

Diseño de Sistemas de Procesos: Un Enfoque Integrador

Orlando J. Domínguez, Julián E. Finetti, Raquel L. Michel y Bárbara M. Villanueva
Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ingeniería, INBEMI, Avda. Bolivia N°5150,
(4400) Salta-Argentina (e-mail: orlando@unsa.edu.ar)

Resumen

Este trabajo pretende contribuir al diseño de procesos, como una alternativa a los diferentes problemas que conlleva el tema. Se propone, como novedad, resolver dicho problema, a través de la integración de conceptos económicos y tecnológicos y resolviendo el problema de la incertidumbre en la toma de decisiones con la consideración de funciones de pérdida de calidad. Se formula un problema de optimización global que puede ser descompuesto a nivel de subsistemas y se resuelve este problema dual empleando un mecanismo de coordinación de metas. Se logra así un planteo metodológico que intenta abarcar varios aspectos del problema en cuestión lográndose resultados satisfactorios. El método propuesto permite resolver el problema de diseño de sistemas de procesamiento en forma consistente con las normas derivadas de la teoría económica con una carga de trabajo similar a la de los métodos usuales, con la ventaja adicional de suministrar mayor información.

Palabras claves: diseño de procesos, diseño integrado, análisis económico, ingeniería concurrente, optimización global

Process System Design: an Integrated Approach

Abstract

Process design have received wide attention in the literature. A very large number of papers referred to this topic may be find based on: Processing Systems Engineering; classical programming; robust stochastic programming; probabilistic programming; fuzzy logic; genetic algorithms and artificial intelligence. In this paper a new approach is presented, it provides a solution to the problem of process design integrating economics and technologic concepts. Uncertainty in making decision is bearing in mind through quality loss functions. The optimization problem is formulated for the system; this is considered composed by subsystems. Optimization proceeds with a goal coordinated mechanism with each subsystem seeking their own optimum. The methodology posed on the basis described showed satisfactory results.

Keywords: process design, integrated design, economic analysis, concurrent engineering, global optimization

INTRODUCCIÓN

El diseño de procesos involucra una secuencia de etapas, en cada una de ellas se hace necesario tomar alguna decisión, las cuales pertenecen a ámbitos de disciplinas bastante diferentes como por ejemplo las tecnológicas, las económicas, las sociales y las medioambientales. Esto, lamentablemente no significa que el trabajo se reduzca a una mera aplicación de las bases teóricas de cada aspecto involucrado, sino que hacen que el diseñador deba encarar la tarea desde algún enfoque que abarque integralmente cada una de las cuestiones.

Lo anterior fue tratado por Grossmann y Westerberg (2000), a través de la introducción del concepto de Ingeniería de Sistemas de Procesamiento (ISP o PSE), en donde se enumeran características que en este trabajo se han considerado fundamentales: el desplazamiento del interés del ingeniero, desde el cálculo hacia la toma de decisiones; resolución de los problemas desde el punto de vista integral del sector productivo y, reconocimiento de que el medio impone a los problemas un complejo de metas conflictivas.

Si estos temas son objeto del análisis de la teoría económica, surge evidente la importancia del estudio de los fundamentos de esta ciencia para los ingenieros, impone un cambio en el enfoque, tanto de la enseñanza como de la investigación, en Ingeniería Química; sin embargo, esto no se manifiesta en las propuestas relativas de los mencionados autores.

Por otro lado, nada se dice respecto del problema del tratamiento de la incertidumbre, siempre presente en el diseño y operación de plantas. El concepto de PSE ha sido tratado (Varma et al., 2007), introduciendo la cuestión de la incertidumbre, en donde se analiza la integración de la toma de decisiones estratégicas y tácticas de naturaleza económica, reforzando la idea de disponer de un planteo integral.

Se deben citar los trabajos de Nagl et al. (2003) y Xu et al. (2007), en los cuales se aborda el desarrollo de sistemas que sirvan de herramientas soporte para el diseño de procesos; en particular en la última cita, se compara el concepto de ingeniería concurrente con el clásico método secuencial, y se presenta un sistema aún cuando no puede garantizar resultados óptimos. La necesidad de vincular el diseño de procesos con el entendimiento de los procesos empresariales es más que evidente (Tan et al., 2007). Por otro lado también es evidente que la naturaleza incierta y extraordinariamente combinatorial del problema, hacen que la tarea sea ardua en extremo. Se ha trabajado sobre la base de algoritmos genéticos (Jiao et al., 2007; Khosla et al., 2007) para resolver la naturaleza combinatorial. También se han empleado las técnicas clásicas de descarte de alternativas en combinación con la programación matemática, en especial la programación dinámica (Angira y Babu, 2006; Bansal et al., 2003).

La propuesta en este trabajo es contribuir al planteo del importante problema de la integración de los conceptos de la tecnología y la economía en el tratamiento del diseño de procesos. Así, partiendo de lo que se ha tratado de aclarar en los párrafos precedentes, el problema de toda empresa productiva; encontrar el mejor conjunto de decisiones relativas a la naturaleza y cantidad de los bienes a producir y la combinación de inversiones y gastos operativos para obtenerlos; será abordado con un enfoque que pretende ser integrador. Mediante la teoría económica se abordará la elección de la naturaleza y cantidad de bienes a producir, mientras que a través de las técnicas de ingeniería química se resolverá la determinación de los productos, estructura y condiciones de operación. Lo anterior se hará tratando de fundir la frontera, en apariencia rígida, entre el análisis y diseño de los sistemas de procesamientos desde el punto de vista tecnológico y su consideración como proyecto de inversión. Este planteo ha sido probado mediante el empleo de un simulador comercial sobre un ejemplo concreto obteniéndose resultados coherentes y consistentes.

EL ENFOQUE ECONÓMICO

La teoría neoclásica de la economía describe a la empresa productiva, como una unidad de decisión que busca maximizar el beneficio, medido este como la diferencia entre los ingresos recibidos por la

venta de su producción y los costos afrontados para lograr tal producción; estos son considerados como todos los recursos afectados a la producción valorados por sus precios de oportunidad.

$$B = p(Y)Y - Ctot(Y) \quad (1)$$

Donde B representa a la función beneficio, Y al vector de volúmenes de productos, $p(Y)$ a la función de precios de productos y $Ctot(Y)$ a la función de costo total.

La teoría de la inversión extiende este concepto a varios periodos de tiempo, introduciendo el concepto de Valor Actual Neto (VAN) como único criterio racional para la decisión de invertir. Algunos tratamientos cuestionan este modelo de empresa, poniendo en duda estas características. No parece evidente que el objetivo de la empresa sea encontrar el máximo de esta función beneficio (Nelson y Winter, 1996), por otro lado se critica el concepto de unidad de decisión, reconociendo que en la empresa participan actores que poseen metas individuales que no coinciden, en general, con las de la empresa en su conjunto (Milgrom y Roberts, 1992). Otros autores (Lipsey y Christal, 1999), incluyen explícitamente los costos de Investigación y Desarrollo (I&D), que se debe afrontar para mantener la competitividad, introduciendo nuevos productos y procesos. Lamentablemente no se disponen de bases teóricas suficientemente evolucionadas para guiar las decisiones en este sentido. Entre otras cosas, no son claros los procedimientos de cuantificación de esos ítems, ni tampoco resulta posible relacionarlos en forma inmediata con los recursos afectados, mediante una relación similar a una función de producción. El tema es estudiado por importantes grupos de investigación (Georghiou y Metcalfe, 1993; Kastrinos y Hammersley, 1993), pero en este primer tratamiento no se incluirán estos costos en el modelo propuesto. El análisis económico considera que toda la información relativa a la tecnología de producción esta contenida en una función de producción que debe cumplir estrictas condiciones de convexidad y ser continuamente diferenciable (Kreps, 1995; Lipsey y Christal, 1999).

$$Y = F(W) \quad (2)$$

El argumento de la función representa los factores de producción, considerados clásicamente como: trabajo, capital y recursos naturales. La empresa deberá decidir qué y cuánto producir. La decisión racional será la que determine la naturaleza y el volumen de la producción y la combinación de factores que conduzca al máximo beneficio, en última instancia, estos factores se traducen en inversiones y gastos de operación.

La teoría neoclásica trata las condiciones necesarias y suficientes para identificar las decisiones de producción, inversión y operación que aseguran máximo beneficio para las distintas situaciones de mercado; éstas se manifiestan por la forma de la relación que vincula los precios y cantidades de los productos y factores de producción con la estructura de la oferta y de la demanda, son clásicos los casos de competencia perfecta, monopolio, competencia monopolística y oligopolio (Henderson y Quant, 1985; Lipsey y Christal, 1999). Queda así especificada la naturaleza de la información que debe transmitirse entre las dos disciplinas, los economistas esperan recibir de los ingenieros una función de producción que sea operativa para sus técnicas y, los ingenieros pretenden conocer la función que describa el mercado de insumos y productos.

EL ENFOQUE TECNOLÓGICO

La literatura referida al diseño de sistemas de procesamiento es abundante, como base de este trabajo se han elegido solo algunos enfoques; a veces antagónicos, evidencian una falta de acuerdo generalizado en el tratamiento del tema (Linnhoff et al., 1982; Douglas, 1988; Shenoy, 1995; Smith, 1995; Biegler et al., 1997; Seider et al., 1999). Muchos de estos desarrollos se han materializado en sistemas de computación para simulación y diseño.

El modelo generalmente utilizado es similar a:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x, y), \quad \text{s. a} \quad h(x) = 0 ; \quad g(x, y) \leq 0 ; \\ & x \geq 0 ; \quad y \in \{0,1\} \end{aligned} \quad (3)$$

Donde:

$f(x, y)$: Función objetivo.

$h(x)$ Restricciones de igualdad, balances de materia y energía, relaciones de equilibrio, ecuaciones de dimensionamiento, etc.

$g(x, y)$ Restricciones de desigualdad, especificaciones de diseño, restricciones lógicas, etc.

x vector de variables continuas.

y vector de variables discretas.

En casi todo este material se observa un procedimiento muy simplificado de análisis de los aspectos económicos del diseño, considerado como proyecto de inversión. Tradicionalmente, la mayoría de los autores selecciona como función objetivo el costo para obtener una cantidad determinada de producto con la calidad preestablecida. Esta hipótesis está implícita en el modelo presentado. Al proceder de esta manera, los ingenieros transfieren a los economistas la responsabilidad exclusiva en la decisión sobre las características de los productos y el volumen de producción; por otra parte, tampoco el modelo propuesto en este tratamiento puede ser utilizado para resolver el problema desde el enfoque económico planteado en el punto anterior.

TRATAMIENTO DE LA INCERTIDUMBRE

Inicialmente se resolvía este problema mediante el uso de coeficientes de sobredimensionamiento, con valores sancionados por la experiencia o determinados por métodos estadísticos (Takamatsu et al., 1973). La mayoría de los autores, reconoce que es necesario que el impacto de la incertidumbre sea considerado, desde las primeras etapas del diseño de procesos y en este sentido se proponen enfoques más sistemáticos, introduciendo el concepto de flexibilidad (Biegler et al., 1997), empleando distribuciones de probabilidad conocidas (Janak et al., 2007) o a través de diversas técnicas de programación (Balasubramanian y Grossmann, 2003; Sahinidis, 2004; Bansal et al., 2003; Bernardo et al., 2001). En estos tratamientos no se hace consideración alguna sobre el efecto que la incertidumbre tiene sobre la operación y el control. Una revisión de este tratamiento puede ser consultada en Grossmann y Straub (1991) y Biegler et al. (1997).

El concepto de calidad, vinculado estrechamente con la incertidumbre, también ha sido incorporado dentro del diseño, han proliferado trabajos basados en los conceptos de Ingeniería de Calidad y Diseño Robusto (Taguchi et al., 1989 y 1990). La base de este enfoque es el reconocimiento de que toda desviación, con respecto a su valor nominal, de las variables que definen la calidad funcional de un proceso o producto produce una pérdida económica y que esta pérdida puede determinarse explícitamente a través de una función que tiene como argumentos la varianza de la variable de calidad y la diferencia de su valor medio con el especificado, (Ostrovsky et al., 1994; Georgiadis y Pistikopoulos, 1998; Bernardo et al., 1999). Este enfoque permite el tratamiento simultáneo de la optimización de las variables de diseño y las tolerancias de las variables de operación, brindando las bases para el diseño integrado de los sistemas de proceso y su control. Todos estos autores utilizan como función objetivo el valor esperado de los resultados, esto viola las conclusiones de la teoría de von Neumann-Morgenstern (vN-M) para la toma de decisiones (Harsanyi, 1991), donde se demuestra que la única función objetivo racional es el valor esperado de las utilidades de los resultados. Por lo general no se hacen explícitas las hipótesis que pretenden justificar estas simplificaciones.

ENFOQUE PROPUESTO

El enfoque propuesto es resolver el problema de diseño sin restricciones respecto a la calidad y cantidad del producto, el resultado será un tratamiento unificado de los aspectos tecnológicos y

económicos del problema de diseño. Se plantea así el problema del diseño de sistemas de procesamiento desde el punto de vista de una empresa productiva, como un problema de maximización del beneficio, teniendo en cuenta, en forma explícita, el costo económico de la desviación de las normas de calidad y reservando como una de las variables de decisión la definición de la cantidad y calidad de producto a obtener. El método de solución propuesto se basa en descentralizar las decisiones al nivel de subsistemas de la planta, pudiendo llegar hasta el de equipos individuales y en la utilización de un simulador comercial. Se plantean así dos alternativas: obtener en forma empírica las funciones de producción y propagación de desviaciones de calidad, necesarias para resolver analíticamente el problema de optimización, o proceder a la búsqueda directa del diseño óptimo por exploración de la superficie de respuesta en el espacio de las variables de decisión. En las publicaciones citadas en el punto anterior solo se consideran las variaciones de calidad en los productos finales, en este caso, la forma y los parámetros de la función de penalización de esos productos puede ser determinada a partir de un análisis de su mercado. En esta propuesta se pretende descentralizar la consideración de la calidad al nivel de los subsistemas y para eso se deberá analizar el problema de la propagación de las desviaciones de calidad y su penalización y determinar la contribución individual de las corrientes intermedias para el caso de secciones de plantas y de equipos individuales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se considera que la empresa productiva está relacionada con el medio por cinco conjuntos de información la cual es tomada como incierta, según se muestra en la Figura 1:



Fig. 1: Sistema tomado como caja negra

Donde Y, X, y D representan al Vector de los resultados, al Vector de insumos y al Vector de decisiones de inversión. Mientras que V y Z representan al Vector de decisiones de operación y al Vector de variables inciertas, respectivamente. La información relativa a los conjuntos X e Y corresponde a situaciones de mercado, que ocurrirán en el futuro. Las decisiones, D y V, deberán materializarse en la construcción y montaje de los equipos y el ajuste de las condiciones de operación; actividades sujetas a errores inevitables. Todos los modelos utilizados para el cálculo o la simulación como también sus parámetros son resultado de aproximaciones teóricas y determinaciones experimentales. Para simplificar el análisis se considerarán incluidas en el conjunto Z sólo aquellas variables más significativas, aceptando las demás como determinadas. El problema de optimización será:

$$\max_{Y,D,V} \langle B \rangle_{Z,V} = \langle P(Y) \times Y - CT \rangle_{Z,V}$$

$$Y = F(D, V, X, Z) \quad (4)$$

$$CT = CF(D, Z) + CV(X, V, Z)$$

Donde, con paréntesis angulares se representa la función valor esperado según la distribución de variables inciertas enunciadas como subíndice. El problema queda resuelto si se conocen: la

distribución de las variables inciertas, las funciones de precios de productos e insumos y la función de producción. Para cumplir estrictamente con las condiciones del teorema de vN-M, la función B deberá ser una función de utilidad que cumpla sus restricciones, básicamente ser invariante ante transformaciones lineales crecientes. Las funciones de precios resultan de un estudio del mercado. Generalmente no se dispone en forma explícita de la función de producción, su obtención es el problema que debe resolver el ingeniero. Para eso se debe considerar la estructura interna del sistema productivo. En el caso general de la industria de procesos, este sistema, tal como se muestra en la Figura 2, está compuesto por un conjunto de subsistemas, vinculados entre sí mediante corrientes, materiales o de información.

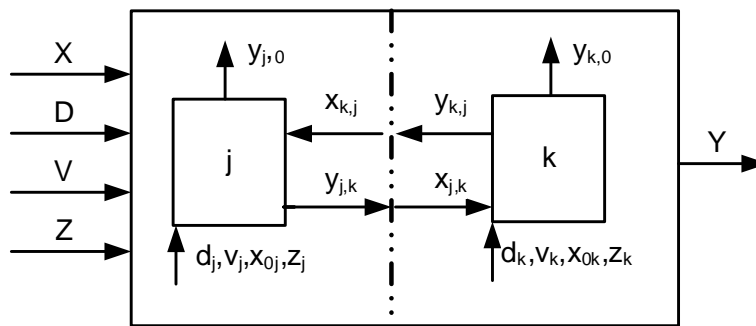


Fig. 2: Sistema y subsistemas

Se pueden reconocer dos subconjuntos de variables: variables que afectan solo a un subsistema, y variables de interconexión, originadas en un subsistema y que afectan a otros. Se usa la convención de designar con letras mayúsculas las variables globales del sistema, que lo vinculan con el medio exterior y con minúsculas las variables correspondientes a los subsistemas, estas tendrán un subíndice cuando correspondan a un subsistema y dos cuando correspondan a corrientes que van del subsistema identificado por el primer subíndice al designado por el segundo, el medio se identifica con el subíndice cero. Las decisiones de operación e inversión se seleccionan de entre estas variables hasta agotar los grados de libertad del sistema y la relación entre ellas se hace explícita a través de una matriz de incidencia que representa las decisiones sobre la estructura del sistema. Las variables seleccionadas como decisiones de operación serán ajustadas en un entorno de su valor nominal cuyos límites, o tolerancias, y varianza serán una función de la calidad y, en consecuencia, del costo del dispositivo de control. Si se considera la aplicación de las técnicas de ingeniería de la calidad se debe incluir explícitamente el término de la función de penalidad, $H(Q)$, como un costo adicional en la función beneficio, queda así:

$$\max_{Y,D,V} \langle B \rangle_{Z,V} = \langle P(Y) \times Y - CT - H(Q) \rangle_{Z,V}$$

$$Y = F(D, V, X, Z) \tag{5}$$

$$CT = CF(D, Z) + CV(X, V, Z)$$

$$Q = Q(D, V, X, Z)$$

La función objetivo así formulada es una función utilidad, según von Neuman-Morgenstern, que tiene en cuenta dos criterios de diseño sobre los que se establecen preferencias: el beneficio económico y la calidad de los productos. La ponderación del efecto de la calidad y su agregación a la función objetivo están implícitas en la elección de la forma y coeficientes de la función de penalidad.

Se considera que cada subsistema procura hacer máximo su beneficio, sujeto a la restricción de un conjunto de precios para las corrientes de interconexión, que actúan como variables de coordinación, en un método similar al propuesto por Schoeffler (1971). Cuando los subsistemas se optimizan en forma independiente, sus corrientes de salida, su oferta, no coincidirán, en general, con las de entrada de los otros subsistemas, sus demandas. Se define como exceso de demanda a la diferencia entre las variables relevantes de las corrientes correspondientes y se establece un mecanismo de coordinación, en un segundo nivel, que guía al sistema a un equilibrio que satisface las restricciones externas. El equilibrio alcanzado se corresponde con el equilibrio de un mercado de concurrencia perfecta y el mecanismo de coordinación opera en forma similar a un subastador walrasiano, ajustando los precios en magnitud proporcional y con el signo contrario al exceso de demanda hasta lograr la convergencia del sistema.

Se obtienen dos sistemas de ecuaciones, que definen los dos niveles de optimización, la convergencia está asegurada y se alcanza el óptimo global. Las propiedades de existencia y unicidad de este óptimo global están demostradas por los teoremas correspondientes para el equilibrio de mercado de perfecta concurrencia (Varian, 1986). De esta manera, aplicando el concepto de ingeniería de la calidad, se tendrán en cuenta los efectos de la incertidumbre sobre los parámetros, tanto los económicos como los que definen el modelo de la tecnología, y las perturbaciones en las variables de control. Se trata ahora de encontrar el conjunto de valores de las variables de diseño para obtener el máximo beneficio.

Esto se logra resolviendo el siguiente problema de primer nivel:

$$B_j = \sum_{k=0; k \neq j}^{NS} p_{j,k} y_{j,k} - \sum_{k=0; k \neq j}^{NS} p_{k,j} x_{k,j} - c_j(x, d, v, z)_j - h_j(d, v, z) \quad (6)$$

$$\max_{d,v} \langle B_j \rangle_{v,z}$$

$$\text{s.a } y_{j,k} = f_{j,k}(d, v, z, x_{k,j})$$

$$\forall k, j: x_{k,j} = y_{k,j}; p_{k,j} > 0 \quad (7)$$

$$Y = \sum_{j=1}^{NS} y_{j,0}; \quad X = \sum_{j=1}^{NS} x_{0,j}$$

En la etapa inicial, se fijan valores arbitrarios para el conjunto de precios de transferencia, $P_{k,j}$, una buena aproximación será elegir valores intermedios entre los insumos y productos, una vez resuelta la primera etapa, se corrigen estos precios en magnitud proporcional y de signo contrario a los valores de exceso de demanda observados, se repite la operación hasta que los excesos de demanda sean inferiores a una tolerancia prefijada. Cuando se satisfacen todas las condiciones estipuladas, se cumple que el benéfico global se hace igual a la sumatoria de los máximos benéficos individuales con lo que el problema queda resuelto. La determinación de las funciones de penalidad por pérdida de calidad para las corrientes de conexión entre los subsistemas puede ser realizada, (Finetti et al. 1999). Y se buscó determinar el conjunto de precios de transferencia que conduzcan al equilibrio empleando técnicas de programación.

El resultado obtenido fue confirmado utilizando la herramienta de optimización incluida en HYSYS 3.2 con resultados concordantes. Si bien en la aplicación demostrada se aceptaron fuertes hipótesis, con el objeto de simplificar el procedimiento de solución y adaptarlo a la capacidad de cómputo

disponible, estas no invalidan el resultado obtenido y si se dispone de mayor capacidad de procesamiento se podrá fácilmente tratar problemas más complejos, con descripciones de mercado y distribuciones de incertidumbre más realistas. El conjunto de precios de transferencia obtenidos al resolver el problema contiene toda la información relativa a la estructura del sistema y la propagación del efecto de las incertidumbres y perturbaciones que afectan a la cantidad y calidad de los productos. Si se considera una planta en funcionamiento, es evidente que se ha alcanzado un equilibrio, sus propiedades pueden ser analizadas utilizando este método para determinar los precios de transferencia implícitos. Una vez obtenidos, estos precios podrán ser utilizados para:

Diseño evolucionario: detectar cuellos de botella y proponer modificaciones plausibles de proceso;

Operación evolucionaria: identificar los mejores valores de las variables de operación para adecuar el funcionamiento en la dirección de un óptimo cambiante;

Diseño del sistema de control: identificar los conflictos costo-eficiencia;

Subcontratación de servicios y suministros: identificar las posibilidades y establecer las bases racionales para su contratación; y finalmente

Administración de la empresa: establecer salarios de eficiencia y compartir riesgos e incentivos.

CONCLUSIONES

El método propuesto permite resolver el problema de diseño de sistemas de procesamiento en forma consistente con las normas derivadas de la teoría económica con una carga de trabajo similar a la de los métodos usuales, con la ventaja adicional de suministrar mayor información que puede utilizarse como se mencionó en el punto anterior.

El método puede ser utilizado en todas las escalas, desde equipos individuales hasta la consideración de cadenas de suministro integradas por múltiples procesos distribuidos espacialmente. Si se dispone de herramientas adecuadas de simulación pueden incluirse todas las actividades de la empresa, no sólo las productivas, en un tratamiento unificado. Se ha obtenido una real integración del tratamiento de los aspectos económicos y tecnológicos de los problemas relativos al diseño y análisis de plantas de procesos.

El trabajo brinda las bases para continuar estudiando sus aplicaciones que aparecen como muy interesantes.

REFERENCIAS

Angira, R. y Babu, B.V.; Optimization of process synthesis and design problems: A modified differential evolution approach, *Chemical Engineering Science*, 61(14) (2006).

Balasubramanian, J. e I.E. Grossmann; Scheduling optimization under uncertainty-An alternative approach, *Computers & Chemical Engineering*, 27, 469-490 (2003).

Bansal, V. y otros cuatro autores; New algorithms for mixed-integer dynamic optimization, *Computers & Chemical Engineering*, 27(5) (2003).

Bernardo, F.P., E.N. Pistikopoulos, y P.M. Saraiva; Robustness Criteria in Process Design Optimization under Uncertainty, *Computers and Chemical Engineering*, 23, 459-462 (1999).

Bernardo, F.P., E.N. Pistikopoulos y P.M. Saraiva; Quality costs and robustness criteria in chemical process design optimization, *Computers and Chemical Engineering*, 23(1) (2001).

Biegler, L.T., I.E. Grossmann y A.W. Westerberg, *Systematic Methods of Chemical Process Design*, Prentice Hall (1997).

Douglas, J. M.; *Conceptual Design of Chemical Processes*, McGraw-Hill Pub. Coc., N.Y. (1988).

Finetti, J. E., B.M Villanueva, R.L. Michel y O.J. Domínguez; *An Approach to Robust Design – Part II*. American Institute of Chemical Engineers, Annual Meeting 1999, Dallas (USA) Nov. (1999).

Georghiou, L.G. y J.S. Metcalfe; *Evaluation of the Impact of European Community Research Programmes Upon Industrial Competitiveness*, R&D Management, 23(2), Basil Blackwell (1993).

Georgiadis, M. C. y E.N. Pistikopoulos; *Flexibility and Robustness Issues in Process Optimization under Uncertainty*, Centre Report Series A98.15, Centre for Process System Engineering, Imperial College of Science Technology and Medicine, London (1998).

Grossmann, I. E. y D.A. Straub; *Recent Developments in the Evaluation and Optimization of Flexible Chemical Processes*, en Luis Puigjaner y Antonio Espuña (ed.), *Computer Oriented Process Engineering*, Elsevier (1991).

Grossmann, I.E. y A.W. Westerberg; *Research Challenges in Process Systems Engineering*, AIChE J., 46(9), 1700-1703 (2000).

Harsanyi, J.C.; *Normative Validity and Meaning of Von Neumann-Morgenstern Utilities*, International Conference on Game Theory, Florence, Italy, June 25-27 (1991).

Henderson, J.M. y R. Quant; *Teoría Microeconómica*, Ariel Barcelona (1985).

Janak, S.L., X. Lin y C.A. Floudas; *A new robust optimization approach for scheduling under uncertainty: II. Uncertainty with known probability distribution*, Computers & Chemical Engineering, 31(3) (2007).

Jiao, J., Y. Zhang y Y. Wang; *A heuristic genetic algorithm for product portfolio planning*, Computers & Operations Research, 34(6) (2007).

Kastrinos, G. y C.H. Hammersley; *Vocational Profile of Certified Therapeutic Recreation Specialists Based on the 16PF*, Therapeutic Recreation Journal, 27, 186-199. (1993).

Khosla, D.K., Gupta, S.K. y Saraf D.N.; *Multi-objective optimization of fuel oil blending using the jumping gene adaptation of genetic algorithm*. Fuel Processing Technology, 88(1) (2007).

Kreps, D. M.; *A Course in Microeconomic Theory*, McGraw-Hill (1995).

Linnhoff, B. y otros seis autores; *A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*, The Institution of Chemical Engineers, Rugby (1982).

Lipsey, R. G. y K.A. Christal; *Principles of Economics*, 9ª Edición, Oxford University Press (1999).

Milgrom, R. y J. Roberts; *Economics, Organization and Management*, Prentice-Hall, New Jersey (1992).

Nagl, M, Westfechtel, B y Schneider, R.; *Tool support for the management of design processes in chemical engineering*, Computers & Chemical Engineering, 27(2) (2003).

Nelson, R. y Winter, S.; *An Evolutionary Theory of Economic Change*, The Belknap Press of Harvard University Press, USA, Sixth printing (1996).

Ostrovsky, G.M., Y.M. Volin, E.I. Barit, y M.M. Senyavin; *Flexibility Analysis and Optimization of Chemical Plants with Uncertain Parameters*, Computers and Chemical Engineering, 18(8), 755-767 (1994).

- Sahinidis, N.V.; Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities. *Computers & Chemical Engineering*, 28(6-7) (2004).
- Schoeffler, J.D., *Static Multilevel Systems*, en Wismer, D.A. *Optimization Methods for Large-scale Systems*, McGraw Hill, New York (1971).
- Seider, W.D., J.D. Seader y D.R. Levin; *Process Design Principles*, John Wiley and Sons, New York (1999).
- Shenoy, Uday V.; *Heat Exchanger Network Synthesis*, Gulf Publishing Company (1995).
- Smith, R.; *Chemical Process Design*, McGraw-Hill Inc., N.Y., (1995).
- Taguchi, G., E.A. Elsayed y T. Hsiang; *Quality Engineering in Production Systems*, McGraw-Hill, N.Y. (1989).
- Taguchi, G.; *Experimental Design for Product Design*, in Ghosh, S. (ed.), *Statistical Design and Analysis of Industrial Experiments*, Marcel Dekker, Inc, N.Y. (1990).
- Takamatsu, T., I. Hashimoto y S. Shioya; *On Design Margin for Process System with Parameter Uncertainty*, *J. of Chem. Eng. of Japan*, 6(5), 453-457 (1973).
- Tan, W. W. Shen y J. Zhao;; *A methodology for dynamic enterprise process performance evaluation*, *Computers in Industry*, 58(5) (2007).
- Varian, Hal R., *Microeconomic Analysis: A Modern Approach*, W.W. Norton & Company, NY, London (1986).
- Varma, V.A., G.V. Reklaitis, G.E. Blau, G.E. y J.F. Pekny; *Enterprise-wide modeling & optimization-An overview of emerging research challenges and opportunities*, *Computers and Chemical Engineering*, 31(5-6) (2007).
- Xu, L., Z. Li, S. Li y F. Tang;; *A decision support system for product design in concurrent engineering*. *Decision Support Systems*, 42(4), 2029-2042 (2007).