

La incertidumbre y la competitividad

Juan José Bravo B.

Profesor de la Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística Facultad de Ingeniería -Universidad del Valle.

RESUMEN

Se muestra en este artículo la importancia de considerar la incertidumbre y el riesgo dentro del estudio actual de cadenas logísticas de abastecimiento, como factor clave para lograr mayores niveles de competitividad. Se presentará la evidente preeminencia actual de lo estocástico sobre lo determinístico y se hablará de la aplicación actual de modelos estocásticos en la industria. En el artículo se alerta sobre las dificultades de manipular los grandes modelos estocásticos resultantes y se propone el uso de metodologías de descomposición de modelos matemáticos optimizables, haciendo especial atención en el uso de la teoría de las particiones de Benders.

Palabras Clave: Incertidumbre, Riesgo, Competitividad, Optimización, Logística, Modelos estocásticos, Descomposición de Benders.

INTRODUCCIÓN

Es notable en la actualidad la necesidad predominante de tener sistemas competitivos de producción y distribución de materias primas y productos finales, con mayor agilidad y eficiencia que en épocas pasadas, con una productividad tal que permitan absorber las dramáticas crisis macroeconómicas contemporáneas de países en vías de desarrollo como el nuestro. Estamos hablando entonces de la necesidad de optimizar los sistemas empresariales de producción y logística como una estrategia competitiva, y no solo como un reto para las pequeñas, medianas y grandes corporaciones, sino como

una póliza contra eventos futuros cubiertos por el manto de la incertidumbre y el riesgo. El problema de optimización a que nos enfrentamos no es para nada fácil y no solamente se trata de responder, para una clase de empresa específica, preguntas típicas ya de por sí complicadas como: ¿Cuál debería ser el canal óptimo de distribución de productos? ¿Cuántos centros de almacenaje y distribución se deben tener para cubrir adecuadamente la demanda? ¿Cuál debe ser la localización geográfica óptima de las bodegas y de las plantas de procesamiento de productos? ¿Qué modos de transporte utilizar? ¿Qué tamaño óptimo debe tener la flota vehicular de un proceso óptimo de distribución?, ¿Cuál debe ser el flujo óptimo de productos a través de una red nacional o internacional de distribución?, etc. El problema va mucho más allá, y en su dominio actual obliga a formularnos preguntas como las siguientes: en los sistemas de producción y logística ¿qué aspectos fundamentales representan la mayor fuente de incertidumbre, variabilidad y riesgo? ¿es necesario considerar siempre el carácter probabilístico de todos los datos? ¿en cuáles circunstancias la no determinación de lo estocástico es aceptable? ¿De no considerar en los análisis los aspectos estocásticos, cómo sabemos con certeza que un escenario analizado está cercano a un óptimo?, ¿para proponer modos de operación competitivos a la industria nacional, cómo abordar lo estocástico, cómo hacer entendible el resultado a las directivas de una empresa, "cubriendo" en cierto modo las complejidades matemáticas de base necesarias para los análisis?, y así continúan los interrogantes. La buena noticia es que no estamos solos haciéndonos estas interminables pero cada vez más interesantes preguntas. En el mundo universitario hay un gran movimiento actual y se agita permanentemente el tema de la optimización de sistemas con componentes estocásticos tal y como la revisión bibliográfica que se hizo para este documento así lo muestra con claridad.

Para encontrar escenarios pseudo-óptimos o competitivos se requiere de la construcción de modelos simplificados repre-

sentativos de la realidad actual. En general, para optimizar se desarrollan modelos matemáticos "optimizables" siempre que esto sea posible, y dado que es casi imposible llevar un sistema real a un modelo matemático, se emplean entonces los modelos de simulación como herramientas de análisis. Frecuentemente, los modelos más representativos de la realidad son aquellos que incluyen la incertidumbre, duda o característica probabilística de datos de entrada del modelo. Sin embargo, el incluir lo estocástico en un modelo no implica necesariamente que de esa manera se lleguen a encontrar modos de operación óptimos. Es claro que un modelo al parecer en esencia determinístico, que no incluya por conveniencia y facilidad en los cálculos ciertos aspectos estocásticos, deje dudas respecto a lo óptimo que pueda ser la solución final que arroje. No obstante, un modelo que sí incluya ciertos comportamientos estocásticos deja también dudas respecto a la confiabilidad y nivel de error de la solución dado un futuro a todas luces incierto y desafiante. A pesar de la duda que pueda haber, los modelos matemáticos estocásticos están siendo empleados con gran fuerza y en ellos nos centraremos a partir de este momento.

Los Modelos Estocásticos

Los modelos estocásticos son modelos matemáticos donde algunos de los datos o parámetros incorporados en la función objetivo o en las restricciones son inciertos. El término incertidumbre por definición no significa que haya una ignorancia total respecto al comportamiento de un parámetro, y por el contrario se le asocia con el término "duda".

Cuando se dice tener dudas respecto al comportamiento de un dato es porque se asume "cierto conocimiento" acerca de él. Dicho conocimiento se puede plasmar de varias formas. Una forma es manejar los llamados "escenarios". Cada escenario viene a representar el modelo original, con un posible valor determinístico escogido para cada parámetro considerado incierto. Por ejemplo, en un modelo de distribución de productos, es usual tener incertidumbre respecto a la deman-

da de determinado producto en cierto período de tiempo. En este caso, la metodología de escenarios contaría inicialmente con un conjunto $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ que representaría "n" posibles valores que pueda tener dicha demanda, construyéndose entonces "n" escenarios, en caso de ser éste el único parámetro incierto del modelo [Un escenario para cada valor w_j (con $j = 1, \dots, n$)]. Es lógico intuir que posiblemente los w_j del conjunto W no tendrían la misma probabilidad de ocurrencia, caso en el cual a cada escenario se le asigna una probabilidad empírica de ocurrencia² comparable con aquella de los demás escenarios (Existencia de escenarios más probables y menos probables).

Otras formas de abordar el conocimiento acerca de un parámetro es asociar su comportamiento estrictamente a una función de distribución de probabilidad estándar conocida.

En los modelos estocásticos ciertos datos pueden enmarcarse dentro del concepto de aleatoriedad, y debe tenerse en cuenta que cuando algún dato es aleatorio, entonces las soluciones y el valor objetivo pseudo-óptimo del problema particular de optimización son por lo tanto aleatorios.

Aplicación actual de la programación estocástica

Respecto a la aplicación actual de la programación estocástica se puede retomar lo dicho por el profesor Laureano Escudero³, hablando sobre la aplicación en empresas europeas de modelos matemáticos: "Muchas de las aplicaciones tienen datos inciertos, por ejemplo, los costos de materias primas, los tiempos de transporte, la demanda y precio de los productos, disponibilidad de recursos, (...), etc. (...) Las aplicaciones son de gran escala, lo cual significa que no es realista buscar soluciones óptimas, especialmente para los casos estocásticos donde la incertidumbre es representada por un conjunto de escenarios.

² Podría tratarse de probabilidades subjetivas o extraídas del análisis estadísticos asociados a ciertos datos históricos.

³ El profesor Escudero es actualmente el Presidente de Asociación Europea de Sociedades de Investigación de Operaciones EURO.

En términos de los aspectos técnicos, muchas de las aplicaciones tienen parámetros inciertos en la función objetivo. El enfoque estocástico que ha sido usado para enfrentar la incertidumbre de los parámetros es basado en el análisis de escenarios. Además, la selección del conjunto de escenarios representativos es todavía un problema actual⁴.

Se observa cómo el profesor Escudero alerta sobre una posible improvisación en la generación de escenarios, aspecto éste crucial en la determinación de la solución "óptima" de cierto modelo estocástico.

Es de destacar que existe generalmente incertidumbre respecto al futuro. Es muy probable conocer con cierta exactitud lo que sucederá con cierto parámetro en un mes que acaba de iniciar, pero es posible que lo que ocurra dos meses después sea algo incierto. Además, generalmente hay relativas dependencias entre los eventos presentes y futuros; es decir, pueden ocurrir ciertos posibles eventos futuros dado que en el presente ha ocurrido determinado evento, lo que involucra cierta propiedad markoviana.

Una manera lógica de abordar el problema es el siguiente: se requiere tomar una decisión ahora y minimizar el costo esperado de las consecuencias de esa decisión. Supóngase que X ($x \in X$) es un vector de variables de decisión (decisiones que se deben tomar), W ($w \in W$) son los posibles eventos que acarrearán las decisiones en X , y Y ($y(w) \in Y$) es el vector de las nuevas decisiones, a tomar en el futuro, influenciadas por los eventos aleatorios en W . Una formulación sencilla con escenarios del problema en dos fases (two-stage formulation) sería la siguiente:

$$\begin{array}{ll} \text{Minimizar} & f_1(x) + \text{Valor Esperado}[f_2(y(w), w)] \\ \text{Sujeta a:} & g_1(x) \leq 0, \quad \dots \quad g_m(x) \leq 0 \\ & h_1(x, y(w)) \leq 0 \quad \forall w \in W \\ & \dots \\ & h_k(x, y(w)) \leq 0 \quad \forall w \in W \\ & x \in X, \quad y(w) \in Y \end{array}$$

La función $f_1(x)$ corresponde a la función de costos de las decisiones actuales en X o decisiones en la primera fase, y éstas decisiones están sujetas de manera especial por las restricciones $g_1(x)$ hasta $g_m(x)$. Las restricciones h_1 hasta h_k representan las relaciones entre las decisiones x de la primera fase y las decisiones $y(w)$ de la segunda fase. Cada relación debe evaluarse para todo $w \in W$. La función f_2 es frecuentemente el objetivo principal de los modelos matemáticos estocásticos, ya que en el futuro no se busca w , y entonces se toma otra decisión basada en lo que ha ocurrido (y). El objetivo entonces es minimizar los costos esperados de todas las decisiones tomadas.

Optimización estocástica de cadenas de suministro⁵

Considerando el marco anteriormente reseñado, se tomar acciones arbitrarias ante determinados hechos que han sucedido en el pasado sino que lo que se busca es la mejor acción futura de entre muchas opciones posibles.

Dado lo anterior, es muy factible considerar modelos estocásticos multifases (multi-stage) en donde se toma una decisión hoy (x), se espera a que ocurra un evento aleatorio desean esbozar algunas conclusiones de suma importancia, de impacto actual, enunciadas por un conocido catedrático universitario y empresario a nivel mundial como lo es Jeremy F. Shapiro, que además es experto en modelación matemática de cadenas de suministro.

Shapiro afirma que las preocupaciones desde el punto de vista estratégico de los gerentes de las cadenas de abastecimiento de productos pueden resumirse en cuatro principales: a) Analizar las principales decisiones acerca de invertir o des-invertir (liberar activos), b) Entender y explotar las fortalezas internas de la empresa, c) Anticipar y responder a los planes de la competencia, y d) *Enfrentar la incertidumbre y el riesgo*. Con base en esto, dice que existen diversos

⁴ ESCUDERO, L. Trying to Capture Dynamic Behavior. A whirlwind tour of industrial applications of mathematical programming. ORMS Today, vol. 29, No. 2, Abril 2002. pp.48-49.

⁵ Esta sección fue escrita con el apoyo de: SHAPIRO, J.F. *Challenges of strategic supply chain planning and modeling*. Ponencia. FOCAP. enero 2003.

desafíos que deben enfrentarse: "¿Las actividades de compras, producción y distribución pueden ser integradas?, ¿Pueden ejecutarse análisis multi-período para fijar los efectos de la temporalidad y las fases de las principales decisiones? ¿Pueden ser integradas las decisiones de la gerencia de la cadena de abastecimiento con la gestión de demanda? ¿Pueden las decisiones *Financieras Corporativas* ser integradas con las decisiones estratégicas de la cadena logística de suministros?" (Shapiro, 2003. Diapositiva No. 6). Se observa en la exposición de Shapiro, que el término "multi-período" se asocia con tres aspectos: 1. con las principales decisiones a tomar, 2. con el análisis de efectos de temporalidad de las decisiones, y 3. con el análisis de las fases en las cuáles las decisiones deben tomarse (que tiene que ver con la toma de decisiones por partes, teniendo en cuenta las ventajas que ofrecen ciertos períodos de tiempo).

Una propuesta valiosa para abordar estos interrogantes se centraliza en tres estrategias: la formalización de la planeación de escenarios, la aplicación de la Programación Estocástica y la modelación del riesgo. (Shapiro, 2003. Diapositiva No. 14).

Shapiro habla sobre la planeación de escenarios y afirma: "El análisis de múltiples escenarios del futuro en una compañía es el corazón de cualquier ejercicio de planeación estratégica de la cadena logística. El desafío es: ¿cómo definir escenarios que sean consistentes, plausibles y comprensibles?". Sobre cómo definir escenarios opina que se puede lograr según ciertos métodos paso a paso: "los escenarios son descripciones enfocadas de diferentes futuros presentados en narrativas coherentes. (...) Se pueden definir explorando interrelaciones entre tendencias estratégicas y aspectos de incertidumbre." (Diapositiva No. 14).

Esta interesante exposición alerta sobre la preeminencia de lo estocástico (análisis robusto de múltiples escenarios probables, interrelacionados y con planes de acción independientes) sobre lo determinístico (optimización de un solo escenario, que se asume ocurrirá con certeza). Se asume

entonces que la solución pseudo-óptima de un modelo estocástico permitirá entonces dejarnos con los pies un poco más firmes frente al futuro inmediato, dado que éste se vislumbra incierto. Pero como bien lo dice Shapiro en su exposición, existen tres grandes desafíos lógicos para quienes incursionen en la construcción y solución de modelos estocásticos representativos de los sistemas de producción y logística de las industrias actuales: a) Estimar adecuadamente probabilidades de ocurrencia de cada escenario, combinar la información estadística con la subjetiva, b) Usar métodos de optimización múltiple-objetivo para explorar conflictos entre el riesgo y los beneficios, c) Controlar el tamaño del modelo respecto a muchas fuentes de incertidumbre, muchas fases, y desarrollar y aplicar métodos de aproximación usando simulación, agregación y/o descomposición.

Y aquí se ha tocado un aspecto de extrema importancia en la modelación estocástica y es lo relacionado con el *tamaño del modelo*. Generalmente se consideran a los modelos estocásticos como de gran escala y el tratamiento de estos modelos se está abordando a nivel académico-práctico con técnicas de descomposición, y particularmente con la técnica de Particiones de Benders.

Descomposición de modelos estocásticos

Se conoce a las Particiones de Benders como una técnica particular para resolver ciertas clases de problemas difíciles, generalmente de gran escala pero no necesariamente, pudiendo enfrentarse problemas de programación lineal entera mixta (PEM), PEM no-lineal, problemas dinámicos y de programación estocástica, facilitando el camino hacia la solución óptima. El fin general de la metodología se centra en descomponer un problema grande y/o difícil en pequeños problemas presumiblemente más fáciles de resolver. Para establecer el debido enfoque a las posibles aplicaciones de las particiones debe aclararse lo que significa realmente "gran escala". No suena razonable que dicho término signifique necesariamente "muchas variables". Es pertinente y lógico asociar también "gran escala" a "no lineali-

dades", "componentes estocásticos", "componentes dinámicos estocásticos", etc., campos en los cuáles las herramientas computacionales actuales de solución no son muy eficientes o son nada eficientes.

La teoría de Benders fue divulgada por primera vez por J. F. Benders en un artículo publicado en el año de 1962 titulado "Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems", y publicado en Numerische Mathematik Volumen 4. A pesar de no contarse con el original de esta publicación, múltiples artículos sobre el algoritmo de Benders han sido publicados y ampliamente divulgados en la comunidad académica. En los últimos 30 años esta teoría ha tenido numerosas aplicaciones prácticas y en la actualidad goza de gran aceptación para el tratamiento de modelos de programación estocástica.

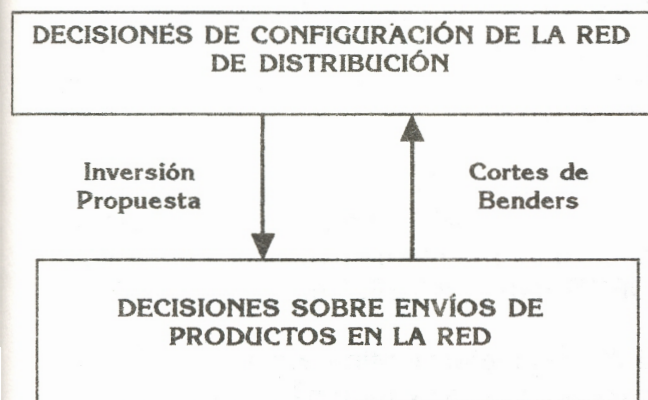


Figura 1. Operatividad de la Descomposición de Benders

Un ejemplo de su aplicación es el siguiente. En sistemas producción-distribución se identifican dos fases o decisiones: a) la Fase de Inversión en Infraestructura, donde se decide cuantas plantas de procesamiento, bodegas y equipos tener y dónde localizarlos físicamente y/o geográficamente en función de la localización del cliente, y b) la Fase de Operación, donde se determinan los flujos óptimos de productos y materiales a transportar en toda la red de distribución. Las primeras decisiones están generalmente asociadas con variables enteras-binarias y las otras decisiones a variables continuas o enteras-no binarias.

En la Figura 1 se muestra un panorama general de la operatividad de la descomposición de Benders: se inicia con una configuración propuesta predeterminada para la red de distribución (que conlleva cierta inversión) para la cual se determinarán los flujos óptimos de productos con el subproblema. Este subproblema generará restricciones o Cortes de Benders que alimentarán el problema maestro para generar una nueva y mejor configuración propuesta para la red. Cada vez se generan mejores configuraciones con sus flujos óptimos asociados hasta llegar a la solución óptima según el criterio de parada de la metodología.

Esta teoría de descomposición, aplicada a casos reales nacionales de sistemas de producción, logística y finanzas, y asumiendo el componente de riesgo e incertidumbre como parte del problema a resolver, es la estrategia de estudio que los grupos de investigación asociados a esta problemática deberían emprender.

Conclusiones

Hemos reconocido que la realidad actual del país requiere de los docentes un enfoque hacia lo práctico y aplicado, enfatizando siempre en aumentar los niveles de competitividad nacional e internacional de nuestras empresas. Es por ello que el estudio de la utilización de herramientas de optimización y simulación en organizaciones empresariales lo estamos afrontando conforme a las tendencias actuales, a los nuevos conceptos, nuevas aplicaciones, nuevas formas de pensar el "mismo problema". Definitivamente la teoría de la probabilidad es cada vez más palpable para los industriales; la necesidad de estudiar lo estocástico se vuelve cada vez más eminente. Dentro de esas necesidades de sofisticación técnica y analítica, los modelos de programación estocástica empiezan a cobrar gran importancia, protagonismo que se empieza a compartir junto con las metodologías necesarias para el tratamiento de esos modelos como lo son en la actualidad las diversas teorías de descomposición.

Bibliografía

- ANGERHOFER, B. y Angelides, M. System Dynamics Modelling in Supply Chain Management: Research Review. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference.
- BACKX, T., Bosgra, O., y Marquardt, W. Towards intentional dynamics in supply Chain Conscious process operations. Invited Paper, FOCAP. Julio 1998.
- BAZARAA, M., Jarvis, J., Sherali, H. Programación Lineal y Flujo de Redes. 2ª edición. Editorial Limusa. México. 1999.
- BIRGE, J.R. Stochastic Programming Models in Design. Universidad de Michigan. 1997.
- _____. J.R. Introduction to Stochastic Optimization in Supply Chain and Logistic Optimization. Northwestern University. Tutorial, Stochastic Optimization. Septiembre 2002.
- _____. J.R. Abridged Nested Decomposition for Multitage Stochastic Linear Programming. Universidad de Michigan. Industrial and Operations Engineering. Mayo 1999.
- _____. J.R. Algorithms for Stochastic Programming based on Stochastic Program Structure. Northwestern University. 2002.
- _____. J.R., y Donohue, C. Recent Results in Large-Scale Stochastic Programming Implementations. Universidad de Michigan. Conferencia dada en Lausanne, Suiza en Agosto 27, 1997.
- BRAVO, J. J. Teoría de la Descomposición de Modelos Matemáticos Optimizables. La Descomposición de Benders. Notas de Clase (en revisión). Universidad del Valle. Marzo 2003. Cali.
- BRIKER, D. Benders Decomposition: The "L-Shaped Method". Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Iowa. 2001.
- CANEL, C., y Khumawala, B. M. Multi-period International Facilities: an algorithm and application. International Journal of Production Research, vol. 35, No.7, pp. 1891-1910. 1997.
- CERISOLA, S., y Ramos, A. Benders Decomposition for Mixed-Integer Hydrothermal Problems by Lagrange Relaxation. Instituto de Investigación Tecnológica. Universidad Pontificia de Comillas. Madrid. 2001.
- _____. S., y Ramos, A. A Finite Benders Decomposition Algorithm for Mixed Integer Problems: Resolution through Parametric Branch and Bound. Instituto de Investigación Tecnológica. Universidad Pontificia de Comillas. Madrid. 2001.
- DOGAN, K., y Goetschalckx, M. A Primal Decomposition Method for the Integrated Design of Multi-Period Production-Distribution Systems. IIE Transactions, No. 31. 1999. pp. 1027 - 1036.
- ESCUDERO, L. Trying to Capture Dynamic Behavior. A whirlwind tour of industrial applications of mathematical programming. ORMS Today, vol. 29, No. 2, Abril 2002.
- FU, M. Simulation Optimization in the Future: Evolution or Revolution?. Robert Smith School of Business and Institute for Systems Research. University of Maryland. INFORMS Journal of Computing. 2002, VOL 14, No. 3, pp. 226-227.
- GEOFFRION, A., y Graves, G. Multicommodity Distribution System Design by Benders Decomposition. Management Sciences, vol. 20, No. 5, enero 1974.
- GOETSCHALCKX, M., Vidal, C. J., y Dogan, K., Designing Global Supply Chain Systems, European Journal of Operational Research, Vol. 143, No. 1, 1-18, 2002.
- MORITO, S., Koida, J., Iwama, T., Sato, M. y Tamura Y. Simulation-Based Constraint Generation with Applications to Optimization

- of Logistic System Design. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference.
- RITCHIE-DUNHAM, J. y Anderson, E. A Strategic Supply Chain Simulation Model. University of Texas at Austin. Proceedings of the 2000 winter simulation conference.
- SARKAR, A. Benders' Decomposition. Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Búfalo, Estados Unidos. 2001.
- SHAPIRO, J.F. Challenges of strategic supply chain planning and modeling. Ponencia. FOCAPO, enero 2003.
- SANTOSO, T., Goetschalckx, M., Shabbir, A. y Shapiro, A. Strategic Design of Robust Global Supply Chains under Uncertainty. Georgia Institute of Technology. 2003.
- SHI, L. y Olafsson, S. An integrated Framework for Deterministic and Stochastic Optimization. Department of Industrial Engineering. University of Wisconsin-Madison. USA. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference.
- VIDAL, C.J. y Goetschalckx, M. Modeling the Impact of Uncertainties on Global Logistics Systems, Journal of Business Logistics, Vol. 21, No. 1, 95 - 120, Abril de 2000.