

# LA INTEGRACION DE LAS CADENAS DE SUMINISTRO Y SU IMPLICACIÓN EN LA GESTIÓN DEL CAPITAL CIRCULANTE. UN ANÁLISIS MEDIANTE DINÁMICA DE SISTEMAS.

Adolfo CRESPO MARQUEZ

Grupo de I+DT "Organización Industrial", ESI Sevilla, adolfo.crespo@esi.us.es

Oscar RUBIANO OVALLE

Universidad del Valle, Cali-Colombia, oscarruba@pino.univalle.edu.co

Rafael RUIZ USANO, Miguel Angel MUÑOZ PEREZ, José Miguel LEON BLANCO

Grupo de I+DT "Organización Industrial", ESI Sevilla, usano@cica.es

## RESUMEN

*La Dinámica de Sistemas se ha posicionado como una buena herramienta para impulsar la mejora de la gestión en las cadenas de suministro. Los modelos de Dinámica de Sistemas ayudan a comprender la relación entre estructura y patrones de comportamiento de la cadena, de forma que los problemas asociados con estos comportamientos pueden resolverse mediante el conveniente rediseño de la estructura de la cadena, desde el punto de vista de su sistema de gestión.*

*En este trabajo se presenta un modelo genérico de Dinámica de Sistemas para una cadena de suministro de cuatro nodos. En él se presta una atención especial a la representación de los diferentes flujos y acumulaciones existentes en el sistema: materiales, información y recursos financieros.*

*El modelo se utiliza en primer lugar para describir diferentes posibilidades de integración de la cadena de suministro. Esto se hace en función a que exista una mayor o menor colaboración entre los nodos que la componen. Colaboración que se pone en práctica a la hora de realizar conjuntamente la totalidad de actividades que permiten planificar y controlar las operaciones en la cadena.*

*En segundo lugar, el modelo se utiliza para evaluar las repercusiones que tienen los distintos niveles de colaboración entre los miembros de la cadena, en cuanto a la gestión del capital circulante de cada uno de ellos se refiere, y además para distintos escenarios de mercado (demanda).*

*En este sentido, es común encontrar en la realidad distintos costes de financiación por cada nodo (en función a la tipología del inventario que éstos poseen), además de distinta titularidad de inventarios en la cadena en base al nivel de integración de la misma. El artículo propone varias posibilidades de colaboración a nivel financiero entre los nodos. Estas posibilidades pueden ser mutuamente beneficiosas en términos de coste de financiación del capital circulante (cost of cash), y ciclo de maduración (cash-to cash cycle), para cada uno de los elementos de la cadena.*

**Palabras Clave:** Cadenas de Suministro. Simulación, Dinámica de Sistemas.

## 1. Introducción.

El concepto "administración de la cadena de suministro" (acuñado en inglés como Supply Chain Management, SCM), se usa en esta publicación haciendo alusión a los medios por los cuales, las empresas abordan la creación, distribución y venta de sus productos (Poirier, 1999). En este trabajo se discute en primer lugar el concepto de integración de una CS y se revisan las contribuciones principales encontradas en este

tema. En la sección 3 se introduce un modelo básico para la representación de la CS; y en la sección 4, se especifica la manera como se formalizan los diferentes niveles de integración en el modelo. La sección 5 está dedicada al modelado del capital circulante y otras variables financieras de la CS, haciendo énfasis en las necesidades de fondos. En la sección 6 se discuten las salidas del modelo con la intención para validar el comportamiento de las variables del mismo y aplicarlo a un caso supuesto. Finalmente en la sección 7 se presentan las conclusiones sobre los resultados del modelo.

## 2. Revisión bibliográfica sobre integración en la cadena de suministro

A pesar de la relevancia del tema de la integración dentro del CS, este ha sido abordado ampliamente por relativamente pocos investigadores. Entre las contribuciones principales están las realizadas por Stevens (1989), Scott y Westbrook (1991), Towill et al. (1992), Cooper y Ellram (1993), Hewitt (1994) y Bowersox (1997).

Stevens (1989) presentó un modelo de integración con cuatro fases: integración básica, integración funcional interna, integración del suministro y la demanda de las propias compañías a lo largo de la cadena, y la integración total de la cadena de suministro. Hewitt (1994) extendió el modelo de Stevens a una quinta fase que se podría dedicar a una mejor administración y re-diseño de los procesos de negocio globales, buscando mejorar la eficiencia y la eficacia globales de tales procesos. Scott y Westbrook (1991) sugirieron un modelo de tres fases para obtener una cadena de suministro integrada: 1) la "fase de estudio", donde se analizan los lead times y los niveles de inventario para ver mejoras potenciales, 2) una "fase de posicionamiento", para identificar nuevas oportunidades que surgen como consecuencia de las actividades de colaboración entre los miembros de la cadena, y 3) una "fase de acción" para llevar a cabo los planes anteriores. Towill et al. (1992) presentaron un enfoque de integración, similar al de Stevens, y se basaron en principios de dirección de operaciones para reducir la amplificación de la señal de la demanda a lo largo de la cadena. Bowersox (1997) plantea la idea de dos tipos de integración: interna y externa, y sugiere que la creación de beneficios de tiempo y ubicación en la cadena, exige compartir la información permitiendo acuerdos comerciales convenientes con ese propósito, y también exige la existencia de un ambiente apropiado para las transacciones financieras.

## 3.- Modelado de la cadena de suministro

La notación usada para los flujos de información y de materiales es la siguiente:

➤ Variables de estado y flujo de materiales:

$P_t^i$  : trabajo en proceso del nodo  $i$  al nodo siguiente  $i+1$ , (incluye el inventario de trabajo en proceso en el nodo, más el inventario de partes en transporte al almacén de materiales/productos terminados) en el periodo  $t$ ,

$Y_t^i$  : Inventario de materiales/productos terminados en el nodo  $i$ , inventario a mano en el período  $t$ ,

$S_t^i$  : cantidad de unidades enviadas al siguiente nodo  $i+1$ ,

$O_t^i$  : unidades salientes del inventario de trabajo en proceso del nodo  $i$  en  $t$ ,  
tasa de procesamiento de unidades,

$I_t^i$  : unidades entrantes al inventario de trabajo en proceso del nodo  $i$  en  $t$ ,

➤ Variables de estado y flujo de información, ordenes y entregas

$\hat{\mu}_t^i$  : previsión de la demanda del nodo  $i$  en el período  $t$ ,

$OP_t^i$  : ordenes colocadas por el nodo  $i$  en el período  $t$ ,

$D_t^{i+1}$  : ordenes recibidas en el nodo  $i$  en el período  $t$ , colocadas por el nodo  
 $i+1$  en  $t - ID^{i+1}$

$B_{t-1}^i$  : ordenes pendientes de satisfacer por parte del nodo  $i$  en el período  $t-1$ ,

$DS_t^i$  : entregas deseadas del nodo  $i$  al nodo  $i+1$  en el período  $t$ ,

$TY_t^i$  : materiales/productos totales disponibles en el nodo  $i$ , en el período  $t$ ,

$DO_t^i$  : cantidad de ordenes finalmente enviadas al nodo siguiente  $i+1$   
(equivalente a las unidades enviadas al siguiente nodo  $S_t^i$ ) en  $t$ ,

➤ Parámetros del modelo

$L^i$  : tiempo de proceso (lead time), para que una unidad de material del  
trabajo en proceso llegue al inventario de materiales/productos  
terminados, en el nodo  $i$ ,

$TD^i$  : tiempo de entrega del nodo  $i$  (igual a la unidad, los productos se entregan  
en el mismo período en que se reciben los pedidos),

$ID^i$  : tiempo para que para que la información sobre las ordenes colocadas por  
la etapa  $i$  sea recibida y se procese en la etapa  $i+1$ ,

$SS^i$  : tiempo deseado de permanencia de una unidad de material, como  
inventario a mano en el nodo  $i$  ( política de cada nodo),

$\alpha^i$  : factor de suavización de la previsión de la demanda en el nodo  $i$ ,

$\beta_S$  : coeficiente fraccional de ajuste del inventario a mano,

$\beta_{SL}$  : coeficiente fraccional de ajuste del inventario de trabajo en proceso.

En la tabla 1 se presentan las ecuaciones del modelo.

**Tabla 1. Ecuaciones del modelo de Cadena de Suministro**

Ecuación	No.
<b>Cadena de suministro Básica (equivalente a la NI)</b>	
La demanda final de la cadena de suministro en t ( $OP_{t-ID}^{cos t}$ ) es determinista. Las ordenes colocadas por el nodo i+1 en t- $ID^{i+1}$ , son recibidas y satisfechas en t ( $TD^i=1$ ):	
$D_t^{i+1} = OP_{t-ID}^{i+1}$	[1]
Las ordenes a entregar deseadas, no incluyen ordenes pendientes (estructura base):	
$DS_t^i = D_t^{i+1}$	[2]
El suministro de ordenes $S_t^i$ , al nodo siguiente, puede afectarse por limitaciones del inventario. Generándose la variable unidades totales disponibles $TY_t^i$ :	
$S_t^i = \begin{cases} DS_t^i, & \text{si } TY_t^i \geq DS_t^i \\ TY_t^i, & \text{si } TY_t^i < DS_t^i \end{cases}$	[3]
Las unidades totales disponibles del períodos t, incluyen las recepciones de materiales:	
$TY_t^i = Y_t^i + O_t^{i-1}$	[4]
Ordenes pendientes $B_t^i$ (suponiendo que las condiciones iniciales se conocen):	
$B_t^i = B_{t-1}^i + D_t^{i+1} - DO_t^i$	[5]
Saldo físico del inventario a mano $Y_t^i$ (suponiendo condiciones iniciales conocidas):	
$Y_t^i = Y_{t-1}^i + O_t^i - S_t^i$	[6]
Registro de la información relativa a las ordenes finalmente enviadas:	
$DO_t^i = S_t^i$	[7]
Tasa de “terminación” del trabajo en proceso:	
$O_t^i = I_{t-L}^i$	[8]
Entrada al inventario de trabajo en proceso al nodo i en t:	
$I_t^i = S_t^{i-1}$	[9]
Trabajo en proceso (asumiendo que se conocen sus condiciones iniciales):	
$P_t^i = P_{t-1}^i + I_t^i - O_t^i$	[10]
Previsión de la demanda para el nodo i, método de suavización exponencial:	
$\hat{\mu}_t^i = \alpha^i D_{t-1}^{i+1} + (1 - \alpha^i) \hat{\mu}_{t-1}^i$	[11]
Ordenes (asumiendo no integración en la cadena de suministro):	
$OP_t^i = Max (\hat{\mu}_t^i + \hat{\mu}_t^i (\beta_S ss_t^i + \beta_{SL} L^i) - (\beta_S Y_t^i + \beta_{SL} P_t^i), 0)$	[12]
Ordenes: en la forma de la heurística de anclaje y ajuste <sup>1</sup> (Tversky and Kahneman, 1974) con los ajustes fraccionales de los inventarios y del trabajo en proceso. La previsión de la demanda se identifica como el término inercial, y los otros dos términos son los de ajuste. Incluye la no negatividad de los pedidos (Sterman, 1989):	
$OP_t^i = Max (\hat{\mu}_t^i + \beta_S (\hat{\mu}_t^i ss_t^i - Y_t^i) + \beta_{SL} (\hat{\mu}_t^i L^i - P_t^i), 0)$	[13]

<sup>1</sup> Traducción realizada del nombre original en inglés: anchoring and adjustment heuristic.

Ecuación	No.
<b><u>Modificaciones para la Cadena de suministro PI</u></b>	
Ordenes:	
$OP_t^i = \text{Max} (\hat{\mu}_t^i + \hat{\mu}_t^i (ss_t^i + L^i) - (P_t^i + Y_t^i) - B_{t-1}^{i-1} + ib_t^i, 0)$	[14]
Información sobre inventarios, en el banco de información en el tiempo t:	
$ib_t^i = \hat{\mu}_t^i (ss_t^{i+1} + L^{i+1}) - (P_t^{i+1} + Y_t^{i+1}) + ib_t^{i+1}$	[15]
Entregas deseadas:	
$DS_t^i = B_{t-1}^i + D_t^{i+1}$	[16]
<b><u>Modificaciones para la Cadena de suministro TI</u></b>	
Previsión de la demanda:	
$\hat{\mu}_t^i = \hat{\mu}_t^n, \forall i = 1, \dots, n, \text{ siendo}$	[17]
Previsión de la demanda nodo n:	
$\hat{\mu}_t^n = \alpha^n D_{t-1}^{cust} + (1 - \alpha^n) \hat{\mu}_{t-1}^n$	[18]

#### 4.- Modelado de los niveles de integración de la cadena de suministro.

##### 4.1.- Cadena de Suministro no Integrada.

Cuando la estructura de la cadena de suministro es no integrada, las entregas de productos se definen de acuerdo a la ecuación [3] dada para la estructura base; la tasa de ordenes a colocar al nodo anterior, depende de la previsión de la demanda local y de los inventarios locales, de acuerdo con las ecuaciones dadas en [11] y en [12]. Cada nodo realiza su propia previsión de la demanda y ordena en concordancia con ello.

##### 4.2.- Cadena de Suministro Parcialmente Integrada.

En la estructura PI. los nodos conocen los niveles de inventarios de sus clientes directos e indirectos. Aquí también aplica la ecuación [11] para estimar la previsión de la demanda, pero las ordenes se calculan con la ecuación [14] que reemplaza a la [12].

##### 4.3.- Cadena de Suministro Totalmente Integrada.

Al compartir también la información global sobre la previsión de la demanda, la previsión de todos los nodos se hace equivalente a la previsión del último nodo, el detallista. En consecuencia, la ecuación [11] se reemplaza por la ecuación [17]. Las órdenes se calculan de la forma expresada en la ecuación [12].

#### 5.- Modelado de los flujos financieros.

En este artículo se presenta sólo la relación entre las principales variables financieras para cada nodo, usando la siguiente notación:

$CR_t^i$  : necesidades de fondos (capital de trabajo) del nodo  $i$  en el tiempo  $t$ ,  
 $ICR_t^i$  : necesidades de fondos acumuladas del nodo  $i$  al tiempo  $t$ , incluye las necesidades de efectivo para financiar los inventarios finales y de trabajo en proceso,

- $R_t^i$  : cuentas por cobrar del nodo  $i$  en el tiempo  $t$ ,  
 $Py_t^i$  : cuentas por pagar del nodo  $i$  en el tiempo  $t$ ,  
 $Pm_t^i$  : precio de una unidad de producto enviada desde el nodo  $i$  en  $t$ ,  
 $Pwip_t^i$  : valor medio de una unidad de trabajo en proceso en el nodo  $i$  en  $t$ ,  
 $mr_t^i$  : margen de utilidad por producto en el nodo  $i$  en el tiempo  $t$ ,  
 $dso(i)$  : período de cobro del nodo  $i$ ,  
 $CumP_t^i$  : beneficios acumulados del nodo  $i$ , en  $t$ .

Las principales relaciones entre las variables es la siguiente:

$$CR_t^i = ICR_t^i + R_t^i - Py_t^i - CumP_t^i, \quad [19]$$

$$Py_t^i = Py_{t-1}^i + S_t^{i-1} Pm_t^{i-1} - S_{t-dso(i-1)}^{i-1} Pm_{t-dso(i-1)}^{i-1} \quad [20]$$

$$R_t^i = R_{t-1}^i + S_t^i Pm_t^i - S_{t-dso(i)}^i Pm_{t-dso(i)}^i \quad [21]$$

$$ICR_t^i = P_t^i Pwip_t^i + Y_t^i (Pm_t^i - mr_t^i) \quad [22]$$

$$CumP_t^i = \sum_{k=1}^{k=t} S_k^i mr_k^i \quad [23]$$

## 6.- Aplicación a un caso supuesto y análisis de los resultados.

Para la validación de los patrones de comportamiento de las principales variables del modelo, así como para la aplicación, se construyó el siguiente caso: (a) cuatro nodos en línea (Figura 1), a partir de los cuales, la cadena entrega productos al cliente final, (b) se asigna a los parámetros operativos (lead times, tiempos de retrasos, etc.), los valores asignados por Sterman (1984) en la realización del juego de la cerveza (Tabla 2).

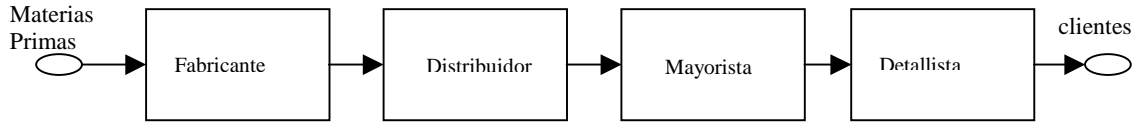


Figura 1. Cadena de suministro seleccionada

Parámetros Operativos	Fabricante	Distribuidor	Mayorista	Detallista	
$L^i$	2	2	2	2	Semana
$SS^i$	3	3	3	3	Semana
$\beta_s$	4	4	4	4	1/semana
$\beta_{SL}$	11	11	11	11	1/semana
$\alpha^i$	0.2	0.2	0.2	0.2	Adimensional
Financieros					
$Pm_t^i$	120	208.30	303.30	382.90	\$/Unidad
$dso(i)$	2	2	2	2	Semana
$mr_t^i$	0.5	0.4	0.3	0.2	%

Tabla 2. Parámetros de la simulación

La demanda de los clientes es supuesta en 4 unidades/semana - constante, hasta cuando se da un pulso en la señal de la demanda en la semana número 5, aumentando su valor a 8 unidades/semana. Los resultados siguientes muestran el impacto del pulso de la demanda sobre las variables de las órdenes, los flujos de materiales, y sobre las medidas de rendimiento financiero a corto plazo del sistema.

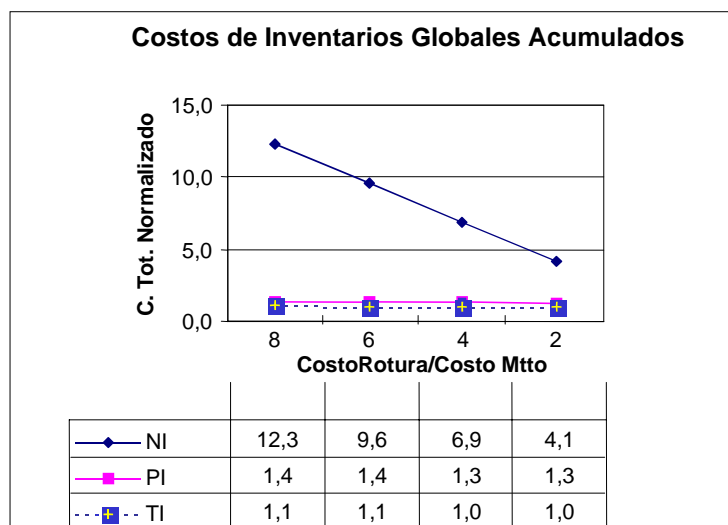
		Mín.	Max.	Desv. Estd.	Media
<b>No Integrada</b>	Fabricante	0	34	11	11
	Distribuidor	0	27	9	10
	Mayorista	1.5	20	6	10
	Detallista	4	14	3	9
<b>Parcialmente Integrada</b>	Fabricante	0	34	10	9
	Distribuidor	2	21	5	9
	Mayorista	4	15	3	8
	Detallista	4	11	2	8
<b>Totalmente Integrada</b>	Fabricante	4	20	4	9
	Distribuidor	4	15	3	9
	Mayorista	4	13	2	8
	Detallista	4	10	2	8

**Tabla 3. Ordenes colocadas por nodo.**

Medida	Nivel de Integración		
	NI	IP	IT
Producción acumulada (Unidades)	372	393	393
Nivel de Servicio (%)	59,61	89,76	82,69
Nec. Medias de fondos normalizadas (\$M)	1.06	1.09	1.0

**Tabla 4. Resultados de las medidas operativas globales**

En la figura 2, se muestra que la CS no integrada es mucho más vulnerable que la parcial y la totalmente integradas, en términos de la razón costo unitario de órdenes pendientes de entrega vs. incrementos en el costo unitario de mantener inventarios.



**Figura 2. Resultados de los costos de inventarios acumulados globales normalizados por nodo (dmnl)**

## 7.- Conclusiones.

Los resultados obtenidos muestran claramente las mejoras potenciales de la integración mediante el uso de herramientas ofrecidas por las tecnologías de la comunicación para la colaboración en la cadena de suministro. Se alcanzan niveles de eficacia (entregas) y eficiencia (nivel de servicio) de la cadena de suministro notables; a su vez, se contrarresta significativamente el efecto “bullwhip” a lo largo de la cadena. Operativamente la integración: (a) habilita las políticas de pedidos para ajustar las necesidades nuevas de los clientes anticipadamente, con mayor certeza, y con una gestión más eficiente de los inventarios (menores costos de inventarios para lograr un nivel de servicio meta) a lo largo de la cadena, y (b) contribuye a incrementar las ventas y a un mayor porcentaje de entregas a tiempo. En términos de la gestión financiera a corto plazo (objeto primario de este trabajo), la cadena de suministro integrada, presenta un equilibrio financiero en términos de que, es capaz permanentemente de atender sus compromisos de pago, lo cual se comprueba por (a) una mayor estabilidad en el ritmo de generación (inflow) y de consumo de liquidez (outflow), (b) mejora el ciclo de maduración global de la cadena, incidiendo en una mayor rotación del efectivo.

## 8.- Referencias

- BOWERSOX, D.J. 1997. Integrated Supply Chain Management: A Strategic Imperative, presented at the Council of Logistics Management 1997 Annual Conference, 5-8 Oct. Chicago, IL.
- CHEN, F. 1999. Decentralized Supply Chains Subject to Information Delays. *Management Science*, Vol. 45, No. 8, August 1999, pp. 1076-1090.
- COOPER, M. C.; LAMBERT, D. M.; PAGH, J. D. 1997. Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics. *The International Journal of Logistics Management* Vol 8, No 1. pp. 1-14.
- HEWITT F. 1994. Supply Chain Redesign. *The International Journal of Logistics management*, Vol. 5, No. 2, pp. 1-9.
- POIRIER C.C. "Advanced Supply Chain Management". Berret-Koehler Publishers, Inc. San Francisco. 1999.
- STERMAN, J. 1984. Instructions for Running the Beer distribution Game (D-3679). Sloan School of Management, MIT.
- STERMAN, J. D. 1989. Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision Making Experiment. *Management Science*, Vol. 35, No. 3, March 1989.
- STEVENS, G.C. 1989. Integrating the Supply Chain. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management* 19:3-8.
- TOWILL, D. R., Naim, N.M., and Wikner, J. 1992. Industrial Dynamics Simulation Models in the Design of Supply Chains. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 22:3-13.
- TVERSKY, A., KAHNEMAN D. 1974. "Judgment Under Uncertainty. Heuristics and Biases". *Science*, 185, September. 1124-1131.