Departamento de Ingeniería Informática, Universidad de Santiago de Chile y Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile.

***Département d'Informatique et de Recherche Opérationnelle, Université de Montréal.

producto, que contiene alrededor de 99 % de cobre. En la operación de refino y moldeo, el concentrado proveniente de conversión es nuevamente purificado en reactores rotatorios y luego vaciado en las ruedas de moldeo generando así los ánodos de cobre que constituyen el producto final. La pureza alcanzada en esta etapa es de aproximadamente 99,6 a 99,7 %. Las escorias remanentes generadas en los procesos de fusión y conversión son también purificadas con el fin de recuperar el cobre disponible; otros remanentes no purificados son considerados subproductos. Paralelamente, los gases ricos en azufre son, en general, absorbidos en una planta de producción de ácido sulfúrico.

En particular, el concentrado de cobre fundido proveniente desde la etapa de conversión es transportado y luego se alimenta a los reactores de refino con cucharas de grandes dimensiones y desplazadas por medio de un puente-grúa. La operación de refino es realizada en un conjunto de reactores con diferentes capacidades.

Para el carguío de un determinado reactor (horno) de refino, éste debe estar en operación, no encontrarse procesando otra carga y debe haber transcurrido al menos un tiempo predefinido desde que se descargó en el último moldeo.

Una vez cargado el horno, y según las indicaciones metalúrgicas, se realiza el proceso de refino que básicamente consiste, por un lado, en remover el azufre y arsénico aún presentes en el concentrado y, por otro, eliminar el oxígeno mediante un proceso de reducción. El tiempo de duración de esta operación, depende de la composición del concentrado y puede ser previamente definido.

El moldeo de ánodos de cobre se realiza en moldes fijos, insertos en ruedas giratorias e instalados adecuadamente para facilitar su llenado y vaciado. Los moldes de una rueda pueden ser cargados desde un horno de refino anexo a la rueda pero, al momento de su carga, sólo puede recibir desde un único horno.

Al descargar un horno, el cobre es vertido en los moldes de la rueda, la cual gira periódicamente y dispone de otros moldes para ser llenados. Durante el giro de la rueda con moldes llenos, éstos son refrigerados con agua hasta alcanzar el sector donde son descargados automáticamente. Antes de volver a llenar los moldes, éstos son rociados con antiadherentes. Esta forma de operar configura un proceso batch tanto para los hornos como para las ruedas de moldeo.

Suponemos que en promedio los ánodos moldeados tienen una masa aproximada de 400 kilogramos y que, la velocidad de la rueda y las condiciones tecnológicas permiten moldear a un flujo aproximado de 50 toneladas por hora. Antes de moldear, una rueda es sometida a una operación de preparación, algunas de estas preparaciones pueden ser evitadas realizando lo que se conoce como “encadenamiento”, donde se programan las descargas de los hornos de manera de hacer coincidir el inicio de uno con el término del horno adyacente. De esta forma, al finalizar con el cobre proveniente de un horno se comienza

el moldeo del otro, sin detener la rueda y por lo tanto sin realizar una nueva preparación.

En ocasiones cuando los equipos de conversión deben ser descargados y no existe disponibilidad de equipos de refinado y moldeo, y priorizando las operaciones de conversión que tiene características de “cuello de botella” se realiza una operación denominada “levantamiento de carga”. Ésta consiste en la detención del refinado, ingresando el cobre proveniente de conversión; de esta forma se inicia un nuevo refinado y a continuación, el moldeo correspondiente.

Un diagrama de operaciones con una unidad de refinado y moldeo es presentado en la figura 1. Anexados a cada rueda de moldeo existen dos hornos de refinado, proporcionando descargas independientes.

Para obtener el máximo rendimiento de los equipos involucrados en el refinado y moldeo, es necesario que las operaciones se realicen coordinadamente durante un periodo de planificación, es decir, debe sintonizarse simultáneamente: el manejo del puente-grúa, el carguío de los hornos, los ciclos de refinado, el carguío de los moldes, la definición sobre la relación horno-molde, etc. La complejidad de esta coordinación hace que, en general, exista una tendencia a tratar la actividad manualmente, o sea, dejando a cargo de los diferentes turnos laborales la programación de las actividades en tiempo real, usando incluso radios o teléfonos para la comunicación entre los operadores. Como resultado, se generan una serie de dificultades que se traducen en ineficiencias en las operaciones, como por ejemplo no disponibilidad de: puente-grúa, horno de refinado a ser cargado, rueda de moldeo, etc. A partir de esto, surge el problema de la Programación automática de Operaciones en el Refinado y Moldeo de una fundición de concentrados de cobre (PORYM). La resolución eficiente de este problema requiere de un adecuado modelo para el problema, de la selección y diseño del algoritmo, de la definición de la captura y almacenamiento de datos y resultados y de la construcción de una herramienta computacional orientada al tipo de usuario.

En una primera aproximación, el PORYM puede ser visto como un problema de programación de tareas en máquinas paralelas, que ha sido ampliamente estudiado en la literatura (Blazewicz 1991 y 1993; Pinedo, 1995). Sin embargo, las características propias de los procesos involucrados en las operaciones nos conducen a un modelo matemático mixto (Núñez, 2004), con función objetivo no lineal. El modelo resultante es del tipo: $P|prec, rj| \sum Cj$ perteneciendo, a la familia de problemas NP-hard (Gram. et al., 1979).

En general, los problemas de máquinas paralelas presentan dos dimensiones: localización y secuenciamiento o sea, no sólo se debe conocer el orden de las tareas a procesar sino también en la máquina en la cual se realiza cada operación. La medida de desempeño, minimizar el *makespan* ha sido ampliamente utilizada, como por ejemplo, cuando las tareas son dependientes o independientes (Baker, 1974, Bank y Werner, 2001; Chekuri et al., 2001).

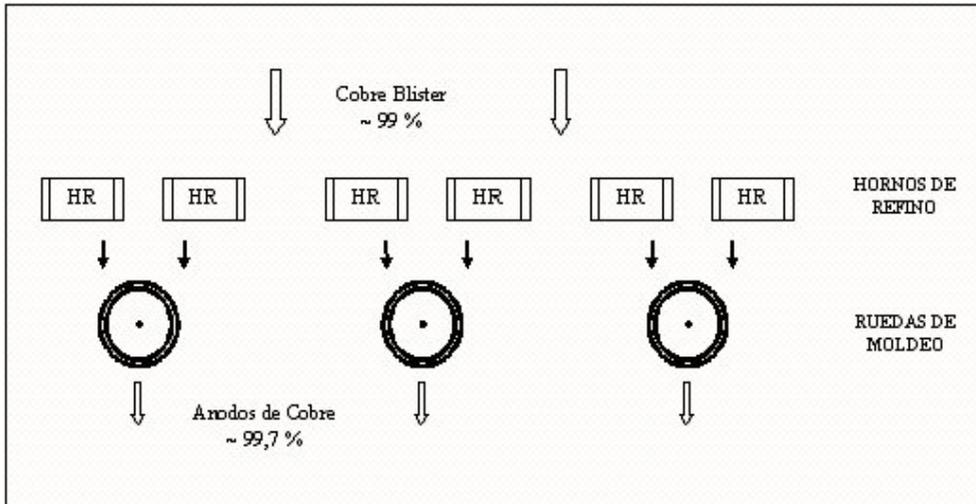


Figura 1: Equipos de refinación y moldeo

En la sección 2 se establece una heurística de solución que utiliza un enfoque de búsqueda basada en restricciones, implementada en el lenguaje de programación C++. La interfaz gráfica diseñada permite obtener como resultado final una *carta gantt*, en la cual se dibuja la solución presentada por la heurística. En la sección 3 se presentan los resultados y algunos diagramas del sistema implementado y finalmente en la sección 4 se presentan las principales conclusiones del estudio.

2. Procedimiento de solución

Dado que el problema en estudio pertenece a la clase NP-Hard y una formulación basada en programación entera no-lineal exige varios centenares de variables (Núñez, 2004), en este artículo se presenta un método heurístico que genera una solución de buena calidad en un bajo tiempo computacional. Esta heurística es la que debe ser incrustada en la herramienta computacional para resolver el problema planteado.

Siguiendo la analogía con los problemas de asignación de tareas en máquinas paralelas, se considera que una tarea es un ciclo que contiene el carguío de un horno y las correspondientes etapas de refinación y moldeo. Además, se considera que tales ciclos deben ser asignados a máquinas, en este caso, hornos de refinación.

Algoritmo 1.

Inicio

Ordenar tareas J_i por tiempos de operación a_i en forma no - creciente,
 Sub - ordenar tareas J_i , con igual a_i , por tiempo de arribo r_i en forma
 no - decreciente,

Mientras exista alguna tarea J_i sin asignar

Si el tiempo a_i es suficiente para ser asignada a M_n

$q = 0$

Mientras J_i no ha sido asignada y $q \leq b$

Si M_{n-q} está disponible, asignar a M_{n-q} en $t = r_i$

Si no hacer $q = q + 1$

Fin Mientras

Hacer $G = M_1, M_2, \dots, M_n$

Mientras J_i no ha sido asignada y $G \neq \emptyset$

Buscar en G la máquina M_k que sea liberada más temprano

Si J_i tiene el tiempo a_i para ser asignada a M_k

Asignar J_i a M_k en el $t = \text{máx}\{\text{liberación de } M_k, r_i\}$

Si no hacer $G = G - \{M_k\}$

Fin mientras

Fin Mientras

Fin

El algoritmo 1 describe el procedimiento de solución en pseudo-código. Primero las tareas son ordenadas con respecto a su flexibilidad para ser asignadas a las máquinas, o sea, las tareas con mayor tiempo de operación (menor flexibilidad), es decir, las cargas con mayor número de ollas, tienen mayor prioridad y deben ser asignadas a hornos de mayor capacidad, mientras que las de tamaño medio pueden ser cargadas en cualquiera de los hornos. En un segundo ordenamiento, los trabajos con igual tiempo de operación son ordenados en forma no-decreciente con respecto a su tiempo de arribo. Ambos ordenamientos se reflejan en la inicialización del algoritmo.

El algoritmo tiene un ciclo principal (Mientras) dentro del cual se realizan dos etapas. En la primera, reflejada en la instrucción Si y el ciclo anidado Mientras, se analiza la factibilidad de asignar la primera tarea de la lista a alguna de las b máquinas (hornos) con mayor capacidad. Con este fin, se verifica que la máquina se encuentre libre para asignar el trabajo en su tiempo de arribo, o sea, que no se interrumpa con otra tarea ya asignada a la misma máquina, o con la actividad de preparación del horno o finalmente, con una posible utilización de la rueda de moldeo por alguna tarea en el horno adyacente. Siendo posible, se debe realizar la asignación.

En la segunda etapa de búsqueda (ciclo anidado Mientras), se determina la máquina que queda disponible más temprano, en función de las asignaciones que ya se han realizado y considerando todas las restricciones de interrupción de las tareas. Si por tamaño es factible procesar el trabajo en esa máquina, la asignación es realizada en el tiempo mayor entre la liberación de la máquina y el tiempo de arribo de la tarea. Si por tamaño no es posible asignarla se busca la máquina restante, que presente el menor tiempo de liberación. El proceso se repite hasta que todas las tareas son asignadas.

La propagación de restricciones que dificulta la asignación de las tareas en las máquinas es analizada cada vez que se busca el tiempo de liberación de una máquina, considerando tanto las tareas que ya han sido programadas como las que todavía se deben asignar.

El algoritmo propuesto es polinomial, específicamente de orden $m(n \log n + \log m + n)$, donde m es el número de tareas a asignar y n es el número de máquinas disponibles.

3. Resultados

Los resultados de la heurística son evaluados, comparándolos con la situación que realmente ocurre en una planta típica para un periodo de 30 días (Tabla 1). En la primera columna se indica el día del registro, en la segunda, la producción diaria (tons), en la tercera, se indica el número de hornos que participaron en la producción diaria, mientras que en la cuarta columna, se presenta el número de hornos programados por la heurística para el mismo día, bajo las mismas condiciones operacionales. En las dos últimas columnas se muestra el tiempo total de procesamiento sumado para todas las tareas realizadas o programadas. Se observa que en todos los casos la programación generada por el algoritmo es más eficiente que lo que realmente ocurrió en esos días. Con un tiempo de flujo menor o igual, se utilizan menos hornos.

Las figuras 3 y 4 presentan imágenes de algunas de las pantallas del sistema computacional desarrollado. Específicamente, en la figura 3 se muestra el ingreso de algunos parámetros operacionales tales como la capacidad y tiempos de preparación para los hornos de refino, así como, la velocidad y tiempos de preparación de las ruedas de moldeo. Adicionalmente, se muestra los campos diseñados para la entrada de datos que indica las detenciones programadas de los hornos que deben ser consideradas en el período de programación.

La figura 4 presenta una *Carta Gantt* con la programación resultante para un día de operación. En ésta se observa la operación de los hornos de refino n° 2, 6 y 8 con sus correspondientes ciclos de proceso. Se observa que los hornos 1 y 7 se encuentran fuera de operación; en el borde superior se muestra un diseño

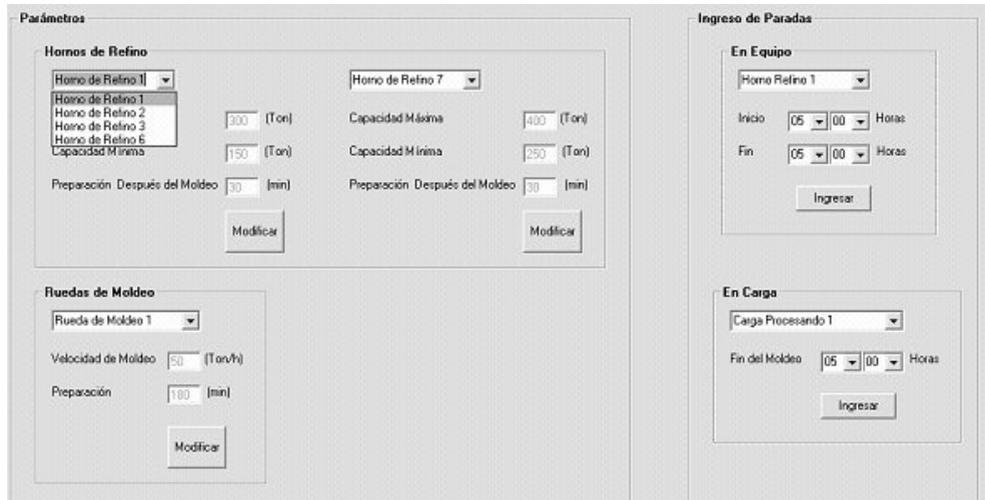


Figura 2: Pantalla de ingreso de parámetros al sistema

que corresponde al instante en que las ollas con concentrado proveniente de los convertidores hacen su arribo a la unidad de refino y moldeo. En cada ciclo se describen las tres etapas con colores diferentes. El ciclo es localizado en correspondencia con la hora de inicio y término del procesamiento.

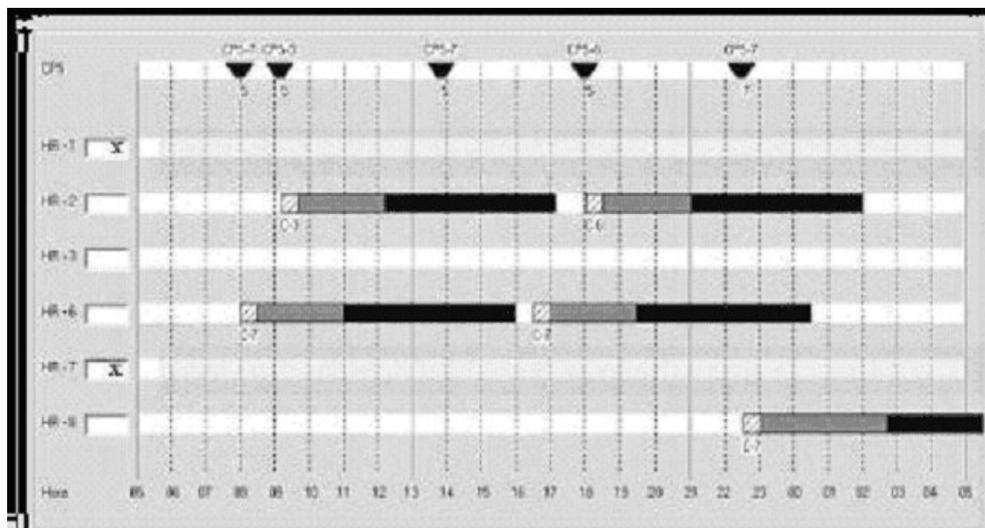


Figura 3: Carta Gantt de programa

Día	Producción (Ton)	N° Hornos utilizados	N° Hornos Programación	Tiempo flujo Real (min)	Tiempo flujo Programado (min)
1	1400	4	3	2640	2610
2	1350	4	3	2700	2460
3	1000	4	4	2280	1860
4	900	4	3	2040	1848
5	1500	5	3	2880	2880
6	2000	5	3	4020	3840
7	2250	5	5	4440	4350
8	2000	5	4	3950	3930
9	2250	5	4	4430	4410
10	1500	4	2	2900	2880
11	1750	3	3	3360	3360
12	1750	4	3	3690	3360
13	2000	5	4	4010	3840
14	2050	4	3	4090	4036
15	1950	4	2	5680	5484
16	1350	4	3	2630	2450
17	2000	4	3	4000	3840
18	1500	6	3	2890	2880
19	2250	6	5	4460	4350
20	900	5	3	2010	1848
21	2000	5	4	3950	3930
22	2000	4	3	4050	3880
23	1500	4	3	2910	2900
24	2250	4	4	4430	4410
25	1350	4	3	2700	2460
26	2000	5	4	4030	3840
27	2000	5	3	4000	3900
28	2400	5	4	6500	6178
29	1000	5	4	2160	1880
30	2000	5	4	3940	3930

Cuadro 1: Comparación de resultados alcanzados con algoritmo y con datos de operación

4. Conclusiones

En este estudio se propone un algoritmo para resolver el problema de asignación de tareas en el proceso de refinado y moldeo de una fundición de concentrados de cobre. Además, se describe una herramienta computacional que permite programar las actividades diarias de la planta. El problema teórico resultante tiene características adicionales a los típicamente tratados en la literatura de scheduling, debido a las características propias del proceso

metalúrgico involucrado.

El algoritmo propuesto mejora la gestión de las operaciones en la producción de cobre, para el periodo en estudio. No tan sólo obtiene la misma producción en un menor tiempo de flujo sino que, utilizando menos hornos. El sistema computacional desarrollado permite un manejo fácil de las operaciones desde un computador personal. No es necesario que el usuario tenga un conocimiento sobre métodos o técnicas de optimización combinatoria para poder simular escenarios de producción bajo cualquier conjunto de condiciones operacionales.

Agradecimientos Este trabajo se realizó con el apoyo parcial del Proyecto Fundación Andes-Chile, C- 13955/18 y del Proyecto DIUC - 204.097.007-1.0. El tercer autor recibió financiamiento del “Núcleo Milenio Sistemas Complejos de Ingeniería”P04-066-F.

Referencias

- [1] Baker, K. R. Introduction to Sequencing and Scheduling, John Wiley & Sons, New York, 1974.
- [2] Bank, J. y Werner, F. Heuristic Algorithms for Unrelated Parallel Machine Scheduling with a Common Due Date, Release Dates, and Linear Earliness and Tardiness Penalties, *Mathematical and Computer Modeling*. 33, 2001, 363 - 383.
- [3] Blazewicz, J., Dror, M. y Weglarz, J. Mathematical Programming Formulations for Machine Scheduling: A Survey. *European Journal of Operational Research*. 51. 1991, 283 - 300.
- [4] Blazewicz, J., Ecker, K. H., Schmidt, G. y Weglarz, J. *Scheduling in Computer and Manufacturing System*,. Springer-Verlag, 2ª edición, Berlin, 1993.
- [5] Chekuri, C., Motwani, R., Natarajan, B. y Stein, C. Approximation techniques for average completion time scheduling, *SIAM Journal on Computing*, 31, 2001, 146 - 166.
- [6] Graham, R.L., Lawler, E.L., Lenstra, J.K. y Rinnooy Kan, A.H.G. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling theory: a survey, *Annals of Discrete Mathematics*, 5, 1979.
- [7] Nuñez, G. Optimización en la Programación de las Operaciones de Refino y Moldeo en la Fundición de Concentrados de Cobre de Chuquicamata. Memoria de Título para optar al Título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Concepción, Chile, Enero 2004.

- [8] Pinedo, M. Scheduling: Theory, Algorithms and Systems. Prentice Hall, New Jersey, 1995.