

DECISIONES OPERACIONALES DE LA CADENA DE SUMINISTRO: UN MODELO PARA LA SUBCONTRATACIÓN

Alex J. Ruiz-Torres* Nelson Alomoto** Adriel Collazo***
Gerardo Molinary**** Elsa Nieves***** Eustaquio Suárez-Bernier*****

Recibido: Febrero 2011 Aprobado: Octubre 2011

RESUMEN

La administración de la cadena de suministro incluye una amplia variedad de áreas incluyendo la subcontratación de la producción. La decisión de producir o subcontratar está sujeta a factores endógenos, como la capacidad y los costos de los centros de producción internos de la empresa, y exógenos -ciertamente poco controlables- tales como la posibilidad de falla de los subcontratistas, lo que vuelve compleja e incierta esta tarea. Dentro de la administración de la cadena de suministro la estrategia de subcontratación está ganando adeptos tanto en economías desarrolladas así como en aquellas emergentes, por las ventajas que trae consigo, como por ejemplo permitirle a las empresas centrarse en sus competencias principales, conseguir la reducción de los costos de producción, y tener acceso a los conocimientos de expertos. Sin embargo, existe poca investigación sobre las decisiones operacionales relacionadas a esta estrategia. En esta investigación se propone un modelo que analiza las decisiones de subcontratación en una red de producción, un componente de la cadena de suministro. El modelo desarrollado permite asignar las cantidades a producir en cada centro interno y las cantidades a subcontratar, minimizando los costos de producción y los asociados a las fallas de los centros de producción. Mediante el análisis de sensibilidad se pone a prueba la consistencia del modelo ante variaciones de diferentes parámetros como: los costos de falla, la flexibilidad de producción de emergencia y la probabilidad de falla de los centros de producción.

Palabras Clave: subcontratación, redes de producción, cadena de suministro, modelos, riesgo

1 Facultad de Administración de Empresas Universidad de Puerto Rico San Juan, PR 00931

2 Facultad de Ciencias Administrativas Escuela Politécnica Nacional Quito, Ecuador

*Autor para correspondencias. Email: alex.ruiztorres@upr.edu

**OPERATIONAL DECISIONS OF THE SUPPLY CHAIN: A MODEL
FOR OUTSOURCING****ABSTRACT**

Supply chain management decisions comprise a wide range of areas including the outsourcing of production. The decision to produce or to subcontract is subject to endogenous factors, like the capacity and costs of the internal production centers of the company, and exogenous and certainly less controllable, such as the possibility of failure from the subcontractors. This makes this task highly complex and uncertain. Within the field of supply chain management, outsourcing of manufacturing continues to gain popularity in both developed economies as well as in those emergent ones given it has multiple advantages, for example allowing the company to focus on its core competencies, the reduction of production costs, and having access to experts. However, there is not a lot of research related to the operational decisions of outsourcing. In this research a model is proposed that analyzes the decision of outsourcing in a production network, a component of the supply chain. The developed model determines the production assignment to each internal center, and the amount to subcontract, minimizing the production costs and those associated with network failures. By means of sensitivity analysis the consistency of the model is tested, considering multiple levels of different parameters like the costs of failure, the flexibility of the production centers, and the probability of failure.

KEYWORDS: outsourcing, decision-making, production networks, supply chain management, risk modeling

INTRODUCCIÓN

El éxito o fracaso de una empresa está fundamentado en el diseño y administración de la cadena de suministro (Chopra y Meindl, 2009a). Esta afirmación adquiere mayor relevancia cuando se evalúa el entorno competitivo y los retos resultantes de la globalización, en donde la competencia ya no se da entre firmas, sino entre cadenas de suministro (Lin y Ou, 2011 citando a Lee, 2008). Administrarla de forma efectiva puede ofrecer una fuente de ventaja competitiva (Li, Ragu-Nathan, Ragu-Nathan y Subba Rao, 2004). Una serie de decisiones son requeridas para la administración exitosa de la cadena de suministro, incluyendo las decisiones operacionales, las cuales tienen como objetivo manejar las órdenes de los clientes de la mejor forma posible (Chopra y Meindl, 2009a). La interrogante acerca de qué tareas se deben llevar a cabo de forma interna, y cuáles se deben subcontratar, es una de las primeras decisiones que enfrentan los gerentes (Chopra y Meindl, 2009b).

La contratación de recursos externos para realizar labores que anteriormente eran internas, típicamente conocida como subcontratación o “outsourcing”, sigue creciendo como una estrategia que le permite a las empresas centrarse en sus competencias principales, así como reducir los costos de producción, tener acceso a los conocimientos de expertos, mejorar la calidad y aumentar la innovación (McCarthy y Anagnostou, 2004; Paulraj y Chen, 2005; Navas y otros, 2007). La subcontratación también implica riesgos que incluyen la dependencia de la organización en proveedores externos, la falta de control sobre las prioridades y la planificación, la pérdida de conocimiento y la fragmentación de la organización (Berggren y Bengtsson, 2004; Dabhilkar y otros, 2009). En economías menos desarrolladas, como es el caso de América Latina, estos riesgos inmersos en la gestión de la cadena de suministro son enfrentados con acciones gerenciales como el

establecimiento de contratos de desempeño con proveedores (Krisnan y otros, 2007). Además, debido al papel protagónico que las micro, pequeñas y medianas empresas (MPymes) juegan en las economías latinoamericanas (Vives y otros, 2005), existen varios estudios que han seguido de cerca su desarrollo. Precisamente, el informe MPyme de 2009 manifiesta que una de las líneas sugeridas para el desarrollo de las MPymes es el establecimiento de alianzas con grandes empresas como proveedoras de componentes para su fabricación (FAEDPYME, 2009).

Aunque la literatura en el campo de la subcontratación ha ganado importancia dado el crecimiento reciente de esta estrategia (eg., Boulaksil y otros, 2011), hay pocos modelos disponibles que pueden ayudar en las decisiones operacionales, por ejemplo qué cantidad de la producción subcontratar. Esta investigación es una extensión al modelo de Ruiz-Torres y Mahmoodi (2008) que analiza las decisiones de

subcontratación en una red de producción considerando los costos de falla asociados con la no entrega a los clientes de la red, en combinación con varios costos de operación. Surgen costos de falla cuando la red no puede satisfacer los requerimientos de demanda de los clientes de la red durante un ciclo de producción, lo que resulta en pedidos no entregados (y por consiguiente en clientes insatisfechos).

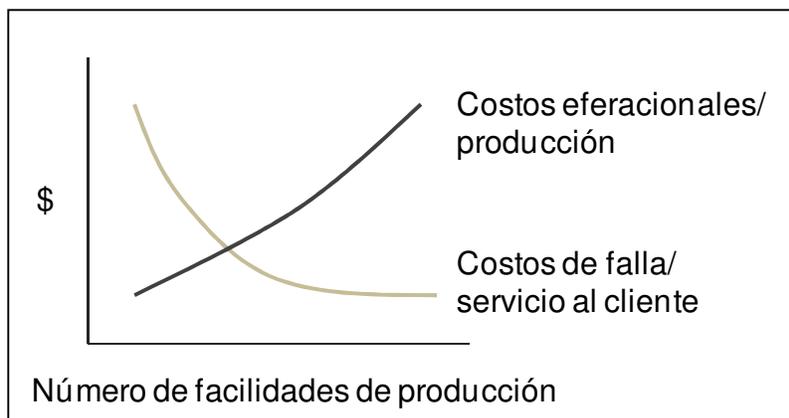
Los costos operativos incluyen dos componentes; los costos fijos asociados con la gestión y el control de las etapas de producción, y los costos variables por unidad que dependen de la fase de producción (incluyendo los pagos de impuestos relacionados a la producción en una ubicación determinada). Un elemento importante de la propuesta de este modelo es la capacidad para utilizar recursos internos y contratados, lo que proporciona redundancia y flexibilidad de aumento de la producción. El modelo presentado en esta investigación amplía el de Ruiz-Torres y Mahmoodi (2008) al considerar la flexibilidad en la

caracterización de los flujos, ya que se considera la posibilidad de cambiar de patrón de subcontratación en cualquier etapa, haciendo el modelo propuesto en este trabajo mucho más aplicable y flexible.

La relación de equilibrio general considerada por el modelo propuesto se presenta en la Figura 1. A medida que las organizaciones adquieren capacidad redundante (por ejemplo, planificando la producción de manera que existan

recursos paralelos con capacidad disponible total superior a la demanda) se reduce la posibilidad de fracaso total del sistema. Por lo tanto, los costos asociados con ventas y clientes perdidos también se reducen. A medida que aumenta la redundancia, la probabilidad de que se cumplan los requisitos de la demanda aumenta, por lo menos en cuanto a entregas parciales. Sin embargo, con mayor redundancia aumentan los costos de producción.

Figura 1. Costos considerados por el modelo



Se considera en este estudio una red de dos fuentes; la primera, definida por la producción por subcontrato y la segunda basada en la producción interna. La justificación

para la evaluación de dos fuentes en cada paso del proceso de producción durante el diseño y la evaluación de la red es obtener redundancia, la cual protegerá la cadena de

suministro en caso de fallas. Varios estudios discuten los costos y las penalidades cuando se compara el aprovisionamiento de una fuente (“single sourcing”) contra múltiples fuentes (“multiple sourcing”) (Kelle y Miller, 2001; Ryu y Lee, 2003).

El modelo que se presenta permite tres condiciones generales en cada fase de producción; producción única por parte de los recursos internos, producción única por parte de los recursos externos (subcontratado), y producción dual en la que ambos recursos son parte del plan de producción. Las primeras dos condiciones equivalen a “single outsourcing”, y la tercera equivale a “multiple outsourcing”. El objetivo del modelo es determinar la red de producción óptima tomando en consideración los costos de falla por no cumplir con los requisitos (de los clientes en términos de unidades producidas), así como los gastos operacionales, incluyendo costos variables, costos fijos y costos de transportación.

Este artículo se divide en cuatro secciones. La sección 2 revisa

la literatura en las áreas de subcontratación y selección de proveedores, enfocándose en los modelos de decisión desarrollados recientemente. La sección 3 discute el modelo propuesto, mientras que la sección 4 presenta un análisis de la sensibilidad del modelo basado en dos ejemplos que consideran varios factores como el riesgo de falla, los costos variables y fijos y la habilidad de los subcontratistas para proveer una mayor producción a la planificada. Finalmente, la sección 5 presenta las conclusiones del estudio.

Revisión de la Literatura

Existe una extensa literatura acerca de las estrategias de subcontratación y la selección de proveedores. Esta revisión se enfoca en investigaciones que presentan modelos desarrollados para las decisiones de subcontratación. Entre estos trabajos se encuentran De Boer et al. (2000), Lee et al. (2002) y Kim (2003). De Boer et al. (2000) proponen un modelo que considera la decisión de compra, en este caso

los proveedores que serán invitados a presentar una oferta para una compra determinada, suponiendo que la cantidad de la orden está fijada de antemano.

Lee y otros (2002) proponen un modelo avanzado de planificación que considera las características de capacidad de los recursos de producción; por ejemplo, los procesos requeridos para determinar la secuencia de operaciones a ser subcontratada. Estos autores propusieron un algoritmo genético para resolver el modelo centrado en reducir al mínimo el tiempo máximo de producción. Kim (2003) considera una organización que puede subcontratar algunas de sus operaciones de fabricación a dos fabricantes por subcontrato. Las variables de decisión incluyen el nivel de procesamiento a realizar por los fabricantes y, así mismo, la asignación a cada uno de ellos. El modelo considera los costos de producción y la capacidad para la mejora de las organizaciones de contrato. También considera el ambiente en el cual los proveedores

pueden enviar piezas o materia prima directamente al fabricante de contrato y, de igual modo, el fabricante de contrato puede enviar partes semi-terminadas al fabricante interno.

Otros trabajos recientes sobre la selección de proveedores y la asignación de los requisitos se enfocan en el desarrollo de modelos que capturan diversas variables del proceso de decisión. En un artículo reciente de Amin, Razmi y Zhang (2011), se utilizan, por ejemplo, variables relacionadas a un análisis de FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, y Amenazas) para cada proveedor. Las caracterizaciones del FODA se implementan en un programa matemático "fuzzy" para apoyar la asignación de los requisitos a los proveedores.

En el artículo de Mendoza y Ventura (2008) sobre la selección de proveedores y la asignación de cantidades se consideran factores más tradicionales como los costos de *setup*, los costos por unidad, y los costos asociados con tener

inventario. Hasan et al. (2008) abordan el diseño y la implementación de un procedimiento para evaluar los proveedores de las organizaciones con manufactura “ágil”. La investigación se centra en determinar los factores cuantitativos y cualitativos apropiados para evaluar y seleccionar proveedores adecuados que se ajusten a las prácticas de agilidad de la organización.

Varios autores se han enfocado en modelos que relacionan la planificación de la producción con la subcontratación de recursos de producción. Boulaksil y Fransoo (2009) consideran el problema donde una organización subcontrata parte de sus actividades de producción y no provee toda la información relacionada a sus planes y recursos de producción. Los autores desarrollan tres estrategias de cómo las órdenes se darán al subcontratista, y desarrollan planes de producción basados en programas matemáticos. Boulaksil et al. (2011) desarrollan un modelo para apoyar las decisiones de un

subcontratista en relación con la flexibilidad de capacidad asignada a cada comprador de sus servicios. Lee y Sung (2008a) consideran el problema de crear secuencias de trabajo en casos de un recurso único de producción con la alternativa de que los trabajos puedan ser subcontratados. En este estudio las métricas de ejecutoria de importancia son la tardanza máxima y los costos de subcontratación.

En otro artículo de Lee y Sung (2008) el problema tratado es similar (un recurso único con opción a producción subcontratada), pero en este caso las métricas de importancia son el costo de subcontratación y el tiempo promedio de entrega de los trabajos. Qi (2011) estudia la planificación de producción en un sistema de dos etapas con opción de subcontratación de algunos trabajos. Se discuten tres versiones del problema desarrollando modelos y algoritmos para cada caso. Safaei y Tavakkoli-Moghaddam (2009) desarrollan un modelo matemático para la planificación de producción y la

formación de celdas de manufactura con los objetivos de minimizar el movimiento de los trabajos, la reconfiguración de las celdas y los costos de inventario. El artículo se enfoca en la relación entre la subcontratación y la reconfiguración de las celdas de manufactura.

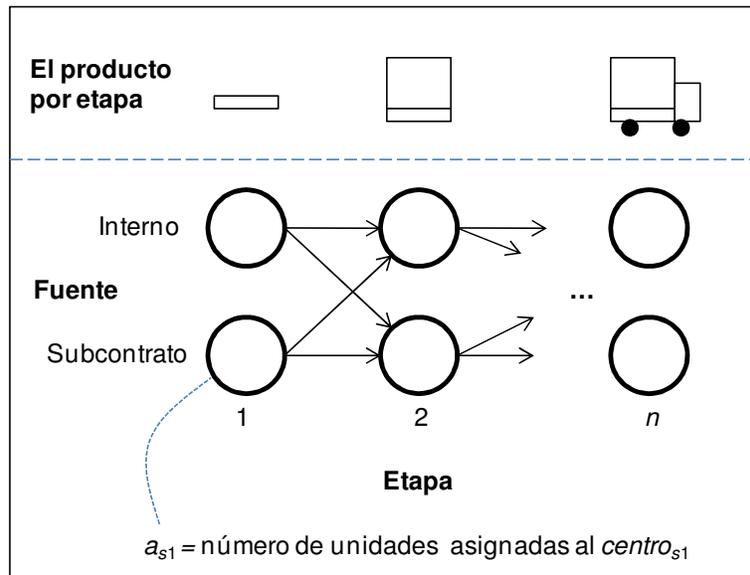
El Modelo

Se consideran n etapas de producción, $N = \{1, \dots, n\}$, y dos fuentes de producción (llamadas centros de producción): fabricantes por subcontrato y fabricación por recurso interno. La red de producción debe satisfacer una demanda total de D unidades. Las variables a_{zj} son las variables de decisión del modelo, y se definen como la cantidad de unidades asignadas a la fuente z de la etapa j . Cuando $z = i$, la variable a_{ij} indica producción interna, y cuando $z = s$, la variable a_{sj} indica producción por subcontrato de fabricación, es decir, $z = \{i, s\}$. Se presume que $D \geq a_{sj} \geq 0$, $D \geq a_{ij} \geq 0$; es necesario asignar la totalidad de

la demanda entre las dos posibles fuentes, por lo cual $a_{ij} + a_{sj} = D$ para todas las etapas j en N . Asociada con estrategias de subcontratación en la que se mantiene algún nivel de producción interna, se define la variable a_{min-j} como la asignación mínima al centro de producción interno en la etapa j , en donde $a_{min-j} \geq 0$.

Se define x_{zj} como una variable de decisión binaria; $x_{zj} = 1$ si el centro de producción zj está activo (se utiliza para la producción), y $x_{zj} = 0$ si el centro de producción zj no está activo. Teniendo en cuenta que al menos una de las dos fuentes debe de estar activa, la restricción $x_{ij} + x_{sj} \geq 1$ aplica para todos los $j \in N$. La Figura 2 muestra una representación genérica del modelo considerado. Es importante notar que cuando se asignan unidades a una etapa, esto se relaciona con una fase del producto (un nivel de ensamblaje) como se ilustra al tope de la figura.

Figura 2. Representación genérica del modelo



Características de los centros de producción

Cada centro de producción z_j tiene un costo por unidad v_{z_j} relacionado con los costos variables, por ejemplo, los asociados a la labor y materia prima añadida en esa etapa. Así mismo, cada centro tiene una probabilidad de no producir p_{z_j} asociada con una situación donde esta facilidad pierde toda su capacidad de producción por falla de un equipo crítico, huelga de empleados, cierre de la frontera, o causas naturales como son las inundaciones, entre otros motivos. La

probabilidad de que el centro esté en función se define como r_{z_j} ; donde $r_{z_j} = 1 - p_{z_j}$. Se presume que las probabilidades de falla son independientes entre centros.

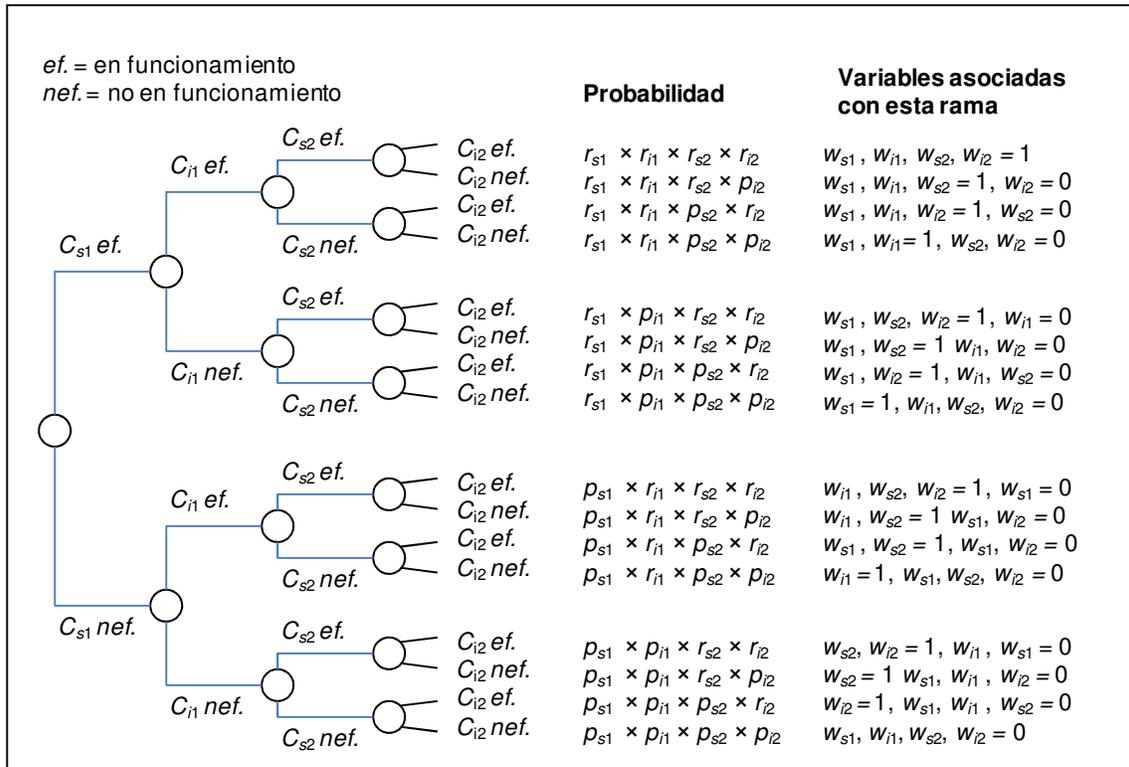
Se incluye el costo de administración relacionado con cada z_j activo en la red, b_{z_j} , que se relaciona con los costos fijos de la etapa/fuente y no depende de la asignación. Cada combinación de fuente y etapa z_j tiene un nivel de flexibilidad f_{z_j} que representa el porcentaje adicional de capacidad para producción de emergencia, donde $f_{z_j} \geq 0$. Por ejemplo, si la

asignación al centro $i1$ ($centro_{i1}$) es de 40 unidades y $f_{i1} = 30\%$, entonces el $centro_{i1}$ puede producir 12 unidades ($40 \times 30\%$) de manera de emergencia. Si $f_{i1} = 0$, el $centro_{i1}$ no puede producir unidades de manera de emergencia. Claro está que el número máximo de unidades que una fuente produciría en cualquier evento es D . Una unidad que se produce de manera de emergencia en el centro de producción z (subcontrato o interno) de la etapa j tiene un costo adicional de e_{zj} .

Para presentar las características asociadas a la redundancia de la red y la probabilidad de falla (no funcionamiento) se utiliza un árbol de decisión. Usar esta representación permite describir los posibles

eventos basados en la probabilidad conjunta de falla de los componentes de la red (los centros de producción). La Figura 3 presenta el árbol de decisión para un problema con $n = 2$. Cabe señalar que el número de ramas es 2^{2n} para el caso general, dado que cada uno de los centros de producción puede asumir dos estados y hay $2n$ centros de producción. Se define la variable $w_{zj\lambda}$ como indicadora de la condición de operación del centro zj bajo el estado de la naturaleza λ , donde, si $w_{zj\lambda} = 1$, el centro está en función y va a producir su asignación (al nivel posible dependiendo de las unidades que lleguen de la etapa anterior), y si $w_{zj\lambda} = 0$, significa que este centro no está en función y no producirá su asignación.

Figura 3. Árbol de decisión con $n = 2$.



Se presume que no hay conocimiento adelantado sobre las fallas en cada estado de naturaleza. En otras palabras, los centros activos en la etapa j producirán a su capacidad (pero basado en los insumos de la etapa $j - 1$), sin considerar posibles fallas en los centros activos en la etapa $j + 1$. Además, se presume que no hay un flujo predeterminado entre los centros de producción de cada etapa; en otras palabras, no se

especifica cuántas unidades del centro de producción c_{s1} van a fluir al centro c_{i2} y cuántas fluirán al centro c_{s2} .

Para los eventos en los que se considera la situación en la cual sólo una de las fuentes falla, la que está en función producirá al máximo de su capacidad de emergencia. No obstante, debe estar claro que lo que esa fuente puede producir está limitado por la cantidad de unidades que le llegó de la etapa anterior. La

ecuación (1) establece el número de unidades que se producen en la etapa j , la ecuación (2) define el número de unidades producidas de manera de emergencia, y la

ecuación (3) el número de unidades no entregadas a los clientes de la red. Se nota que $UP_{0\lambda} = D$ para todos los posibles eventos.

Unidades producidas en la etapa j para el estado de naturaleza λ ,

$$UP_{j\lambda} = \min [D, UP_{(j-1)\lambda}, (w_{sj\lambda} \times a_{sj} (1 + f_{sj}) + w_{ij\lambda} \times a_{ij} (1 + f_{ij}))] \quad (1)$$

Unidades de emergencia producidas en la etapa j para el estado de naturaleza λ ,

$$EP_{j\lambda} = \max [0, UP_{j\lambda} - [w_{sj\lambda} \times a_{sj} + w_{ij\lambda} \times a_{ij}]] \quad (2)$$

Unidades no entregadas para el estado de naturaleza λ ,

$$NE_{\lambda} = D - UP_{n\lambda} \quad (3)$$

A manera de demostración, se asume una red con $n = 3$, $D = 100$, $a_{s1} = 50$, $a_{i1} = 50$, $a_{s2} = 30$, $a_{i2} = 70$, $a_{s3} = 80$, $a_{i3} = 20$, y $f_{zj} = 20\%$ para los 6 centros de producción. En el evento $\lambda = h$ con $\{w_{s1} = 0, w_{i1} = 1\}$, $\{w_{s2}, w_{i2} = 1\}$ y $\{w_{s3}, w_{i3} = 1\}$ la producción en la primera etapa es 60 unidades debido a la flexibilidad de producción de 20% ($UP_{1\lambda} = 60$, $EP_{1\lambda} = 10$), por lo cual cada etapa

subsiguiente puede sólo completar 60 unidades, y 40 unidades del producto final no se entregan a los clientes de la red ($NE_{\lambda} = 40$). En el evento $\lambda = k$ con $\{w_{s1}, w_{i1} = 1\}$, $\{w_{s2} = 0, w_{i2} = 1\}$ y $\{w_{s3} = 1, w_{i3} = 0\}$, la producción en la primera etapa es 100 unidades ($UP_{1\lambda} = 100$, $EP_{1\lambda} = 0$), en la segunda es 84 unidades ($UP_{2\lambda} = 84$, $EP_{2\lambda} = 14$) y en la tercera etapa es 84 unidades ($UP_{3\lambda} = 84$, $EP_{3\lambda} = 4$),

y la red falla por 16 unidades ($NE_\lambda = 16$). Finalmente, en el evento $\lambda = q$ con $\{w_{s1}, w_{i1} = 1\}$, $\{w_{s2} = 0, w_{i2} = 1\}$ y $\{w_{s3} = 0, w_{i3} = 1\}$, la producción en la primera etapa es 100 unidades ($UP_{1\lambda} = 100$, $EP_{1\lambda} = 0$), en la segunda es 84 unidades ($UP_{2\lambda} = 84$, $EP_{2\lambda} = 14$), y en la tercera etapa es 24 unidades ($UP_{3\lambda} = 24$, $EP_{3\lambda} = 4$), y la red falla por 76 unidades ($NE_\lambda = 76$).

Costos por evento

Cada evento tiene dos costos relacionados a las unidades producidas en la red y los productos terminados (en la etapa n) entregados a los clientes. Es obvio que si menos de D unidades fluyen de la etapa $j-1$ a la etapa j , y ambos centros en la etapa j están funcionando, primero se usará el centro de producción con costos

variables más bajos. Para modelar este efecto para cada etapa j se define c_{xj} como el centro con el costo por unidad más bajo ($\min [v_{jz}]$). Se define $q_{x\lambda}$ como la cantidad de unidades que se producen en el centro con costos de producción más bajo, y $q_{y\lambda}$ como la cantidad de unidades que se producen en el centro de producción con costos de producción más altos. Si ambos centros tienen el mismo costo, entonces es irrelevante cuál centro es x o y . Las ecuaciones (4) y (5) establecen la determinación de estas dos cantidades para la etapa j , y la ecuación (6) los costos variables de producción para el evento λ . La ecuación (7) representa los costos variables adicionales para unidades producidas de manera de emergencia.

Si $w_{xj\lambda} + w_{yj\lambda} = 2$:

$$q_{xj\lambda} = \min [UP_{(j-1)\lambda}, a_{xj}] \text{ y } q_{yj\lambda} = UP_{(j-1)\lambda} - q_{xj\lambda}$$

Si $w_{xj\lambda} + w_{yj\lambda} \neq 2$:

$$q_{xj\lambda} = w_{xj\lambda} \times \min [UP_{(j-1)\lambda}, a_{xj} (1 + f_{xj})] \text{ y } q_{yj\lambda} = w_{yj\lambda} \times \min [UP_{(j-1)\lambda}, a_{yj} (1 + f_{yj})] \quad (4)$$

Costos variables

(5)

$$CV_\lambda = \sum_{j \in N} v_{xj} \times q_{xj} + v_{yj} \times q_{yj}$$

Costos variables de producción de emergencia

$$CE_{\lambda} = \sum_{j \in N} (w_{sj\lambda} \times e_{sj} + w_{ij\lambda} \times e_{ij}) \times EP_{j\lambda} \quad (6)$$

La variable u define el costo de no entregar una unidad a los clientes del sistema. Este costo se basa en el concepto de que cada unidad no entregada representa una

venta perdida en este ciclo, así como ventas y clientes perdidos en el futuro. Las ecuaciones (7) y (8) determinan los costos de pérdida y la probabilidad del evento λ .

Costo de falla al cliente

(7)

$$CF_{\lambda} = u \times NE_{\lambda}$$

Probabilidad combinada

$r_{zj})]$ (8)

$$P_{\lambda} = [\prod_{j \in N} [\prod_{z \in \{i, s\}} ((1 - w_{zj\lambda}) p_{zj} + w_{zj\lambda} \times$$

Costos esperados

Se define μ como un conjunto de todos los posibles eventos de un problema. Usando esa definición, los valores esperados para los tres

costos de interés están presentados en las ecuaciones (9), (10), y (11).

Valor total esperado de costos variables

(9)

$$TCV = \sum_{\lambda \in \mu} P_{\lambda} \times CV_{\lambda}$$

Valor total esperado de costos de producción de emergencia

$$\sum_{\lambda \in \mu} P_{\lambda} \times CE_{\lambda} \quad (10)$$

$$TCE = \sum$$

Valor esperado de costos de falla

(11)

$$TCF = \sum_{\lambda \in \mu} P_{\lambda} \times CF_{\lambda}$$

El último costo relevante considerado en este modelo se relaciona con los costos asociados a la administración, certificación y control, los cuales están asociados con los centros de producción activos. El costo total asociado con

los centros de producción activos es representado por la ecuación (12). La suma de los cuatro costos (ecuaciones 9, 10, 11 y 12) representa el costo total del modelo (*TCM*) y el objetivo su minimización.

Costos fijos de los

Centros de producción activos
(12)

$$TPA = \sum_{j \in N} b_{sj} \times x_{sj} + b_{ij} \times x_{ij}$$

Costo y decisión base

La manera tradicional de estimar los costos asociados con las redes de producción no toma como factor los costos asociados con las fallas de entrega y, por lo tanto, simplifica considerablemente el proceso de decisión. La *decisión base* se determina optimizando para cada etapa la suma de los costos variables y fijos; minimizando $\sum_{j \in N} v_{sj} \times a_{sj} + v_{ij} \times a_{ij} + TPA$. Si $a_{min-j} = 0$, la asignación de toda la demanda en la etapa j será a un sólo centro de producción; se asignaría D al centro de producción por *subcontratación* si

$[(v_{sj} - v_{ij}) \times D + b_{sj}] < b_{ij}$, y al centro *interno* de otra manera. Cuando $a_{min-j} > 0$, es un requisito que el centro interno de la etapa j tenga una asignación, por lo tanto, si $a_{min-j} > 0$ y $(b_{sj} - b_{ij}) < (v_{ij} - v_{sj}) \times (D - a_{min-j})$, entonces $a_{ij} = a_{min-j}$ y $a_{sj} = D - a_{min-j}$, de otra manera, $a_{ij} = D$ y $a_{sj} = 0$. Para la *decisión base* se estiman dos costos totales; *B-CVF* ($= \sum_{j \in N} v_{sj} \times a_{sj} + v_{ij} \times a_{ij} + TPA$), que incluyen sólo los costos variables y fijos de la *decisión base*, y *B-TCM*, los cuales son los costos totales al tomar la *decisión base*. Para un caso donde la solución óptima tenga un costo *TCM* y una solución base con costos

B -TCM, se define ε -TCM como el error de usar la solución *base* donde ε -TCM = $(B$ -TCM – TCM)/ B -TCM.

Análisis

Esta sección presenta una serie de ejemplos que demuestran la aplicación del modelo. El objetivo es ilustrar los análisis y resultados que la aplicación del modelo puede proveer a los gerentes de producción y logística. El modelo se implementó en un programable en *Visual Basic for Applications* usando como plataforma Microsoft Excel®. Para que el tiempo de computación fuera aceptable, se consideraron las asignaciones a las fuentes en escalas de 10%D. Para todos los ejemplos se considera $D = 100$, por lo que a cada centro se le asignaron 0, 10, 20,..., 90, 100 unidades de

manera iterativa. Por consiguiente, el número de soluciones (conjunto de asignaciones a los centros) examinado es igual a 14,641 (11^n). En los ejemplos se consideran cuatro etapas ($n = 4$), o sea, hay 256 (4^{2n}) posibles eventos para cada solución (conjunto de asignaciones).

Ejemplo I

Las características iniciales de los ocho centros de producción para el ejemplo I están presentadas en la Tabla 1. El costo de falla es \$500/unidad, y los costos de entrega de emergencia son iguales para ambas fuentes: \$90, \$120, \$75 y \$120 para las etapas 1 a 4 respectivamente. Se considera $a_{min-j} = 0$ para todas las etapas. A los valores de flexibilidad presentados en la tabla se les denomina como nivel *bajo*.

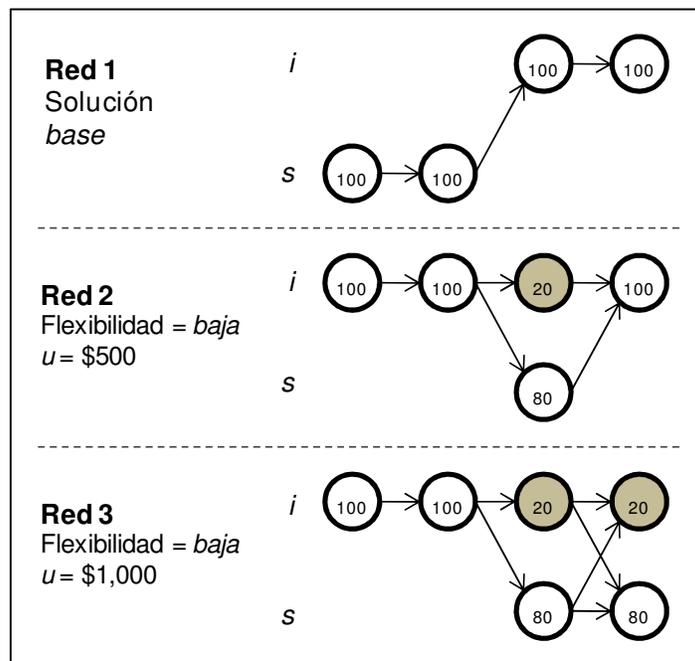
Tabla 1. Características de los centros de producción para el ejemplo I

	C_{s1}	C_{i1}	C_{s2}	C_{i2}	C_{s3}	C_{i3}	C_{s4}	C_{i4}
Flexibilidad (f_{zj})	25%	12.5%	25%	12.5%	25%	12.5%	25%	12.5%
Costos por unidad (v_{zj})	\$9	\$15	\$20	\$23	\$27.7	\$24	\$15	\$13
Costos por centro (b_{zj})	\$200	\$0	\$200	\$0	\$200	\$0	\$200	\$0
Probabilidad de falla (p_{zj})	5.0%	1.0%	1.0%	0.4%	0.5%	5.0%	3.0%	3.0%

Para este ejemplo la solución base es la *red 1* de la Figura 4, donde las primeras dos etapas son por subcontratación y las últimas dos son internas. Esta red tiene un *B-CVF* de \$7,000 y un costo *B-TCM* de \$13,073. Esto indica que al no considerar los costos de falla se subestiman los costos significativamente (\$6,073). La solución óptima (la cual minimiza *TCM*) es la *red 2* de la Figura 4: los nodos sombreados indican una

asignación de 30 o menos unidades. Es interesante que en las primeras dos etapas la solución utiliza una sola fuente, pero es la fuente opuesta a la solución *base*; en este caso se usaron las fuentes con la menor probabilidad de falla. En la tercera etapa se les asigna una parte de la demanda a ambas fuentes, y en la cuarta etapa se utiliza un sólo centro, siendo este el mismo centro de la solución base. El *TCM* de la red 2 es \$10,282 y ϵ -*TCM* es 25%.

Figura 4. Soluciones al ejemplo I con cambios en la variable *u*



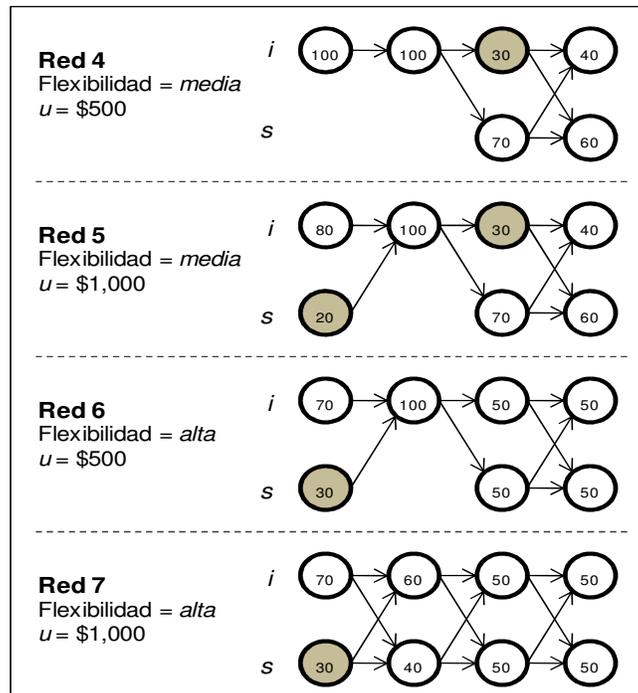
Cambio al costo de falla

El modelo propuesto sirve para estudiar la sensibilidad de las decisiones a cambios en los parámetros de costo, falla o demanda. Por ejemplo, ¿cómo cambia la decisión si el costo por unidad no entregada es el doble del original ($u = \$1,000$)? La *red 3* en la Figura 4 presenta la solución en este caso; tiene un *TCM* de \$12,441. Aunque la solución *base* con esta modificación en el parámetro u es obviamente la misma dado a que los costos de falla no se consideran (sigue siendo la *red 1*), el costo *B-TMC* de la *red 1* cuando $u = \$1,000$ es de \$19,740, o sea que el error ϵ -*TCM* es mayor (37%).

Cambio de la flexibilidad

En este caso se consideran dos niveles adicionales de los valores de flexibilidad; en el nivel *medio* la flexibilidad es el doble de la original (para todos los internos es 25%, y para todos los subcontratados es 50%), y en el nivel *alto* se cuadruplican los valores de flexibilidad originales de todos los centros (para todos los internos es 50%, y para todos los subcontratados es 100%). Las *redes 4 y 5* de la Figura 5 presentan la *red de producción óptima* cuando u tiene asignado valores de \$500 y \$1,000 respectivamente y el nivel de flexibilidad = *medio*, y las *redes 6 y 7* de la Figura 5 cuando el nivel de flexibilidad = *alto*.

Figura 5. Soluciones al ejemplo I con cambios en el nivel de flexibilidad



Como se demuestra en la Figura 5, a medida que la flexibilidad y el parámetro u aumentan, el número de centros activos aumenta. Cuando $u = \$500$, el número de centros activos obtiene los siguientes valores: 5 (flexibilidad *baja*), 6 (flexibilidad *media*) y 7 (flexibilidad *alta*); cuando $u = \$1,000$, el número de centros activos obtiene los siguientes valores: 6 (flexibilidad *baja*), 7 (flexibilidad *media*) y 8 (flexibilidad *alta*). La Tabla 2 presenta los costos relacionados con

los diferentes niveles de flexibilidad. Al u aumentar, los costos totales aumentan debido a que las fallas del sistema tienen un mayor efecto. El error de los costos totales también aumenta a medida que u y la flexibilidad aumentan. La Figura 6 presenta la distribución de los costos para cada uno de los seis casos. Mientras que los costos variables no cambian significativamente, los costos fijos incrementan mientras la flexibilidad y la variable u aumentan (porque hay más centros activos).

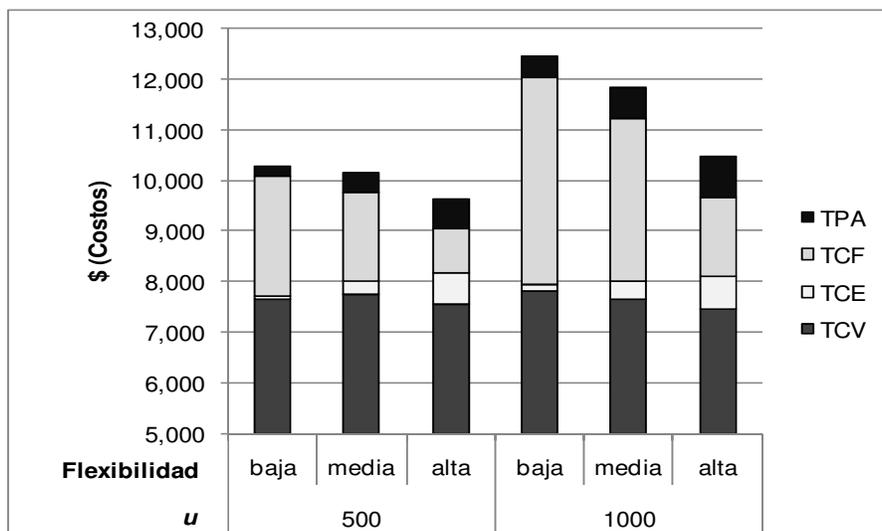
Cuando u aumenta, los costos de falla incrementan, mientras que cuando la flexibilidad aumenta, los costos de falla disminuyen. Ello se explica por la habilidad de los

centros activos de producir más unidades de manera de emergencia, lo cual resulta en la tendencia de aumento de los costos de emergencia.

Tabla 2. Resultados del análisis - ejemplo I

U	Flexibilidad	$B-TMC$	TCM	$\epsilon-TCM$	Red
\$500	Baja	13,073	10,282	21%	Red 2 (Fig. 4)
	Media		10,149	22%	Red 4 (Fig. 5)
	Alta		9,642	26%	Red 6 (Fig. 5)
\$1,000	Baja	19,740	12,441	37%	Red 3 (Fig. 4)
	Media		11,827	40%	Red 5 (Fig. 5)
	Alta		10,458	47%	Red 7 (Fig. 5)

Figura 6. Distribución de los costos, ejemplo I



Ejemplo II

La Tabla 3 presenta las características de los ocho centros de producción para el ejemplo II, incluyendo tres niveles de las probabilidades de falla, los cuales serán considerados como una variable de experimentación. Como se puede notar, la diferencia en los niveles es una reducción en la probabilidad de falla de los centros internos, donde en el nivel 1 la probabilidad de falla de los centros internos es siempre mayor a los

centros de subcontratación, mientras que en el nivel 3 la probabilidad de falla de los centros internos es siempre menor a los centros de subcontratación. Se resalta que los centros de subcontratación siempre venden a precios menores y tienen más flexibilidad que los centros internos (para cada etapa). En este ejemplo el costo de falla (u) es \$750/unidad, los costos de emergencia son iguales al ejemplo I, y los fijos (b_{zj}) son \$0 para todos los centros.

Tabla 3. Características de los centros de producción para el ejemplo II

	C_{s1}	C_{i1}	C_{s2}	C_{i2}	C_{s3}	C_{i3}	C_{s4}	C_{i4}
Flexibilidad (f_{zj})	25%	12.5%	25%	12.5%	25%	12.5%	25%	12.5%
Costos por unidad (v_{zj})	\$3	\$9	\$8	\$11	\$15	\$16	\$5	\$8
Probabilidad de falla (p_{zj})								
Nivel 1	0.9%	4.0%	0.5%	1.4%	0.3%	1.9%	1.5%	6.0%
Nivel 2		1.33%		0.47%		0.63%		2.0%
Nivel 3		0.44%		0.16%		0.21%		0.67%

Se considera el nivel 1 de las probabilidades como punto inicial, y

se asume $a_{min-j} = 0 \forall j \in N$. En la Figura 7 se presenta la red 8, la cual

es la solución base con un $B-TMC = \$5,384$, y la red 9 con un $TMC = \$5,304$, la cual es la solución óptima. En este caso el error, $\varepsilon-TCM$, no es significativo dado que las dos redes son casi idénticas. Es interesante notar que aunque la fuente de subcontrato tiene la mejor oferta para todas las etapas (más flexible, menos costo variable, menos probabilidad de falla), sí existe un beneficio en la producción paralela. La red 10 y red 11 son las soluciones

óptimas si se consideran las probabilidades de falla en el nivel 2 y 3 respectivamente. Como se observa, a medida que la probabilidad de falla de los recursos internos disminuye, aumenta su uso como fuente paralela. Es así porque el aumento en los costos variables no excede la reducción en los costos de falla, resultando en costos totales menores, como se ilustra en la Figura 8.

Figura 7. Soluciones al ejemplo II

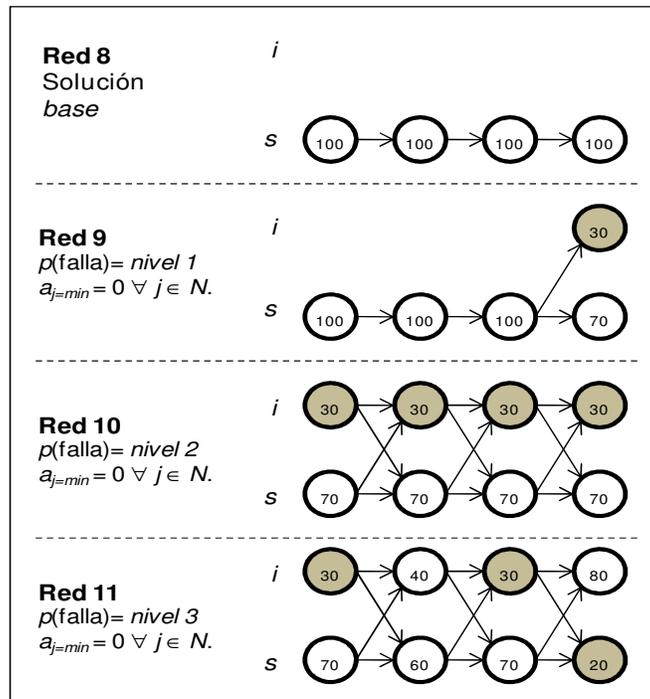
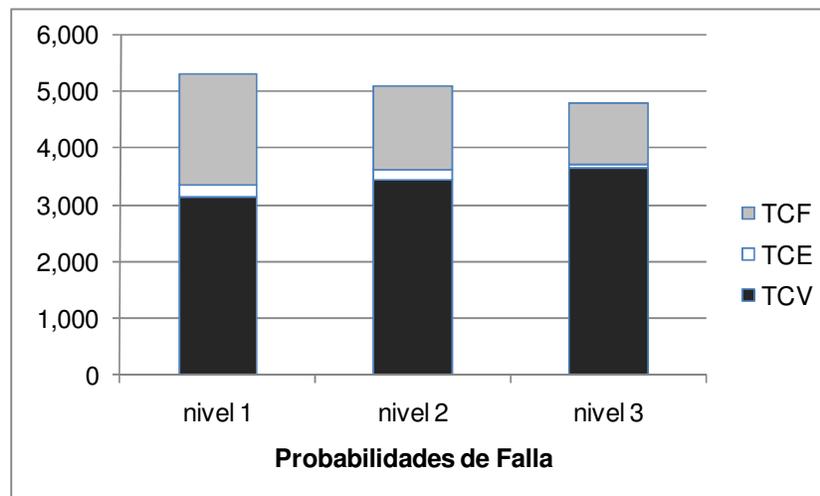


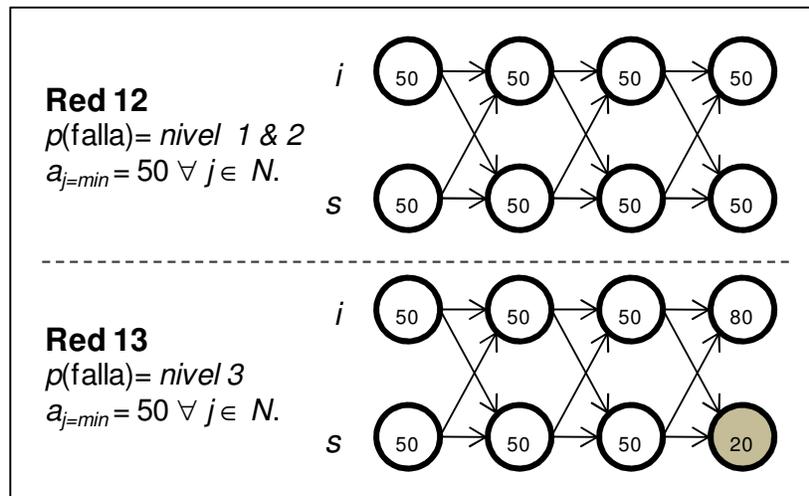
Figura 8. Distribución de los costos, ejemplo II



El requerimiento de que un porcentaje de la producción sea asignado a los recursos internos es parte de las restricciones gerenciales dentro de las decisiones de subcontratación. Suponiendo que $a_{min-j} = 50 \forall j \in N$, las redes 12 y 13 presentan (Figura 9) las soluciones óptimas para los tres niveles de la probabilidad de falla. Cuando las probabilidades están en el nivel 1 (red 12), el $TCM = \$7,272$, por lo cual requerir estos mínimos resulta en un costo adicional de \$1,968 (un 37%). A medida que la probabilidad de falla de los recursos internos

aumenta -y por consiguiente la solución óptima incluye producción en los centros internos-, el costo adicional de asignarles producción disminuye. Cuando el TCM se considera en el nivel 2 de las probabilidades de falla en combinación con los mínimos de 50, resulta en un TCM de \$5,545, lo cual es \$460 por encima del caso en el que los mínimos son 0 (red 10). Finalmente, en el nivel 3 y considerando los mínimos igual a 50, el TCM es solamente \$55 sobre el resultado donde los mínimos son 0.

Figura 9. Soluciones al ejemplo II con asignaciones mínimas a los centros internos



Implicaciones administrativas

Los dos ejemplos (y sus respectivas variaciones) sirven para demostrar el tipo de análisis que este modelo puede apoyar. El modelo apoya la asignación óptima de producción, y provee información acerca de cuál es el cambio en costo si se implementan sistemas que den más flexibilidad o menor probabilidad de falla. Además, el modelo permite estimar cuánto cuesta el requerir que un porcentaje de la producción sea asignado a recursos internos.

RESUMEN Y FUTURAS INVESTIGACIONES

Administrar la cadena de suministro de forma exitosa requiere, entre otras cosas, manejar

efectivamente las órdenes de los clientes incluyendo la creación de sistemas con redundancia que reduzcan el riesgo de no entrega. Cada vez más empresas optan por la estrategia de subcontratación como una alternativa atractiva en la planificación de su producción. No obstante, las ventajas que trae consigo esta decisión acarrear riesgos y costos que deben ser considerados durante el proceso de decisión. La posibilidad de falla en los centros internos de producción y los subcontratados, añade un grado de complejidad que los encargados de la toma de decisiones no alcanzan a manejar. Generalmente, los modelos tradicionales consideran

costos fijos y variables, pero no toman en cuenta el efecto aleatorio producido por las variabilidades de los procesos.

En esta investigación se desarrolla un modelo que incorpora el efecto aleatorio de falla en los centros de una red de producción, que en todas sus etapas considera un centro interno y otro por subcontratación. Debido a la posibilidad de que un centro falle y no produzca, se toma en cuenta la flexibilidad en cada centro para la producción de emergencia. La variabilidad en el proceso de producción se modela a través de una variable que representa la probabilidad de no entregar la cantidad asignada. Consecuentemente, la función objetivo suma los costos esperados de las variables mencionadas, y el modelo determina la cantidad óptima de producción a asignar a cada centro, de tal forma que se minimice la suma total de costos esperados. Al comparar este modelo con el tradicional, se puede evidenciar la subestimación significativa de costos

que el modelo tradicional hace al no considerar los costos de falla.

El análisis de sensibilidad muestra que este modelo puede ser una herramienta valiosa para la toma de decisiones bajo diferentes escenarios. Específicamente, el modelo permite asignar las cantidades óptimas de producción a cada centro, así como apreciar las variaciones en los costos cuando se producen cambios en varios parámetros como la probabilidad de falla, la flexibilidad de producción de emergencia y la preasignación de producción en centros internos. Hay muchas posibles áreas de investigación que pueden ser exploradas en el futuro, incluyendo casos con múltiples fuentes por etapa, y modelos en los que se considere la tardanza de la entrega como un factor relevante.

BIBLIOGRAFÍAS

Amin, S., Razmi, J. y Zhang G. Q. (2011). Supplier selection and order allocation based on fuzzy SWOT analysis and fuzzy linear

- programming. *Expert Systems with Applications*, 38(1), 334–342.
- Berggren, C. y Bengtsson, L. (2004). Rethinking outsourcing in manufacturing: A tale of two telecom firms. *European Management Journal*, 22(2), 211–223.
- Boulaksil, Y. y Fransoo, J. C. (2009). Order release strategies to control outsourced operations in a supply chain. *International Journal of Production Economics*, 119, 149–160.
- Boulaksil, Y., Grunow, M. y Fransoo, J. C. (2011). Capacity flexibility allocation in an outsourced supply chain with reservation. *International Journal of Production Economics*, 129, 111–118.
- Chopra, S. y Meindl, P. (2009a). Chapter 1: Understanding the supply chain. *Supply Chain Management: Strategy, Planning & Operation*. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 3-21.
- Chopra, S. y Meindl, P. (2009b). Chapter 3: Supply chain drivers and metrics. *Supply Chain Management: Strategy, Planning & Operation*. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 44-72.
- Dabhilkar, M., Bengtsson, L., Haartman, R. y Ahlstrom, P. (2009). Supplier selection or collaboration? Determining factors of performance improvement when outsourcing manufacturing. *Journal of Purchasing & Supply Management*, 15, 143–153.
- De Boer, L., Van Dukhuizen, G. y Telgen, J. (2000). Basis for modeling the costs of supplier selection: The economic tender quantity. *Journal of the Operational Research Society*, 51(10), 1128-1135.
- FAEDPYME (2009). Análisis estratégico para el desarrollo de la MPyme en Iberoamérica. *Informe MPyme Iberoamérica*.
- Hasan, M.A., Shankar, R. y Sarkis, J. (2008). Supplier selection in an agile manufacturing environment

- using data envelopment analysis and analytical network process. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 4(5), 523 – 550.
- Kelle, P. y Miller, P. A. (2001). Stockout risk and order splitting. *International Journal of Production Economics*, 71(1-3), 407-415.
- Kim, B. (2003). Dynamic outsourcing to contract manufacturers with different capabilities of reducing the supply cost. *International Journal of Production Economics*, 86(1), 63-80.
- Krisnan, M., Parente, E. y Shulman, J. (2007). Understanding Latin America's supply chain risks. *The McKinsey Quarterly*, edición electrónica, mayo 2007.
- Lee, B. F. (2008). The challenge for competition between supply chain and supply chain. *Supply Management Institute*. Taiwan.
- Lee, Y.H., Chan, S.J. y Moon, C. (2002). Advanced planning and scheduling with outsourcing in manufacturing supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 43(1-2), 351-374.
- Lee, I. S. y Sung, C. S. (2008). Minimizing due date related measures for a single machine scheduling problem with outsourcing allowed. *European Journal of Operational Research* 186, 931–952.
- Lee, I. S. y Sung, C. S. (2008). Single machine scheduling with outsourcing allowed. *International Journal of Production Economics*, 111, 623–634.
- Li, S., Ragu-Nathan, B., Ragu-Nathan, T. y Subba Rao, S. (2004). The impact of supply chain management practices on competitive advantage and organizational performance. *The International Journal of Management Science*, 34, 107-124.
- Lin, J.S. y Ou, J. J. (2011). A study on supply chain value added logistics based on the great Chinese market. *International*

-
- Journal of Electronic Business Management*, 9(1), 58-69.
- McCarthy, I. y Anagnostou, A. (2004). The impact of outsourcing on the transaction costs and boundaries of manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 88, 61-71.
- Mendoza, A. y Ventura, J.A. (2008). An effective method to supplier selection and order quantity allocation. *International Journal of Business and Systems Research*, 2(1), 1-15.
- Nava, A., Nava, M. y Nava, R. (2007). La gestión de la cadena de suministro en el proceso de creación de valor. *Formación Gerencial*, 6(2), 217 – 245.
- Paulraj, A. y Chen, I. J. (2005). Strategic supply management: Theory and practice. *International Journal of Integrated Supply Management*, 1(4), 457 – 477.
- Qi, X. (2011). Outsourcing and production scheduling for a two-stage flowshop. *International Journal of Production Economics*, 129, 43–50.
- Ruiz-Torres, A.J. y Mahmoodi, F. (2008). Outsourcing decisions in manufacturing supply chains considering production failure and operating costs. *International Journal of Supply Chain Management*, 4(2), 141-158.
- Ryu, S. W. y Lee, K. K. (2003). A stochastic inventory model of dual sourced supply chain with lead-time reduction. *International Journal of Production Economics*, 81-82(11), 513-524.
- Safaei, N. y Tavakkoli-Moghaddam, R. (2009). Integrated multi-period cell formation and subcontracting production planning in dynamic cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 120, 301–314.
- Vives, A., Corral, A. y Isusi, I. (2005). Responsabilidad social de la empresa en las Pymes de Latinoamérica. Washington. BID.