

Título: Reglas de Conducta para la Operación de Procesos

Autores: José Arzola Ruiz

jararzola@ceter.cujae.edu.cu

Osmel Martínez Valdés

omartinez@udm.cujae.edu.cu

Resumen: En el presente trabajo se define el concepto de Reglas de Conducta para la operación de procesos tecnológicos. Se presenta una metodología para la determinación de las variables que intervienen en estas reglas, como resultado del Análisis del Sistema del objeto estudiado y se brindan ejemplos concretos de aplicación propios de tecnologías de calentamiento y deformación de metales, así como de Ruedas Desecantes para la deshumidificación en sistemas de acondicionamiento de aire, para una variante concreta de esta tecnología.

Palabras claves: Optimización, Reglas de Conducta, Funciones de Aproximación, Calentamiento de Metales, Control de Procesos, Ruedas Desecantes.

Summary: In the present work the concept of Behaviour Rules for the operation of technological processes is defined. A methodology for the determination of the variables that must be involved in these rules, as a result of the Analysis of the studied System object is presented. Concrete examples of application, characteristic of heating technologies and deformation of metals, as well as of Desiccant Wheels for the dehumidification in air conditioning systems, for a concrete variant of this technology are offered.

Key words: Optimization, Behaviour Rules, Approximation Functions, Metals Heating, Processes operation, Desiccant wheels.

Introducción.

Desde su nacimiento y durante su desarrollo, el hombre, como resultado de la educación e incluso de forma inconsciente va adoptando determinados comportamientos automáticos frente a las diferentes situaciones a las que se enfrenta en su vida. Estos comportamientos van definiendo reglas de cómo conducirse o proyectarse frente a las múltiples situaciones de cambio inesperadas para él. En Psicología a estas reglas se le dan denominaciones tales como estereotipos de

conducta, reflejos condicionados, etc. En aplicación de esta idea a la operación de procesos este concepto recibe el nombre de *regla de conducta* [1, 3]. De igual manera, en los sistemas de dirección, se podría también establecer reglas de conducta, es decir, reglas que establezcan de manera eficiente y con precisión conocida, el valor que deben de tomar las variables de decisión para garantizar un funcionamiento próximo al deseado o requerido por el sistema de mayor nivel en el mínimo tiempo y al mínimo costo posible.

En la ingeniería, la operación de procesos es una de las tareas más complejas a la cual el ingeniero, sea cual sea la rama que ocupa, debe de enfrentar. En ella, uno de los elementos decisivos es el proceso de toma de decisiones asociado, el cual siempre se realiza persiguiendo objetivos múltiples entre los que encuentran la minimización de los costos y del consumo de energía, la maximización de la productividad, y otros.

Por lo general, no basta con decidir bien, sino que también hay que decidir de una manera eficiente, en esto juega un papel importante la *rapidez* con la que se decide, frente a un determinado cambio de comportamiento del sistema, que incluye la determinación de las variables ó parámetros de entrada del proceso, para lograr un determinado compromiso entre los indicadores de eficiencia ó parámetros de salida del proceso, que satisfaga los requerimiento del sistema de mayor envergadura, el que siempre está representado por el decidor, el que puede estar constituido por una persona, grupo de personas o por un sistema automático que tiene que ver con (que actúa sobre) el sistema que se requiere operar.

La Regla de Conducta se elabora para determinar la *decisión* mas adecuada en cada posible nueva condición concreta en la que se encuentra el proceso a operar, permite reducir la complejidad del problema de la optimización bajo criterios múltiples, utilizando modelos de alta complejidad, asociada a la operación del proceso, la que requiere de mucho tiempo de procesamiento y consumo de memoria, para lo que se hace necesario, normalmente, la utilización de PC industriales de alto costo, con altos requerimientos de fiabilidad, trabajando en tiempo real, para ser utilizada en procesos tecnológicos de agregados cuyos costos suelen ser comparables al del sistema de operación y control mismo. Esto esta condicionado por la complejidad de los algoritmos de optimización y cálculo de opciones posibles, que en la mayoría de las veces, presuponen la utilización de procesos de simulación y un gran numero de restricciones de todo tipo.

Entre los factores que determinan la existencia de las Reglas de Conducta se

encuentra la necesidad de la adecuación de los parámetros de operación y la comunicación al resto de los sistemas que se encuentran asociados en una estructura de toma de decisiones de forma inmediata y su entrega al sistema de control para compensar el comportamiento azaroso del medio circundante al sistema al ritmo del proceso, respondiendo así muy rápidamente a los cambios rápidos que se puedan presentar. En ocasiones, estas operaciones se dificultan por disímiles motivos como pueden ser la distancia física entre cada sistema, problema en los puentes y medios de conexión, utilización de medios de cómputo de bajo rendimiento; incluyendo, la demora de procesamiento de cada uno de los sistemas ya antes mencionada.

Por lo antes expuesto, puede ocurrir que al disponer de la solución óptima asociada a un determinado cambio en la situación del sistema, esta resulte tardía, lo que tendría como consecuencia, pérdidas de todo tipo (energía, materias primas, etc.) al proceso productivo o a la empresa en general. Este problema, sin embargo, puede ser solucionado si se realiza un procesamiento fuera de línea para las diferentes combinaciones de soluciones eficientes (óptimas bajo criterios múltiples), tanto para cada uno de los sistemas, como para el sistema mayor de cual ellos forman parte; generándose un nuevo modelo de ajuste, el cual toma en cuenta los principales parámetros del proceso, las restricciones y otras perturbaciones que pueden ser propias del problema.

Estos modelos de operación generados, se les da el nombre de *Reglas de Conducta*, permiten determinar un comportamiento próximo al óptimo de trabajo, de determinados parámetros del sistema, evitando todos los problemas antes mencionados y mejorando considerablemente el tiempo en la toma de decisión sobre el proceso; por lo que juegan un papel importante en la automatización de la operación de procesos.

Análisis del sistema de toma de decisiones por tareas

Las tareas de preparación de decisiones propias de la ingeniería, se someten a análisis externo e interno (Fig. 1). La fundamentación de este Análisis se estudia en [1]. Como resultado del Análisis, se determinan las variables de decisión de la tarea objeto de estudio x , las que son aquellas variables que pueden ser modificadas a voluntad por el decisor, los indicadores de eficiencia y que constituyen aquellas variables que determinan la calidad de comportamiento del proceso, las variables de coordinación u , del sistema mayor del que forma parte el proceso estudiado, las variables intermedias g , que se someten a restricción, y los datos de entrada d que constituyen los datos de información

requerida, pero que no está directamente asociada al sistema estudiado y constituyen datos determinísticos o de comportamiento aleatorio.

En [2] se establece por el autor principal de esta ponencia la correspondencia existente entre la estructura matemática de la tarea de toma de decisiones con la estructura de descomposición mas adecuada de la misma, coincidente con estructuras organizativas establecidas por el hombre, como resultado de su evolución histórica. Entre las estructuras señaladas se encuentra la estructura centralizada.

En la figura 1 se ilustra el modo de funcionamiento de esta variante de la estructura centralizada: el sistema de mayor nivel elabora acciones directivas que son de obligatorio cumplimiento para los sistemas del nivel inferior. Para un funcionamiento eficiente de esta estructura se requiere de la utilización de funciones de aproximación de las acciones óptimas de los sistemas del nivel inferior, dependientes de la acción directiva recibida del nivel superior. Este tipo de estructura resulta muy frecuentemente apropiada, entre otros, para los sistemas de operación de procesos, en los que el tiempo de preparación de decisiones resulta muy limitado. La calidad de funcionamiento del sistema depende de la calidad de elaboración de las funciones de aproximación mencionadas.

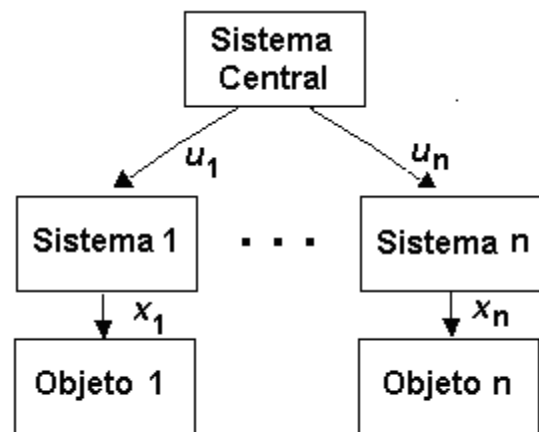


Fig. 1. Estructura centralizada.

La tarea de toma de decisiones a ser solucionada se puede expresar, en este caso, por el siguiente modelo conceptual

$$\left. \begin{aligned} \min_x (x_1, \dots, x_n; y_1, \dots, y_m; g_1, \dots, g_r; d_1, \dots, d_k; u_1, \dots, u_p) \\ \vdots \\ \min_x (x_1, \dots, x_n; y_1, \dots, y_m; g_1, \dots, g_r; d_1, \dots, d_k; u_1, \dots, u_p) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$g_i^{inf} \leq g_i(x_1, \dots, x_n; y_1, \dots, y_m; g_1, \dots, g_r; d_1, \dots, d_k; u_1, \dots, u_p) \leq g_i^{isuo}$$

$$x_i^{inf} \leq x_i \leq x_i^{sup}; \quad i = (1, \dots, n).$$

donde:

$$z_j(u, d, x, g) = \theta_j y_j(u, d, x, g),$$

$$\theta_j = \begin{cases} 1 & \text{si el indicador } y_j(u, d, x, g) \text{ debe ser minimizado} \\ -1 & \text{si el indicador } y_j(u, d, x, g) \text{ debe ser maximizado} \end{cases}$$

g_j^{inf}, g_j^{sup} : Límites inferior y superior que puede adoptar la variable intermedia restringida j .

x_i^{inf}, x_i^{sup} : Límites inferior y superior que puede adoptar la variable de decisión x_i .

Las funciones $g_i(x; y; g; d; u)$ y $y_j(x; y; g; d; u)$ en el modelo (1) – (2), dependientes de sí mismas, expresan el carácter generalmente implícito de los modelos que describen los complejos problemas tecnológicos, los que requieren para su solución la utilización de métodos numéricos, lo que unido a la necesidad de realizar un gran número de cálculos durante la búsqueda de soluciones próximas a las eficientes (óptimas bajo múltiples criterios) determinan tiempos de procesamiento excesivamente prolongados.

Como resultado de la solución del modelo anterior se obtienen los valores de x que se corresponden con la solución finalmente adoptada por el decidor como función de las variables de coordinación u y de las entradas d . Los valores de las componentes de los vectores y , z y g dejan de perder su significación, pues ya fueron utilizadas en la determinación del valor óptimos de las variables de decisión x .

Es posible entonces elaborar un plan experimental de variación de u , d y obtener, como resultado del proceso de optimización los valores óptimos de x para cada combinación de u , d dados.

Definición de Regla de conducta.

Procesando los resultados del plan experimental adoptado para la solución del modelo matemático anterior, se obtienen funciones de aproximación con la siguiente estructura:

$$x_i^{opt} = F(u, d), \quad i, \dots, n, \quad (3)$$

Es decir, funciones tales que permiten hallar el valor óptimo de las variables de decisión como función de los valores de las variables de decisión del nivel superior (variables de coordinación) u y de los datos ajenos al nivel superior y a su entorno inmediato d .

En la Figura 2 se muestra una representación gráfica de una regla de conducta hipotética, dependiente de una sola variable de coordinación. Se repleta en curvas discontinuas los valores inferiores y superiores del error de determinación.

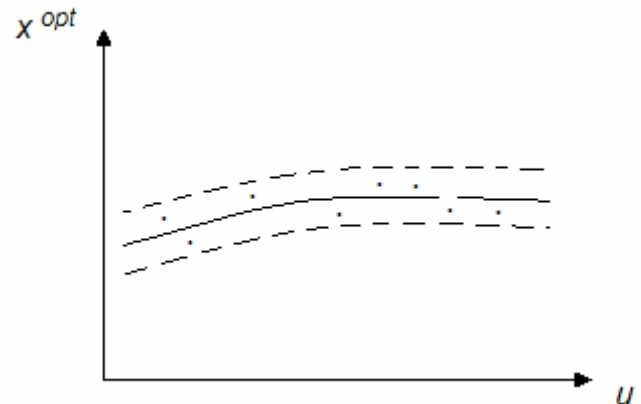


Fig. 2: Representación gráfica de una regla de conducta.

Es claro que la solución óptima puede no coincidir con el valor calculado mediante la regla de conducta, sino que se encuentra en un entorno determinable, por el error estándar alcanzado por la función de aproximación utilizada, alrededor del valor calculado por la regla de conducta. En ocasiones, se conoce que el valor óptimo de las entradas está en un cierto entorno, pero la ley que gobierna la conducta del proceso, en ese entorno, se ignora. Esto, en particular, pasa después del cálculo de los valores óptimos de las variables de decisión por una regla de conducta. La búsqueda del óptimo real se realiza, a partir de mediciones directas del proceso, con ayuda de sistemas extremales. Como es bien conocido por la literatura dedicada al Control Automático, estos sistemas “buscan” el óptimo real variando las entradas en el sentido de optimizar una variable de salida. Los sistemas extremales constituyen un caso particular de los sistemas adaptivos [12].

Algunos casos de estudio

1. Conciliación del régimen térmico en hornos metódicos y del régimen de deformación del acero en molinos de laminación.

Se dispone de un sistema computacional destinado para la síntesis de calibraciones de molinos de laminación de perfiles. Este sistema permite, entre otras tareas, elaborar funciones $E_L(T, \rho)$ que caracterizan la energía necesaria para deformar 1 tonelada de palanquilla hasta el perfil requerido como función de la temperatura de inicio de laminación (fin del calentamiento).

Un segundo sistema debe elaborar el régimen térmico de un horno de calentamiento de forma tal de minimizar la energía total en calentar y en deformar cada tonelada de palanquilla procesada.

Formulación de la tarea de conciliación:

$$\text{Minimizar: } E_T = E_H(T, \rho) + E_L(T, \rho) \quad (4)$$

Asegurando:

$$T_{sup}(T, \rho) \geq T_{sup}^{min} \quad (5)$$

$$\Delta T_{s.c.} \leq \Delta T_{s.c}^{max} \quad (6)$$

Donde:

$E_H(T, \rho)$: Energía necesaria para calentar cada tonelada de palanquillas desde la temperatura circundante hasta la temperatura T , con una productividad ρ ,

$E_L(T, \rho)$: Energía necesaria para deformar la palanquilla desde sus dimensiones iniciales a las del producto terminado, determinada por una Regla de Conducta que se obtiene mediante el procesamiento de los resultados brindados por un Sistema Automatizado de cálculo y optimización de regímenes de deformación del acero durante su laminación.

T_{sup} : Temperatura calculada de la superficie del acero a la salida del horno.

T_{sup}^{min} : Valor mínimo establecido para T_{sup} .

$\Delta T_{s.c.}$: Diferencia de temperatura calculada entre la superficie y el centro de la palanquilla a la salida del horno.

$\Delta T_{s.c}^{max}$: Valor máximo establecido, como dato de entrada, para $\Delta T_{s.c.}$

El cálculo de las temperaturas de la superficie y del centro del metal, el consumo energético, estimado en este caso como la masa en kgs. del combustible a consumir, por tonelada de metal producida, se calculan por las metodologías habituales utilizadas en la literatura destinada al

estudio de estos procesos (ver, por ejemplo, [9, 10]).

La realización de un plan experimental de la solución del modelo (4) - (6), realizado, en este caso por el método de Exploración en una Red de Variables, con penalización por el incumplimiento de las restricciones [4], y el procesamiento ulterior de los resultados, dan la posibilidad de utilizar los resultados del modelo para operar el proceso, en correspondencia con el caso de estudio siguiente.

2. Operación de hornos de calentamiento en talleres de laminación

El estudio de esta tarea se inicia por la de mayor envergadura, de la cual ella forma parte, en calidad de subtarea. El sistema de toma de decisiones del taller de laminación debe solucionar la tarea de compatibilización del trabajo de diferentes agregados del taller al ritmo del proceso productivo, y asegurar el cumplimiento del gráfico operativo de trabajo establecido por el sistema de toma de decisiones empresarial. El objetivo del trabajo del sistema de toma de decisiones del taller consiste en la minimización de los gastos totales en calentamiento y laminación del metal, asegurando el cumplimiento de determinada tarea productiva (productividad establecida) y las propiedades mecánicas previstas para las diferentes hornadas.

La solución al modelo matemático para diferentes valores de productividad (ρ) permite hallar funciones de aproximación (es decir, próximas por sus valores numéricos), a los valores óptimos de temperaturas $T = (T_1, \dots, T_n)$ con respecto a ρ , donde T_i es la temperatura establecida para la zona i del horno. Estas funciones de aproximación constituyen *reglas de conducta*, las que pueden ser elaboradas separadamente para cada marca de acero. De tal forma, se obtiene un cierto número de funciones $T_{i,j}(\rho)$, cada una de las cuales determina el valor que se debe asignar a la temperatura T de cada zona del horno, en dependencia de la productividad que haya sido establecida por el nivel superior para cada marca de acero que se esté laminando.

3. Operación óptima de ruedas desecantes.

Las ventajas energéticas, económicas y medioambientales de la moderna tecnología de deshumidificación basada en ruedas desecantes han determinado el incremento de sus aplicaciones, en los últimos años, en diversos procesos industriales, los servicios y los sistemas de acondicionamiento de aire [6, 7, 8].

Se requiere elaborar un sistema automatizado para la operación de ruedas desecantes, tomando

en consideración que su costo y el de una computadora personal son del mismo orden de magnitud, por lo que el sistema para la operación de la rueda tiene que ser suficientemente sencillo para poder ser implementado en un chip e integrado con el control.

Para la solución de la tarea de operación de estas ruedas se debe tener en cuenta la siguiente composición de variables:

- Variables asociadas con la necesidad a satisfacer.
 Mpi : Flujo de aire de proceso, el que se determina por los requerimientos de operación del sistema de acondicionamiento de aire, al que presta servicio la rueda, o bien el flujo de aire que se requiere deshumidificar en el objeto al que presta servicio.
 $Wpo^{requerido}$: Humedad requerida del aire a la salida de la rueda, determinada por la aplicación concreta.
- Indicador que caracteriza la eficiencia de la rueda.
Mínima temperatura del aire de proceso (Tpo) a la salida de la rueda, lo que se corresponde con el mínimo consumo energético para el acondicionamiento del aire.
- Restricciones a tener en consideración.
Se debe asegurar la humedad requerida (Wpo^{req}) a la salida de la rueda desecante
Se debe cumplir el balance energético en la rueda.
- Variables de decisión.
 rph : Velocidad de rotación de la rueda desecante
 TR : Temperatura del aire de regeneración.
En condiciones de operación manual, los valores de ambas variables las establece el operador buscando el mejor proceso de transferencia de calor y masa. Para su automatización se requiere elaborar un procedimiento que permita la determinación de sus valores óptimos sin la intervención humana.
- Datos de entrada.
 Tpi : Temperatura del aire de proceso a la entrada de la rueda desecante
 Wpi : Humedad del aire de proceso a la entrada de la rueda desecante
Ambos datos están determinados por las condiciones ambientales, que deben de ser medidas para una correcta operación

Así, la tarea de operación de redes desecantes se puede expresar por el siguiente modelo de optimización

$$(7) \quad \left. \begin{array}{l} \text{Minimizar: } Tpo \\ \text{Asegurando:} \\ Wpo = Wpo^{req} \end{array} \right\} \text{Energía de entrada al proceso} = \text{Energía de salida al proceso}$$

La realización de un plan experimental permite elaborar funciones de aproximación de Tpo y Wpo dependientes de las entradas del proceso, lo que permite, asimismo, solucionar el modelo matemático anterior con ayuda de métodos numéricos conocidos de la Programación No lineal, para valores de las entradas correspondientes también a un diseño experimental (realizado, fuera de línea, en una PC). Como resultado del procesamiento de las soluciones obtenidas del modelo de optimización, se obtienen funciones de aproximación:

$$(8) \quad \begin{aligned} rph^{opt} &= rph^{opt}(Tpi, Wpi, Wpo^{req}, Mpi) \\ TR^{opt} &= TR^{opt}(Tpi, Wpi, Wpo^{req}, Mpi) \end{aligned}$$

Las funciones (8) permiten calcular, con un error conocido y determinado por los errores estándar de las ecuaciones obtenidas, los valores óptimos de ambas variables de decisión como función de las condiciones de operación. La implementación de ambas expresiones permiten establecer una *estructura centralizada* del sistema de operación en la que el nivel central establece los valores Wpo^{req} , Mpi y cada uno de los dos sistemas del nivel inferior calculan los valores requeridos de rph y TR para valores medidos de Tpi , Wpi . En la elaboración de funciones de este tipo el autor utiliza asiduamente funciones de aproximación logarítmico-positivomiales o logarítmico-signomiales. En caso que la precisión de las funciones (8) sea inferior a los requerimientos establecidos, en lugar de estas funciones se puede implementar un algoritmo de operación basado en comandos del tipo "if condición then acción" a partir de los resultados obtenidos de la solución fuera de línea del modelo matemático (7), o bien implementar un sistema extremal para la búsqueda, en los entornos determinados por los intervalos de confianza de ambas variables, de sus valores óptimos (de mínimo consumo energético), a partir de los valores calculados por ambas reglas de conducta. Un caso particular de Regla de Conducta puede estar dada, por la interpolación de los resultados experimentales obtenido como resultado de la optimización del modelo 7 para los experimentos realizados en correspondencia con el Plan Experimental programado, consistente generalmente en un Plan 3^N.

Conclusiones

1. La idea de los estereotipos de conducta, estudiada por la Psicología es extendible a la operación de procesos, con la ayuda del procesamiento fuera del línea, mediante un plan experimental del modelo matemático de toma de decisiones

- aproximación de los valores óptimos de los resultados alcanzados en dependencia de las condiciones de operación.
2. Con ayuda de las Reglas de Conducta elaboradas se pueden calcular los valores óptimos de las variables de operación de procesos tecnológicos como entrada a los sistemas de control correspondientes, para el aseguramiento del cumplimiento de los valores óptimos alcanzados.
 3. En el caso que el error de determinación de los valores alcanzados supere los valores permisibles pueden ser utilizados sistemas extremales en la búsqueda de los valores óptimos reales en la proximidad del valor correspondiente calculado por la regla de conducta.

Bibliografía:

1. Arzola R.J. Sistemas de Ingeniería. Editorial Félix Varela, La Habana, 2000.
2. ARZOLA J. , FIOLE A. "Mathematical Formulation and system analysis of Engineering Decision Making Tasks based on Principles of Cybernetic Approach", *Proceeding del III Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería III SELASI*, Curicó, Chile, 2007.
3. ARZOLA J. Y L. SUÁREZ. Reglas de Conducta en la proyección y conducción de procesos de calentamiento del acero. *Rev. Argos (3)*, Saltillo, México, 1992.
4. Bertsekas, D. P.: *Nonlinear Programming*. Athena Scientific, second edition, 1999.
5. Boyd, S. and L. Vandenberghe: *Convex Optimization*, Cambridge University Press, 2004.
6. Carbonell T. Modelación matemática para la operación de ruedas desecantes de silico-gel 3:1. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, La Habana, 2008
7. Desiccant Application in Operating Rooms. <http://www.gastechnology.org>; 2000.
8. Desiccant/Enthalpy Dehumidification Rotors. <http://www.klingenburg.de>; 2002.
9. Kribandin. V.A. Filimonov. Yu. P. "Teoría construcción y calculo de hornos metalúrgicos." *Metalurgia* 1978. Tomo 2. (en ruso)
10. Suárez. García Luís. "Combustibles, hornos y refractarios. 2007". Folleto para la asignatura de Pirometalurgia II.
11. Pont, A y col.: *Métodos estadísticos, Control y mejora de la calidad*, Ediciones UPC, Barcelona, 1994.
12. OGATA, K. *Ingeniería de control moderna*. Ed. Prentice Hall, México D.F., 1990.