

SISCO: UN SISTEMA INTEGRADO PARA SUPERVISION Y CONTROL OPTIMO ECONOMICO DE PROCESOS INDUSTRIALES

Aldo Cipriano, Domingo Mery, Carlos Muñoz y Marcelo Quezada

*Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile
Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile
Tel: 56-2-6864281; fax: 56-2-5522563; e-mail: aciprian@ing.puc.cl*

Resumen: En este trabajo se presenta SISCO, un software desarrollado para un computador personal bajo ambiente Windows, cuya función es recopilar y procesar en tiempo real datos de operación de un proceso productivo con el fin de apoyar al operador en la supervisión y en el control de la planta, maximizando índices económicos y satisfaciendo restricciones técnicas. A modo de ejemplo se incluye una cuantificación de los beneficios que se obtendrían al instalar SISCO en una planta concentradora de minerales.

Abstract: In this paper, a software developed to run in a personal computer under Windows environment, is presented. SISCO is a supervision and control tool that helps the operator to maximize economical index subject to technical constraints. As an example, the benefits of installing SISCO in a mineral processing plant are presented.

Keywords: Índices económicos, modelos empíricos, optimización.

1. INTRODUCCION

Los avances tecnológicos y la reducción de costos experimentados por el hardware digital en los últimos años, han permitido que en la actualidad un número importante de procesos industriales operen con equipos de automatización basados en modernos sistemas de control distribuido y/o redes de computadores conectados a controladores lógicos programables. Si bien con estos sistemas ha mejorado considerablemente la forma en que la información se almacena, procesa y despliega, no se aprecia un avance similar en las funciones de control, las que en general se mantienen al nivel regulatorio, con controladores PID, no obstante las diversas metodologías de control surgidas en los últimos años, por ejemplo control robusto, control experto, difuso y neuronal.

Las causas de esta situación dicen relación, muy probablemente, con varios aspectos:

- en muchos procesos no existe una cuantificación económica de los beneficios que aporta el control automático, que permita justificar inversiones en su desarrollo,
- las técnicas modernas de control requieren conocimientos que no están al alcance de los usuarios, y
- toda estrategia de control necesita que la instrumentación (sensores y actuadores) opere con disponibilidad muy elevada.

Este trabajo se orienta a solucionar el primer problema, para lo cual se propone diseñar la estrategia de control considerando como función

objetivo un índice económico de la operación de la planta.

La idea de incorporar conceptos económicos en el diseño de una estrategia de control, es concordante con las nuevas estructuras de gestión de las grandes empresas, las cuales han dividido sus principales áreas de producción y servicios en Unidades de Negocios, que pagan por los insumos, reciben ingresos por sus productos y están obligadas a generar excedentes. Esta realidad sugiere la necesidad de readecuar los criterios de diseño de las estrategias de control, reemplazando los índices exclusivamente técnicos por índices económicos, como costos unitarios de producción o beneficios calculados como ingresos menos egresos, los que deben ser maximizados, pero sin violar restricciones técnicas de operación. Es en este sentido que fue concebido SISCO, como una herramienta computacional desarrollada para apoyar al operador en la toma de decisiones tendientes a maximizar los beneficios económicos generados en una planta productiva.

SISCO es un software que presenta en tiempo real las condiciones de operación de un proceso tanto en términos técnicos, como económicos. A partir de la medición de variables técnicas, SISCO determina los ingresos, los costos e índices económicos. Adicionalmente, por medio de modelos predictivos del proceso, SISCO estima a priori cómo variarán las principales variables de proceso y los diversos índices económicos al modificarse las variables manipuladas, lo cual permite al operador decidir acerca de las acciones que debe ejecutar en un instante dado. Asimismo, y utilizando algoritmos de optimización, SISCO determina el valor de las variables manipuladas que maximizará uno de los índices económicos de la planta, al mismo tiempo que cumple las restricciones operacionales impuestas.

El presente trabajo tiene por objetivo presentar SISCO con los diversos módulos que lo componen, así como cuantificar los beneficios que se obtendrían al instalarlo en una planta de procesamiento de minerales.

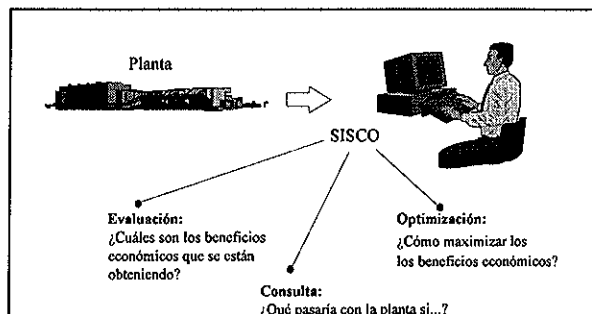


Figura 1. Diagrama de los módulos de SISCO

2. DESCRIPCION DE SISCO

SISCO, como se muestra en la Figura 1, está constituido por 3 módulos de software que se complementan entre sí: Evaluación, Consulta y Optimización.

2.1 Módulo de Evaluación

Este módulo evalúa en línea la función objetivo y los índices económicos y presenta la evolución en el tiempo de las diversas variables operacionales. En la Figura 2 se presenta una pantalla de operación del Módulo de Evaluación de SISCO, en la que se puede apreciar los beneficios económicos, los ingresos y costos actuales, así como un promedio mensual y semanal y una tendencia en el tiempo de los últimos 20 minutos.

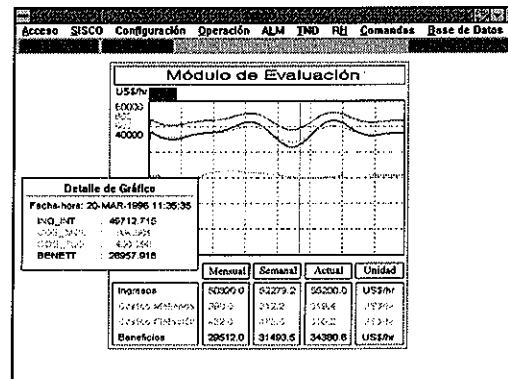


Figura 2. Módulo de Evaluación.

2.2 Módulo de Consulta

Este módulo hace uso de modelos, que permiten predecir el comportamiento de la planta y con ello responder a consultas del operador del tipo: qué pasaría con la operación de la planta si se modifica una variable manipulable. La Figura 3 presenta una predicción realizada con el Módulo de Consulta de SISCO, en la que se estima cuáles serán los beneficios económicos al aumentar de 200 a 220 Ton/hora la alimentación de mineral a la planta concentradora. En este caso, SISCO ha estimado que para estas condiciones los beneficios económicos de la planta aumentarán de US\$ 31.265,70 a US\$ 34.380,60 por hora de operación.

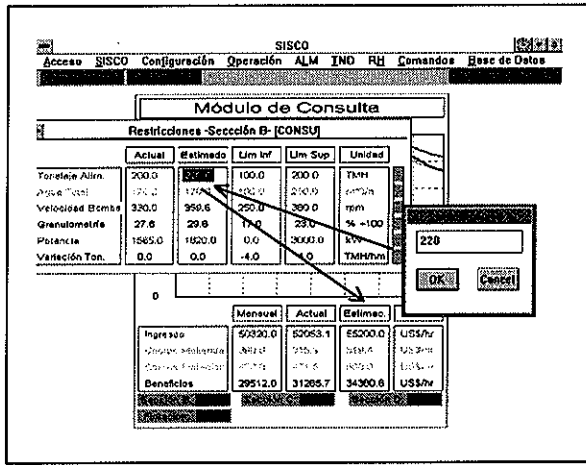


Figura 3. Módulo de Consulta.

2.3 Módulo de Optimización

El Módulo de Optimización se utiliza en conjunto con los módulos de Evaluación y Consulta, para determinar el óptimo de la función objetivo y los controles que deben ser aplicados para alcanzarlo. En la Figura 4 se presenta un despliegue del Módulo de Optimización de SISCO. Se ha determinado que el beneficio máximo se alcanza para una alimentación de 225,2 Ton/hora, con lo cual se obtendría un beneficio económico de US\$ 34.834,50 por hora, si las restantes variables de operación no se alteran.

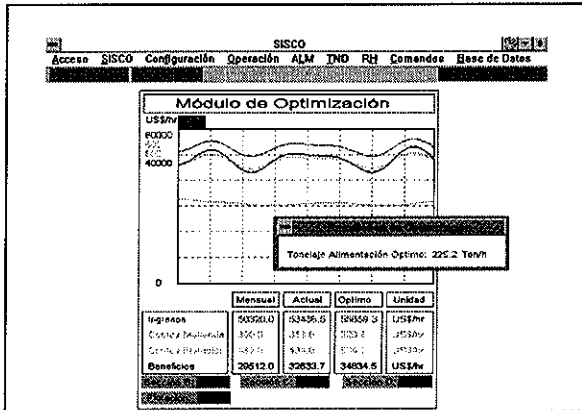


Figura 4. Módulo de Optimización.

3. CUANTIFICACION DE BENEFICIOS

A continuación se presenta un estudio de cuantificación de los beneficios que se obtendrían al utilizar SISCO en una planta concentradora de minerales.

Para calcular los índices económicos, se realizaron las siguientes consideraciones:

- los Beneficios económicos fueron definidos como la diferencia entre los ingresos y los costos:

$$\text{Beneficios} = \text{Ingresos} - \text{Costos} \quad (1)$$

- los Ingresos se calcularon como la multiplicación del precio del cobre concentrado (P_{cc}), la recuperación del cobre (R_{FLOT}), la ley de alimentación a flotación (g_a), y el tonelaje total de procesado (Ton):

$$\text{Ingresos} = P_{cc} \cdot R_{FLOT} \cdot g_a \cdot \text{Ton} \quad (2)$$

- los Costos representan la suma de los costos involucrados en la planta concentradora de minerales, es decir los costos de molienda, los costos de flotación y los costos fijos:

$$\text{Costos} = C_{\text{Molienda}} + C_{\text{Flotación}} + C_{\text{Fijos}} \quad (3)$$

- para el cálculo de los costos de molienda y flotación se utilizaron las expresiones:

$$C_{\text{Molienda}} = (P_{AC} \cdot R_{AW} + P_W)W \quad (4)$$

$$C_{\text{Flotación}} = k \cdot \text{Ton} \quad (5)$$

donde P_{AC} es el precio del acero empleado en bolas y revestimientos, R_{AW} es la razón de acero/energía, P_W es el precio de la energía eléctrica y W es la energía eléctrica total consumida en la molienda. Por otra parte, los costos de flotación corresponden principalmente a cal, colectores y espumantes, los que son proporcionales al tonelaje procesado Ton. k es la correspondiente constante de proporcionalidad.

Los gráficos de la Figura 5 presentan la evolución de la función objetivo durante 24 horas y para 4 días de la operación de la planta. La función objetivo fue determinada como los beneficios dados por (1) con costos fijos estimados en 22.000 US\$/hora.

Los valores obtenidos muestran que los costos variables son pequeños en comparación a los ingresos y a los costos fijos, por lo cual la variable de mayor influencia es el tonelaje. En todos los gráficos se aprecia una alta variabilidad en la función objetivo, la que puede cuantificarse en términos de la media y la desviación estándar, como se muestra en la Tabla 1, en la cual se analizan 14 días continuos de operación.

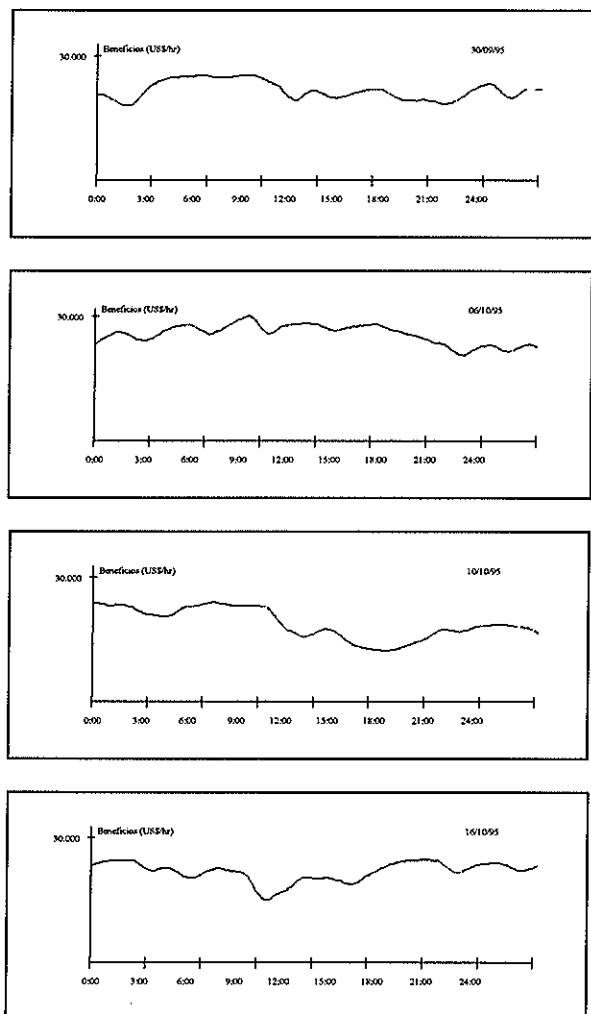


Figura 5. Evaluación de los beneficios económicos durante 4 días distintos.

Como las variaciones del beneficio mostradas en la Figura 5 siguen en el tiempo a los del tonelaje procesado, las situaciones de mayor beneficio corresponden a tonelajes altos, los que provocan sobrecargas en los molinos, que a su vez se reflejan en abruptas caídas de la potencia, lo cual obliga al operador a reducir tonelaje. Producto de ello se reducen también los ingresos y los beneficios generados dando origen a la alta variabilidad antes indicada.

Considerando que la visualización de la función objetivo facilita al operador desplazar su media, en la Tabla 1 se realiza un análisis de sensibilidad que plantea tres escenarios posibles: optimista, medio y pesimista. En el escenario optimista se considera que con el apoyo de SISCO el operador consigue reducir en un 10% la desviación estándar del beneficio. Este porcentaje disminuye a 5% y 2,5% en los escenarios medio y pesimista. Como consecuencia de ello, es factible esperar que la media del beneficio económico se incremente en el mismo monto en que se reduce la desviación estándar.

En la misma Tabla se incluye los beneficios adicionales que se espera obtener con esta reducción de variabilidad en la función objetivo económica, determinados para 1 año de operación.

Se estima así que estos beneficios adicionales aportados por la utilización de SISCO variarán entre US\$ 551.000 y US\$ 2.205.000 al año. Aún en el escenario más pesimista, que corresponde al caso 11, la recuperación de la inversión que implica la instalación de SISCO se realiza en aproximadamente 4 meses.

Tabla 1 Análisis del beneficio esperado

Caso	Beneficios Medidos		Beneficio Adicional Esperado		
	US\$/hora	US\$/hora	US\$/año		
	Media	Desviación Estándar	Escenario Optimista	Escenario Medio	Escenario Pesimista
1	24.054	1.895	1.659.871	829.936	414.968
2	24.660	2.231	1.954.759	977.379	488.690
3	20.719	2.148	1.881.560	940.780	470.390
4	22.069	2.317	2.029.508	1.014.754	507.377
5	20.841	2.472	2.165.393	1.082.697	541.348
6	16.884	3.560	3.118.595	1.559.298	779.649
7	12.616	2.231	1.954.260	977.130	488.565
8	16.664	1.356	1.187.593	593.797	296.898
9	15.739	2.813	2.464.363	1.232.182	616.091
10	19.294	1.923	1.684.382	842.191	421.095
11	21.145	796	697.611	348.806	174.403
12	19.984	2.249	1.970.474	985.237	492.619
13	19.456	2.464	2.158.744	1.079.372	539.686
14	14.496	6.787	5.945.088	2.972.544	1.486.272
TOTAL	19.187	3.512	2.205.157	1.102.579	551.289

4. CARACTERISTICAS TECNICAS

4.1 Configuración

SISCO trabaja con una base de datos en tiempo real que almacena tanto las variables físicas y económicas del proceso, como las variables de configuración. El usuario, a través de la interfaz de operaciones, fija los valores de estas variables de configuración para establecer distintas relaciones y/o restricciones en las variables almacenadas en la base de datos. De esta manera es posible configurar:

Indices económicos que se ingresan como expresiones aritméticas. A manera de ejemplo, la Figura 6 presenta cómo se ingresan las expresiones (1), (2)... (5). La Tabla 2 muestra la definición de la base de datos para esta configuración.

Expresiones aritméticas:	
BENEF	= INGRESOS - COSTOS
INGRESOS	= PCC*RFLLOT*GA*TON
COSTOS	= C_MOL + C_FLOT + C_FIJ
C_MOL	= (PAC*RAW+PW) *W
C_FLOT	= K*TON

Figura 6. Configuración de índices económicos.

Tabla 2 Definición de la base de datos

Nombre	Descripción	Valor	UI
BENEF	Beneficios	33472,1	US\$/hr
INGRESOS	Ingresos	54276,0	US\$/hr
COSTOS	Costos	20803,9	US\$/hr
C_MOL	Costos Molienda	312,3	US\$/hr
C_FLOT	Costos Flotación	491,6	US\$/hr
C_FIJ	Costos Fijos	20000,0	US\$/hr
PCC	Precio Cu Conc	80,0	US\$/Ton
RFLLOT	Recuperación	0,92	p.u.
GA	Ley Alimentación	1,2	%
TON	Tonelaje	614,5	Ton/hr
W	Energía	5204,8	kWh
PAC	Precio Acero	600,0	US\$/Ton
RAW	Razón Acero/Ener	0,0	gr/kWh
PW	Precio Energía	0,06	US\$/kWh
K	Constante	0,8	-

Restricciones que definen los límites superiores e inferiores de las variables técnicas del proceso. SISCO emite señales de alarma cuando se violan estas restricciones. Por otra parte, en el cálculo que tiene lugar en Módulo de Optimización, SISCO determina el óptimo satisfaciendo estas restricciones.

4.2 Modelación

La descripción del proceso utilizada en los modelos del Módulo de Consulta puede ser tanto empírica, como a partir de relaciones fenomenológicas que describen el comportamiento de las variables más relevantes.

En el primer caso, los modelos utilizados son en general lineales y dados por:

$$y_k = \bar{y} + b_1(u_{1,k} - \bar{u}_1) + \dots + b_n(u_{n,k} - \bar{u}_n) \quad (6)$$

donde:

- y_k es la variable de salida en el instante k ($k = 1, \dots, N$),
- \bar{y} es el valor medio de la variable y determinado sobre una ventana de N valores,
- $u_{i,k}$ es la muestra k de la variable de entrada i
- \bar{u}_i es el valor medio de la variable de entrada u_i , también calculado sobre una ventana de N valores,
- $\{b_j\}$ es el conjunto de parámetros del modelo.

Los modelos se emplean en el esquema de predicción adaptativa que se presenta en la Figura 7. Los parámetros del modelo se actualizan periódicamente utilizando registros de operación de N muestras.

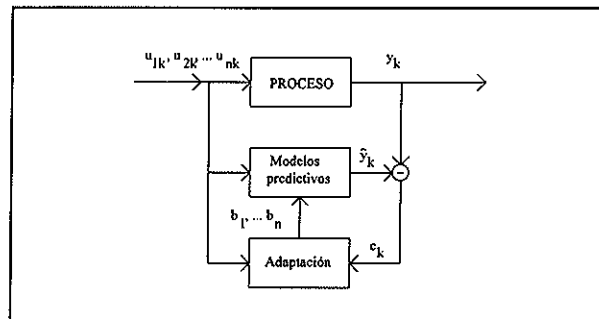


Figura 7. Esquema de predicción adaptativa.

4.3 Algoritmo de optimización

SISCO utiliza como algoritmo de optimización el de las coordenadas. En este algoritmo se varía una de las variables independientes de la función objetivo, manteniendo las otras constantes, hasta encontrar un máximo en esa dirección. Esta operación se realiza con cada una de las restantes variables de optimización. El ciclo se repite hasta que exista convergencia a un máximo de la función objetivo. En cada evaluación de la función objetivo, el algoritmo analiza si las restricciones impuestas se satisfacen, y si el óptimo calculado es factible.

La Figura 8 muestra esquemáticamente la operación del algoritmo de optimización para una función objetivo f de dos variables x_1 y x_2 . Inicialmente x_2 se varía hasta encontrar la zona de restricciones, por lo cual se modifica la dirección de búsqueda a x_1 . Luego se aumenta x_1 hasta encontrar el máximo en $f=20$, repitiéndose sucesivamente el procedimiento hasta converger al máximo de f .

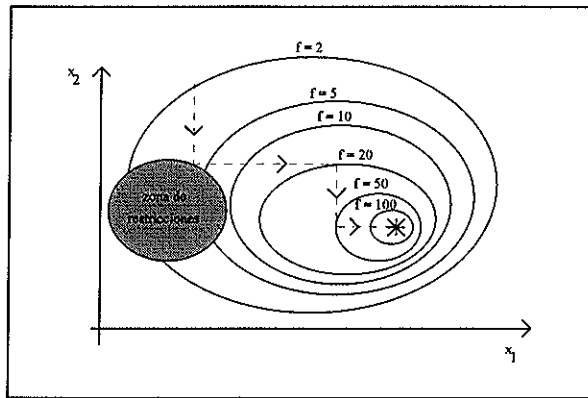


Figura 8. Algoritmo de optimización de las coordenadas.

4.4 Plataformas de SISCO

Una primera versión de los tres módulos de SISCO (Evaluación, Consulta y Optimización), desarrollada sobre SCAUT II/VMS, ha sido probada experimentalmente en una planta concentradora de la minería chilena. Actualmente se encuentra en desarrollo una versión en SCAUT- 3G para Windows. SCAUT II/VMS y SCAUT- 3G son productos de Sonda Automatización.

4.5 Instalación de SISCO

Para instalar SISCO en una planta productiva es necesario:

- Definir y configurar los índices económicos y la función objetivo que se evaluarán y optimizarán.
- Asignar valores a los parámetros involucrados en los índices económicos y en la función objetivo.
- Definir las restricciones operacionales.
- Adecuar SISCO a la plataforma de automatización existente en la planta. Si bien es cierto que SISCO ha sido desarrollado en una plataforma SCAUT, SISCO puede ser adaptado sin dificultades significativas a otros sistemas de automatización.
- Analizar y sintonizar los modelos predictivos requeridos por los módulos de Consulta y Optimización.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo de SISCO ha permitido comprobar que las estrategias de control óptimo económico presentan dos características importantes:

- son relevantes desde un punto de vista de aplicación industrial, pues se enmarcan en las políticas de gestión de la empresa actual, y
- requieren la aplicación de conceptos de control avanzado, específicamente de control predictivo (Camacho, 1995) y de técnicas numéricas sofisticadas, para ser efectivas.

Si bien SISCO fue inicialmente desarrollado para el control óptimo económico de plantas concentradoras de minerales, en la actualidad se trabaja para extender su potencial de aplicación a otras áreas, en particular relacionadas con la generación de energía.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a FONDEF por financiar el proyecto MI-17, Automatización en el Procesamiento de Minerales, y a FONTEC por financiar el proyecto SISCO: Un Sistema Integrado para Supervisión y Control Óptimo Económico de Procesos Industriales.

REFERENCIAS

- Camacho E., Bordons C. (1995). Model predictive control in the process industry. *Springer-Verlag London Limited, Great Britain.*
- Cipriano A., Muñoz C., Quezada M., Cáceres J. (1995). Economic optimal control of a grinding-flotation plant. *Proceedings of the Conference International COPPER'95*, 26 al 29 de Noviembre de 1995, Santiago, Chile, Vol.2 pp. 205-212.