



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA

CUANTIFICACION DEL EFECTO LATIGO
EN UN MODELO DE CADENA DE
SUMINISTRO POR MEDIO DEL EXPONENTE
DE LYAPUNOV

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

INGENIERIA DE SISTEMAS – INVESTIGACION DE OPERACIONES

P R E S E N T A :

MARTHA AMOR AGUILA PEREZ

TUTOR:

DRA. MAYRA ELIZONDO CORTÉS

2008



JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. RICARDO ACEVES GARCIA

Secretario: DR. JUAN MANUEL ESTRADA MEDINA

Vocal: DRA. MAYRA ELIZONDO CORTÉS

1^{er} Suplente: DRA. COZUMEL ALLANEC MONROY LEON

2^{do} Suplente: M. I. FRANCISCA IRENE SOLER ANGUIANO

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DRA. MAYRA ELIZONDO CORTÉS

FIRMA

VANYA LISSETH

ESTE ESFUERZO ES DEDICADO ESPECIALMENTE PARA TI. Y DOY GRACIAS A DIOS POR DARMER UNA HIJA QUE ES MI ORGULLO Y MI INSPIRACION

OSCAR

GRACIAS POR TU AMOR Y APOYO INCONDICIONAL

A MIS PADRES Y SUEGROS

GRACIAS POR SU AYUDA Y CONFIANZA EN MÍ

MAYRA

LAS PALABRAS SOBRAN PARA AGRADECERLE SU APOYO PARA CONLUIR UN PASO MAS EN MI FORMACION

GRACIAS A LA INSTITUCION QUE ME BRINDO LAS FACILIDADES PARA CONLUIR MIS ESTUDIOS

Y... PRINCIPALMENTE A DIOS POR SER PARTE INDISPENSABLE EN MI VIDA

Martha Amor

Índice

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 3 |
| CAPÍTULO I. EL SIGNIFICADO DE LA CADENA DE SUMINISTRO | |
| 1.1 Definición de cadena de suministro | 8 |
| 1.2 Definición de la gestión de la cadena de suministro | 10 |
| 1.3 Sincronización de la demanda | 16 |
| CAPÍTULO II. EL EFECTO LÁTIGO | |
| 2.1. Definición del efecto látigo | 19 |
| 2.2 Causas que producen el efecto látigo | 25 |
| 2.2.1 Uso de los pronósticos para calcular la demanda (Demand signal processing) | 27 |
| 2.2.2 Consolidación de las órdenes (Batch ordering) | 28 |
| 2.2.3 Fluctuación o variabilidad en los precios y las promociones (Price variations) | 29 |
| 2.2.4 Inflar las órdenes como reacción al riesgo por desabasto (Shortage gaming) | 29 |
| 2.3 Estado del arte | 31 |
| 2.4 Definición de la cadena de suministro como un sistema Dinámico | 33 |
| CAPÍTULO III. EL EXPONENTE LYAPUNOV | |
| 3.1 El concepto del caos | 36 |
| 3.1.1 Orígenes del caos | 37 |
| 3.2 Sensibilidad de los sistemas no lineales | 39 |
| 3.3 El exponente de Lyapunov | 43 |

| | | |
|---|---|----|
| 3.3.1 | Definición del exponte de Lyapunov | 43 |
| CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL EXPONENTE DE LYAPUNOV | | |
| 4.1 | Descripción del modelo de cadena de suministro utilizado | 49 |
| 4.2 | Ejemplo de aplicación | 52 |
| 4.3 | Aplicación a un caso práctico | 54 |
| 4.3.1 | Descripción de las operaciones | 54 |
| 4.3.2 | Aplicación del exponente de Lyapunov para cuantificar el efecto látigo | 60 |
| CONCLUSIONES | | 63 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 65 |

Introducción

En 1997 Bernard Lalonde, en su artículo "*Supply Chain Management: Myth or Reality?*", presenta la gestión de la cadena de suministro como un nuevo modelo de administración. En la década de los 80's este término había aparecido como un enfoque alternativo para la administración de la logística o administración de flujos de materiales. Dicho enfoque es distinto al enfoque tradicional por áreas funcionales [Gigola, 2004].

La diferencia entre la gestión de la cadena y el enfoque por áreas radica en que el primero es una secuencia de procesos donde atraviesan el flujo de producto, información y dinero que trascienden los límites de la empresa, debido principalmente a factores como la globalización y los desarrollos tecnológicos, que obligan a las empresas a buscar la colaboración y coordinación de otras empresas con las que tiene relación de forma directa e indirecta, teniendo como principal objetivo el planear, instrumentar y controlar eficiente y efectivamente estos flujos, en y entre los componentes que integran la cadena de suministro, en cambio el segundo se enfoca en estrategias independientes, medidas de desempeño individuales e incentivos por competencia logrando con esto áreas fragmentadas [Ibid].

El enfoque de la **gestión de la cadena de suministro** (*Supply Chain Management*, **SCM** de aquí en adelante así lo definiremos) se basa en las relaciones inter organizacionales, con objetivos comunes y medidas de desempeño globales. En general, consiste en planear, instrumentar y controlar eficiente y eficazmente, los factores que intervienen dentro de la estructura total de la cadena de suministro, debido a la globalización de los mercados y el desarrollo tecnológico, el uso y aplicación de esta filosofía se ha vuelto muy popular.

En 1958, Forrester mostró a través de la simulación de una cadena de suministro, el efecto que tienen las decisiones unilaterales en el desempeño global de la empresa, estableciendo mediante la dinámica de sistemas, que el éxito de una empresa radica en la interacción entre los flujos de información, materiales, dinero, mano de obra y equipo que existen dentro y entre la empresa; el mercado, la industria y la economía global [Ibid].

Forrester concluye que los sistemas son complejos y dinámicos, por que intervienen diversas fuerzas e interés entre las empresas que componen el canal de distribución, que presentan un dinamismo generador de errores, inexactitudes y volatilidad en la información que no puede ser analizada unilateralmente sino que se requiere de un enfoque sistémico.

De aquí que, podemos definir a la **cadena de suministro** (*Supply Chain*, **SC** de aquí en adelante así lo definiremos) como una red dinámica compleja, que está integrada por diversas organizaciones, todas ellas con objetivos distintos, como la búsqueda incesante por tener bajos costos de producción e inventario, dando un alto nivel de servicio y que generalmente estos objetivos están en conflicto. Esta lucha de intereses es la causante de las ineficiencias en la gestión de la cadena, como las variaciones en las órdenes colocadas, retrasos en las entregas, excesos en los niveles de inventarios, altos costo de producción, etc.; y todo esto impacta en el nivel de servicio proporcionado al consumidor, ya que es importante la satisfacción del consumidor, pues es el motor que hace funcionar la SC.

Estas deficiencias son sólo los efectos provocados por seguir una administración miope, esto es, mientras una empresa no mejore su comprensión sobre sí misma y su entorno, siempre verá afectado su desempeño.

Un aspecto crítico para lograr la integración, coordinación y sincronización de la SC, es el flujo de información, ya que en la mayor parte de los casos no se comparten los datos reales de la demanda con ningún miembro de la cadena. Esta información queda en manos principalmente del minorista, quien está cercano al consumidor y puede divisar si existen diferencias en su preferencia hacia el producto, o puede tomar la decisión de lanzar alguna oferta o promoción sin considerar el impacto que esta traerá en los niveles anteriores a él. Estas acciones individuales provocan variabilidad en las órdenes, afectando principalmente los niveles de inventario, especialmente en el primer proveedor, donde en un tiempo dado puede haber escasez y en otro un exceso de material, provocando ineficiencias y desabasto en el punto de venta.

Actualmente, se han desarrollado muchas estrategias y métodos que apuntan a un crecimiento simultáneo en el servicio al cliente y la rentabilidad de la SC, pero no es el objetivo de esta tesis el publicarlos, sino el mostrar que estas acciones o estrategias deben ser concensadas por todos los miembros de la cadena, ya que cualquier toma de decisión individual afecta a todo el sistema, por eso es aconsejable hacer uso de la política de centralización, la cual contempla la formación de un comité centralizador para reducir dicha inestabilidad.

A este tipo de comportamiento se le conoce con el nombre de **efecto látigo** (*Bullwhip Effect*, **BE** de aquí en adelante así lo definiremos), el cual podemos definir como la *variabilidad de la demanda*, se le da este nombre por su peculiar característica gráfica. Este fenómeno ha sido estudiado por varios investigadores, quienes han tratado de dar una solución, o proveer métodos para reducirlo.

En resumen, la problemática que se intenta resolver es la siguiente:

Problemática

Los actuales enfoques de logística están en busca de una mayor integración de cada una de las empresas que conforman la correspondiente SC, con el propósito de agilizar el flujo de materiales e información para cubrir de manera eficiente la demanda.

La información que genera el consumidor es desconocida para la gran mayoría de los elementos de la cadena, pues está sólo es conocida por medio de los pronósticos, estos implícitamente traen consigo un error que conforme va pasando de nivel en la cadena (consumidor → minorista → mayorista → productor → proveedor) se van sumando, al final se obtiene una distorsión de la demanda original, de tal manera que esta variación conocida como BE tiene un impacto negativo para toda la SC, manifestándose en:

- ⇒ bajos niveles de servicio,
- ⇒ deficiencias en la producción,
- ⇒ entregas retrasadas,
- ⇒ altos costos de transporte,
- ⇒ altos costos de inventario,
- ⇒ Incrementos / desabastos en inventario, etc.

Con base en esto se propone el uso del *exponente de Lyapunov* como medida de análisis para observar de forma general, la sensibilidad de la cadena de suministro a las fluctuaciones de la demanda, además de contar con un parámetro que indique si las acciones de mejora implantadas ayudan a reducir los impactos del efecto látigo.

Metodología

En el presente trabajo utilizaremos el exponente de Lyapunov como una herramienta para aplicarla en el análisis del BE y visualizar el efecto que tienen las condiciones iniciales en una SC y de esta forma determinar si una SC tiene un comportamiento caótico, es decir, si existe sensibilidad a la demanda, o se encuentra en un estado periódico estable, esto es, que a pesar de haber perturbaciones en la demanda el sistema vuelve a una permanencia estable. Para ello, se hará uso de un ejemplo numérico y un caso real, en éste último se solicitará la ayuda de un experto ubicado en el Departamento de Planeación de una empresa dedicada a la fabricación y distribución de refrescos (la cual se mantendrá bajo confidencialidad).

A continuación indicamos el objetivo general y específicos que persigue esta tesis:

Objetivo general

El motivo principal que impulsó a desarrollar esta tesis, no es sólo demostrar la existencia del BE, sino también proporcionar una medida para cuantificarlo y determinar a partir del resultado obtenido, si la SC que se está estudiando es sensible a los cambios en la demanda o presenta cierta rigidez (sin confundir rigidez con vulnerabilidad), con el propósito de tener una guía a considerar en el momento de desarrollar nuevos proyectos o de implantar un nuevo método y verificar si es efectivo o sólo aumenta la inestabilidad de la cadena.

Describiendo nuestro objetivo general que es:

“Analizar las características que definen al efecto látigo y cuantificar su impacto por medio del exponente de Lyapunov, en una cadena de suministro simple para examinar su utilización como método de diagnóstico de sensibilidad para la administración de la cadena de suministro”.

Objetivos específicos

1. Definir, analizar y explicar qué es el efecto látigo y sus posibles causas.
2. Demostrar su existencia por medio de un ejemplo numérico y cuantificarlo por medio del exponente de Lyapunov.
3. Cuantificar el exponente de Lyapunov en un caso real

Estructura del trabajo

Esta tesis está dividida en los siguientes capítulos:

Capítulo I, trataremos sobre los conceptos de cadena de suministro, la filosofía de la gestión de la cadena de suministro, explicaremos los tres factores principales que se requieren para lograr un mejor desempeño en la cadena de suministro, así como también, las políticas más utilizadas para la coordinación de la información.

Capítulo II, definiremos qué es el fenómeno látigo, sus causas y efectos, proporcionando un ejemplo numérico para demostrar su existencia, así como

también, trataremos el estado del arte sobre el tema y justificaremos por qué una cadena de suministro es un sistema dinámico.

Capítulo III, iniciaremos con una explicación general acerca de la teoría del caos, para posteriormente exponer a cerca del exponente de Lyapunov y los motivos de su utilización.

Capítulo IV, en este apartado se desarrolla una aplicación práctica del exponente de Lyapunov, para cuantificar el efecto látigo en una empresa real.

CAPÍTULO I. EL SIGNIFICADO DE LA CADENA DE SUMINISTRO

1.1 Definición de cadena de suministro

Partiendo de la comprensión de que la logística tiene que ver con el movimiento de personas, materiales, dinero, información, etc.; y cada uno de estos elementos se encuentran localizados dentro de cada departamento o área funcional de la empresa, su buen funcionamiento tanto interna como externamente depende del nivel de integración que exista entre cada departamento. Por ejemplo, "la integración entre los departamentos de producción y logística son muy importantes para permitir un flujo continuo de materiales desde la recepción de la materia prima hasta la entrega del producto terminado, o la integración entre los departamentos de ventas y logística, para el correcto entendimiento de los requerimientos del cliente" [Kahn et. al; 1996]; de esta forma, conforme se aumente la integración se mejora el desempeño de la propia organización viéndose reflejado en un excelente servicio al cliente, en una buena administración de los niveles de inventarios, mejores pronósticos y mayores empleados y clientes satisfechos.

La **integración** se puede definir como la *interacción* y *colaboración* de actividades entre departamentos, teniendo como principal propósito el compartir metas comunes, trabajo en equipo y participación conjunta de los recursos, teniendo como aspecto crítico el *flujo de información*, por lo tanto, la logística posee una perspectiva multidimensional para lograr dicha integración.

En años recientes las empresas se han dado cuenta que ellas solas no pueden competir eficientemente y que requieren de una cuidadosa administración de cada uno de los elementos que integran su línea de abasto, estos son: proveedores, materiales, recursos, almacenes, distribuidores mayoristas/minoristas, transporte y clientes. Por eso la logística ha estado en la búsqueda de la expansión *outbound* (hacia fuera), esto es, expandir sus límites fuera de la propia empresa y formar una estructura integral enfocada a la planeación y la correcta ejecución de cada uno de estos elementos, teniendo como principal objetivo el colocar el producto en el punto de venta de una forma más eficiente y rápida, cumpliendo en tiempo, cantidad y calidad, ya que actualmente el mercado global exige productos más sofisticados y "hechos a la medida" del cliente, siendo este hecho un arma de dos filos, pues si se almacena el producto y/o material, esto implica un alto riesgo de obsolescencia y altos costos por mantener un producto que no genera ningún valor.

Por esta razón, las empresas buscan mecanismos para acelerar el flujo de los materiales, de la información y del capital para reducir los inventarios. Esto representa, que una empresa con una ventaja de producción suficientemente

grande sobre otras podrá producir de una forma más rápida y económica y eliminar así a sus competidores del mercado.

Por este motivo, es importante que los conceptos de integración y colaboración se extiendan más allá de las fronteras de la empresa, es decir, que la propia empresa busque uniones con otras empresas para conformar una estructura mayor.

De este modo, podemos definirla SC como una red autónoma o semiautónoma de organizaciones involucradas [Samaranayake, 2005], que puede tener diversas formas y extenderse desde 2 niveles (productor-cliente) hasta muchos niveles, además es importante el no confundir una buena administración de proveedores con una buena administración de la SC, pues se requiere de un mayor esfuerzo conjunto para administrar el resto de los aspectos que corresponden al envío del producto desde su origen hasta el destinatario final. La siguiente figura muestra los diferentes niveles de una la SC.

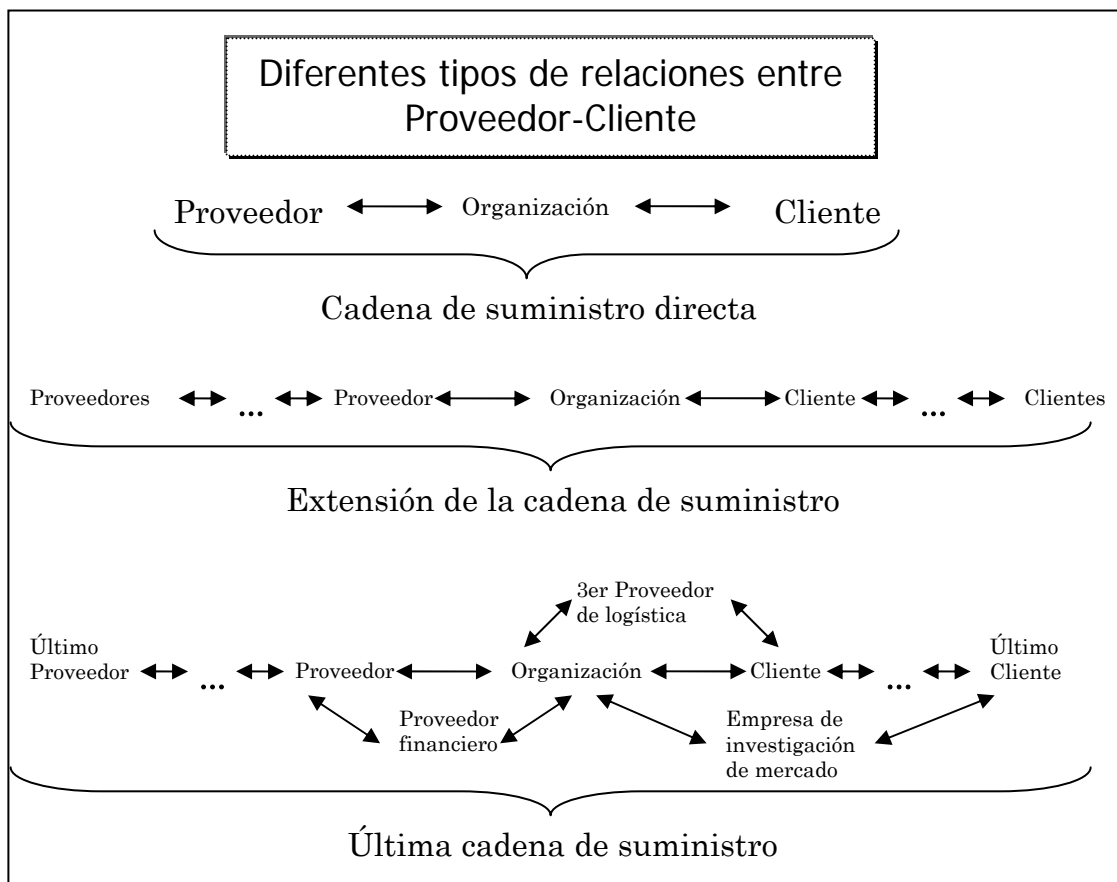


Figura 1. Fuerte [Mentzer et. al; 2001]

El propósito de estructurar una SC es el de producir bienes o servicios que lleguen más fácil y rápidamente hacia los clientes. Este proceso de abasto

involucra además un número de subprocesos tales como: ventas, planeación de la producción, pronósticos de la demanda, control y ejecución, administración de inventarios, abastecimiento de materiales, transportación, calidad y la administración de los envíos, entre otros.

De esta manera podemos concretar que la *cadena de suministro* es la integración del flujo de materiales e información entre las entidades de negocio involucradas. La siguiente figura ilustra dicha relación.

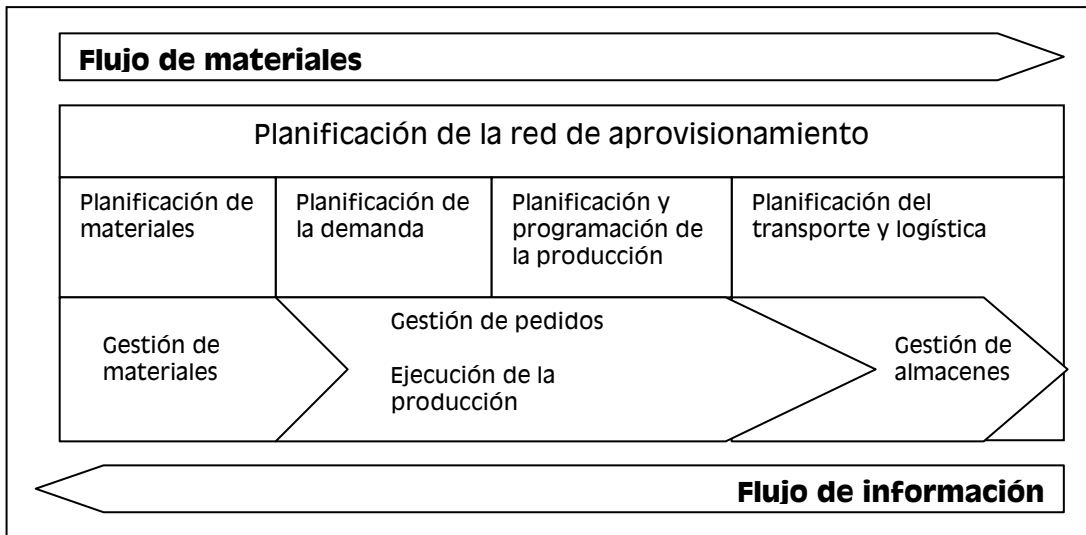


Figura 2. Elaboración propia en base a la fuente [ESADE, 2004]

1.2 Definición de la gestión de la cadena de suministro

La importancia de la SC no solamente consiste en el número de participantes o componentes, [Ibid] sino en la efectiva administración de los requisitos de integración de los flujos de información y materiales a lo largo de la cadena y que además sea capaz de proveer visibilidad, flexibilidad y mantenibilidad para la mejora extensa del ambiente.

Por lo que el SCM es un concepto que se ha ido enriqueciendo desde 1980, cuando las compañías vieron los beneficios de las relaciones colaborativas dentro y fuera de su propia organización, como son la rapidez, agilidad y flexibilidad para responder a las exigencias de los clientes y la minimización de los costos [Lumms et. al; 1999].

El pionero que incursionó en este concepto fue Forrester [Mentzer et. al; 2001] quién en 1958 introdujo una teoría sobre la administración de la distribución, reconociendo la integración natural de las relaciones organizacionales. El

argumenta que una empresa es un sistema dinámico y que los factores tales como la ingeniería, ventas y promociones pueden influenciar el desempeño de sus funciones. Propuso además el reconocer la ventaja que tiene una empresa al mejorar su comprensión sobre sus interrelaciones entre sí misma, su industria, sus mercados y la economía nacional. Su artículo fue presentado hace 50 años y Forrester ya había identificado la clave de la administración, identificando así el principal problema que es la distribución e ilustró la dinámica de los factores asociados con el fenómeno contemporáneo del SCM.

A pesar de que el SCM es un término muy popular en la actualidad, existen dudas sobre su definición. [Mentzer et. al; 2001]. Algunos autores definen el SCM en términos operacionales, involucrando el flujo de materiales y productos, otros lo usan como una filosofía de la administración y algunos otros en términos de la administración de procesos. Por lo tanto, proveeremos dos definiciones que se ajustan al propósito del presente trabajo:

📖 Una definición dada por Ellram y Cooper en 1993 es la siguiente: Es “una filosofía de integración para administrar el flujo total de un canal de distribución desde el proveedor hasta el último cliente” [Lummus et. al; 1999].

📖 De acuerdo con The International Center for Competitive Excellence (1994) define el SCM como: “la integración de procesos de negocio desde el último usuario hasta el proveedor original que provee los productos, servicios e información que agregan valor al consumidor” [Cooper et. al; 1997].

De lo anterior podemos desprender las siguientes características generales del SCM [Mentzer et. al; 2001]:

- 1) Es un sistema de acercamiento para ver a la SC como un todo y para administrar el flujo total del inventario de bienes desde el proveedor hasta el último consumidor.
- 2) Es una estrategia orientada hacia el esfuerzo cooperativo para sincronizar las órdenes, para abastecer la demanda original y buscar estrategias de capacidad dentro de cada empresa.
- 3) Es un enfoque al cliente para crear un único e individual recurso/servicio de valor para él, destacando su satisfacción.

La siguiente figura muestra el alcance que tiene una administración con el SCM:

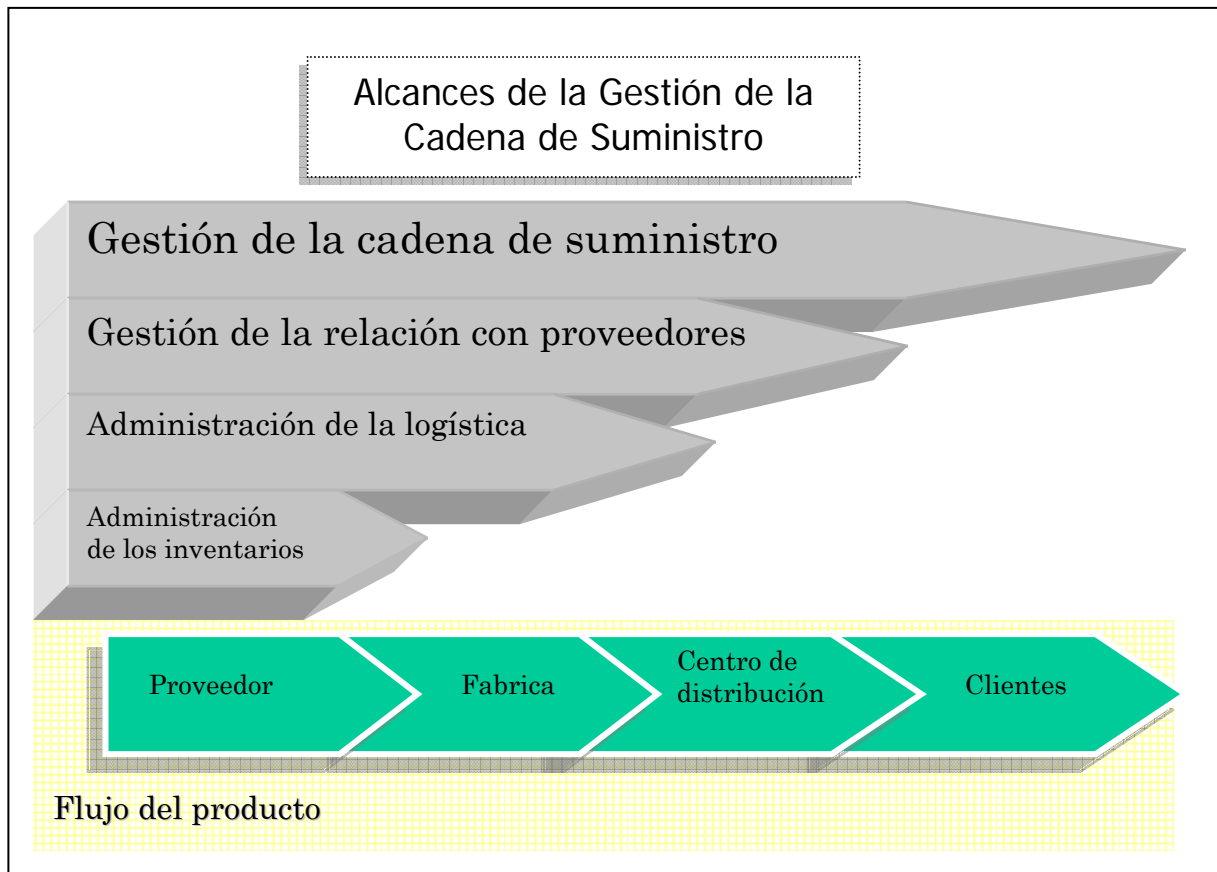


Figura 3. Elaboración propia, con base en [ESADE, 2004]

Muchos confunden el SCM como un proceso de procuración o una función de compras, por lo que se ha hecho muchos esfuerzos para evitar tales equivocaciones, una forma es definir lo que no es el SCM. A continuación se presenta una serie de eventos que no se consideran dentro del SCM [Lummus et. al; 1999]:

- × Administración de inventarios.
- × Administración de la logística.
- × Asociación de proveedores.
- × Estrategia de compras.
- × Administración de la distribución.
- × Conducto de la logística.
- × Administración de la procuración.
- × Sistema de cómputo.

Debido al mal manejo de estos conceptos, el crecimiento del SCM es lento y deficiente dentro de las organizaciones, y en muchas ocasiones no se logra el éxito esperado debido a:

-
-
- 1) La creencia que tienen los directivos de crear alianzas con los proveedores con el fin de que ellos sean los que mantengan altos inventarios.
 - 2) El fracaso para desarrollar indicadores adecuados para monitorear las actividades de las alianzas.
 - 3) La incapacidad para ampliar la visión de la SC más allá de la procuración o la simple distribución del producto para englobar procesos de negocios mayores.
 - 4) La incapacidad para integrar a la compañía en los procesos internos.
 - 5) La falta de confianza en los proveedores.
 - 6) La resistencia organizacional para aceptar el concepto y compartir información.
 - 7) La falta de integración en los sistemas de información y uniones con el comercio electrónico.

En conclusión, el SCM [Li et. al; 2007] es una filosofía aplicable a un enfoque total para administrar el total de los flujos de información, materiales y servicio encaminado a satisfacer la demanda del cliente, trayendo consigo un cambio fundamental en el campo de la administración, pues se enfoca en la integración de sus actividades operacionales, con decisiones y actividades de sus socios externos, que son entidades económicamente independientes.

Sin embargo, no siempre se puede lograr una completa integración de la SC, ya que la mayoría de los miembros usualmente buscan mejorar su desempeño individual viéndose afectada la eficacia del SCM.

Para evitar esto, existen varios mecanismos que se pueden emplear para alinear los objetivos de cada miembro independiente que integran la SC. Se ha visto que el beneficio de la información depende del contexto en el que se desarrolle y puede variar conforme cambie la estructura de cada organización. Uno de estos dispositivos son la coordinación de la información por medio de las **políticas de centralización y descentralización**, en ambos casos, un aspecto fundamental es la adecuada administración del *flujo de información* que existe dentro de la cadena, pero se manejada de forma diferente en cada concepto.

A continuación proporcionamos una breve descripción, comparación y damos a conocer los modelos que es han desarrollado para cada una de estas políticas.

Política de centralización para la coordinación de la información en la cadena de suministro

“Cuando las decisiones tomadas para optimizar el desempeño de la SC con acceso a toda la información, están bajo el control de un solo decisor o de un cuerpo central formado por miembros representantes de cada eslabón de la cadena, que concuerdan una solución y la implementan en el sistema, a esto se le conoce comúnmente como **sistema centralizado**, siendo este concepto un ideal a alcanzar” [Li et. al; 2007].

Política de descentralización para la coordinación de la información en la cadena de suministro

“Cuando los miembros de la SC son entidades económicamente independientes, que actúan de forma individual y oportunamente optimizan su propio beneficio, es cuando se requiere de un plan de acción que pueda ser complementado con un esquema de incentivos, que motive a buscar los beneficios de la coordinación entre cada miembro de la SC, tal que se alineen sus objetivos independientes a una meta en común, a esto se le conoce como **sistema descentralizado**” [Li et. al; 2007].

Ambas políticas pueden ser usadas para lograr la coordinación entre clientes y proveedores, motivando una mejor forma de adopción de estrategias específicas y así maximizar el beneficio esperado en cada miembro, pero este dependerá del tipo de relación que exista entre ellos y de sus restricciones técnicas y económicas. A continuación se muestra un resumen de la comparación entre los beneficios esperados de ambas políticas [Jiménez, 2005]:

| Comparación entre ambas políticas de información | | |
|---|--------------------------|-----------|
| Beneficio esperado | | |
| Política centralizada | Política descentralizada | Concepto |
| π^c | \geq | π^d |
| Los beneficios de la política descentralizada son inferiores a los de la política centralizada. | | |
| π_u^c | \leq | π_u^d |
| Los beneficios esperados por el cliente en la política descentralizada son mayores a los esperados por el cliente en la política centralizada. | | |
| π_s^c | \geq | π_s^d |
| Los beneficios esperados por el proveedor en la política centralizada son mayores a los esperados por el proveedor en la política descentralizada. | | |
| π_s^c | \geq | π_c^d |
| Los beneficios esperados por el proveedor en la política centralizada son mayores a los beneficios esperados por el cliente en la política descentralizada. | | |

Tabla 1. Fuente [Jiménez, 2005]

Donde:

- π es el beneficio esperado
- d** a la política descentralizada
- c** a la política descentralizada
- u** corresponde a cliente
- s** corresponde a proveedor

Por lo tanto, la diferencia entre la política centralizada y la descentralizada, es que la primera determina el máximo beneficio esperado entre clientes-proveedores por medio de la suma directa de sus beneficios individuales, en cambio la política descentralizada es más compleja, porque los beneficios se obtienen de forma secuencial y dependerá en gran medida de quién domine el canal, si es el cliente quien establece las condiciones de negociación será el primero en alcanzar su beneficio y viceversa.

Se han desarrollado varios modelos sobre la coordinación del inventario y la coordinación de la información en la SC bajo un esquema basado en la estructura de decisión y en la naturaleza de la demanda.

La siguiente tabla muestra un resumen de los modelos desarrollados, basados en la estructura de decisión centralizada y descentralizada.

| Modelos de coordinación de la Cadena de Suministro | | |
|--|--|---|
| Estructura de decisión | | |
| Naturaleza de la demanda | | |
| | Determinística | Estocástica |
| Centralizada | <ol style="list-style-type: none"> 1. Sistema de inventario del problema clásico de tamaño de lote para multiescalón (e.g. Wagner y Whitin, 1958; Zangwill, 1969; Schwarz 1973) 2. Política de integración power-of-two y porción entera. (e.g. Roundy, 1985, 1986) 3. El problema clásico de reabastecimiento conjunto (e.g. Goyal, 1973; Silver, 1976; Chakravarty, 1985; Federgruen and Zheng, 1992) | <ol style="list-style-type: none"> 1. Políticas de instalación (e.g. Clark and Scarf, 1962; Deuermeyer and Schwarz, 1981; Svoronos and Zipkin 1988) 2. Políticas de escalón de stock (e.g. Clark and Scarf, 1960; Chen and Zheng, 1994 a, b, 1998) 3. Modelos de información compartida (e.g. Zheng and Zipking, 1990; Cachon and Fisher, 2000; Moinzadeh, 2002) |
| Descentralizada | <ol style="list-style-type: none"> 1. Modelos de cantidad discontinua (e.g. Dolan, 1978; Monahan, 1984; Lal and Staelin, 1984; Parlar and Wang, 1994; Wang, 2002) 2. Modelos de ganancia compartida (e.g. Goyal, 1976; Banerjee, 1986b; Joglekar and Tharthare, 1990) 3. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Modelos de juego de cadena de suministro (Porteus and Whang, 1991; Cachon and Zipkin, 1999; Caldentey and Wein, 2003) |

Tabla 2. Fuente [Li et. al; 2007]

1.3 Sincronización de la demanda

Los modelos o políticas de producción/inventario que se han desarrollado para la optimización del desempeño, tienen la desventaja de que se han enfocado principalmente a la optimización local de dichas actividades y no a todo el sistema. Por ejemplo, si es utilizando como política determinística el modelo tradicional del EOQ (*Economic Order Quantity Model*) o cualquier otra política para el reabastecimiento del inventario [Li et. al; 2007], sólo se enfoca a la cantidad y cuando ordenar, en cambio haciendo uso de una administración total del SCM, que consiste en tomar las decisiones de reabastecimiento para diferentes empresas determinando la cantidad a ordenar en base a la demanda original y coordinar tres actividades principales para maximizar los beneficios del sistema y minimizar a su vez los costos totales del mismo, estas actividades son:

- 1) sincronización de las órdenes para reducir los inventarios en toda la cadena;
- 2) cronometrización y fácil acceso a la información para poder mejorar las decisiones en el sistema.

Esto lo podemos visualizar en la siguiente figura:

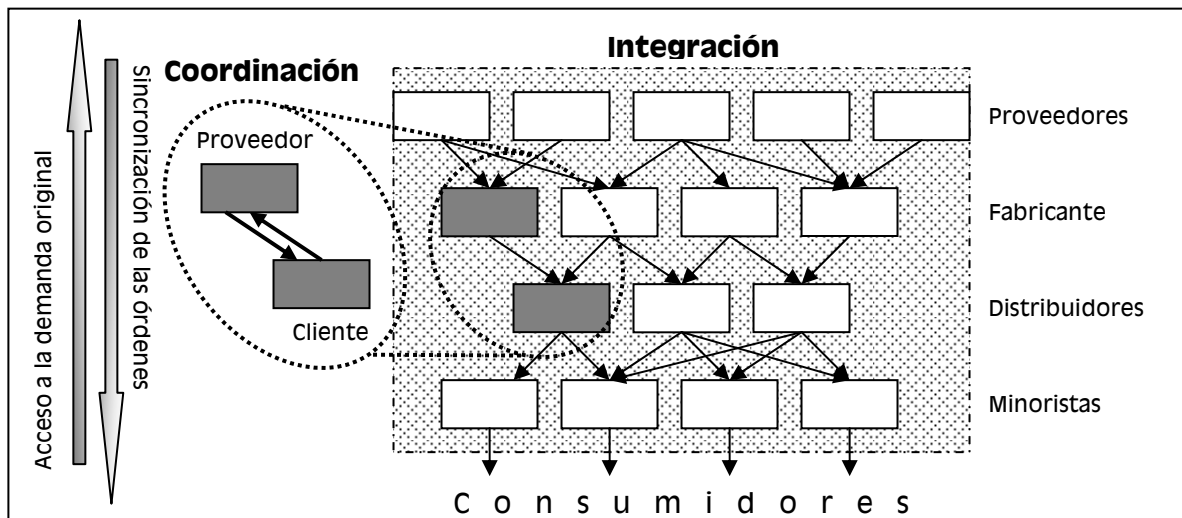


Figura 4. Elaboración propia basada en la fuente [ESADE, 2004]

Entre otros aspectos que se obtienen de la coordinación proveedor-cliente con la filosofía del SCM se encuentran:

- 1) reducción del tiempo de entrega,
- 2) mayor confianza en los envíos,
- 3) reducción de los costos de transporte, producción, por ordenar, etc.
- 4) mejora en la programación de la producción y envíos,

5) mayor rentabilidad de la SC.

Obviamente para lograr lo dicho anteriormente, es necesario desarrollar mecanismos conjuntos que sean utilizados por todos de la misma forma y con la información.

Otro aspecto que es muy importante es la *sincronización de la demanda* dentro de todo el sistema [Gigola, 2001], para lograr un flujo de información y de bienes adecuado sin interrupciones.

Entendemos por **sincronización de la demanda**, cuando los proveedores sólo envían los recursos necesarios al productor para cubrir la demanda actual del consumidor, esto a su vez transforma las materias primas en productos terminados de forma rápida y eficiente para hacerlos llegar al punto de venta, acelerando el flujo de los envíos y así sucesivamente retribuyendo el ingreso monetario. El propósito es lograr un correcto flujo de información y materiales entre cada elemento de la cadena, teniendo todos como meta común la reducción de los inventarios y los costos totales, los cuales tienen un impacto directo sobre la programación de la producción, logrando así reducir la necesidad de almacenar en grandes cantidades, pudiéndose ahorrar en los costos de transporte y gastos de distribución, mejorando la eficiencia en el flujo de activos (ganancias) dando la posibilidad de un mayor capital disponible para invertir en mejoras tecnológicas y en un mejor posicionamiento en el mercado, esto sería el caso idóneo para que una SC funcione adecuadamente.

Pero las principales causas que provocan ineficiencias en el SCM, entre las cuales podemos mencionar son las planificaciones erróneas, programas de producción complejos, inventarios desajustados, entregas a destiempo, variaciones en las plantillas del personal directo, transportes mal planeados, inversiones de capital con baja productividad, mal servicio al cliente, etc. Esto es a consecuencia de las malas decisiones que repercuten en todos los niveles de la cadena y a la variación de la demanda que es provocada por la falta de un correcto canal de comunicación, por lo tanto, cualquier reducción de estas deficiencias supone el ahorro de recursos y mejora los resultados.

Por esta razón, la necesidad de disponer de información sobre la demanda y la logística individual entre los miembros de la SC, ha determinado ser una pieza clave en la mejora de la gestión del SCM, por lo que la **coordinación** entre los miembros es importante, sin embargo, no siempre se permite el traspaso de los datos de un miembro a otro, ya que la entrega de datos no es gratuita pues los clientes exigen contraprestaciones a sus proveedores. En otras palabras, el cliente limita al proveedor a un mero control de existencias o a que contraiga la responsabilidad total en la planificación de las entregas, control de inventarios, etc. Por consiguiente, no todos los clientes están dispuestos a acceder y afrontar

las consecuencias de dichos contratos. Además, una barrera difícil de traspasar es la confianza entre cliente-proveedor a la hora de establecer acuerdos tras arduas negociaciones, y sólo los años de relación proporcionan la información que se cree necesaria y por supuesto este tipo de relaciones paralizan el progreso del SCM.

Estas deficiencias originan lo que se conoce como **efecto látigo**, el cual estudiaremos en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO II. EL EFECTO LÁTIGO

2.1 Definición del efecto látigo

Estamos en posibilidad de decir que para que el SCM se desarrolle y funcione adecuadamente se requiere del perfeccionamiento de 3 factores principales:

I
C
S

ntegración,
oordinación y
incronización.

de todo el SISTEMA

Cuando surge una desintegración de alguno de estos factores, esta desunión es causante de ineficiencias en la gestión de la cadena, como las descritas en el capítulo anterior. Pero la causa no se halla en un aumento en la incertidumbre de la demanda del propio mercado, sino que proviene del comportamiento interno entre cada participante de la cadena.

Esto se puede ver cuando algún miembro de la cadena busca de forma independiente optimizar su proceso con el objetivo de minimizar sus costos y opta por reducir excesivamente su inventario, o por el contrario adquiere o produce más de lo necesario para mejorar su servicio de entregas, debido a diversas razones como pueden ser: los descuentos ofrecidos por el proveedor, los rumores de escasez, entre otras, esta toma de decisión afecta directamente en el desempeño de la SC.

Esta medida unilateral provoca una variación en las órdenes recibidas por los antecesores proveedores, quienes son ciegos a la situación y programan su producción en base a la información recibida y al cabo de un tiempo impacta bruscamente, no sólo en sus niveles de inventario sino en los de toda la cadena, donde en un período puede verse con excesiva escasez y en otro con altos volúmenes de producto almacenado, para finalmente terminar por dar un golpe severo al nivel de servicio ofrecido al cliente.

Para entender mejor esta situación, considere el siguiente ejemplo ilustrativo de una pequeña tienda de abarrotes que sigue un modelo de inventario de único producto, con un punto de almacenamiento, baja tasa de demanda de tipo determinística que varía en el tiempo.

La siguiente tabla muestra las cantidades de demanda y los niveles de inventario para cada eslabón de la cadena la cual consta de: el consumidor, el minorista, el mayorista, el distribuidor y por último la planta.

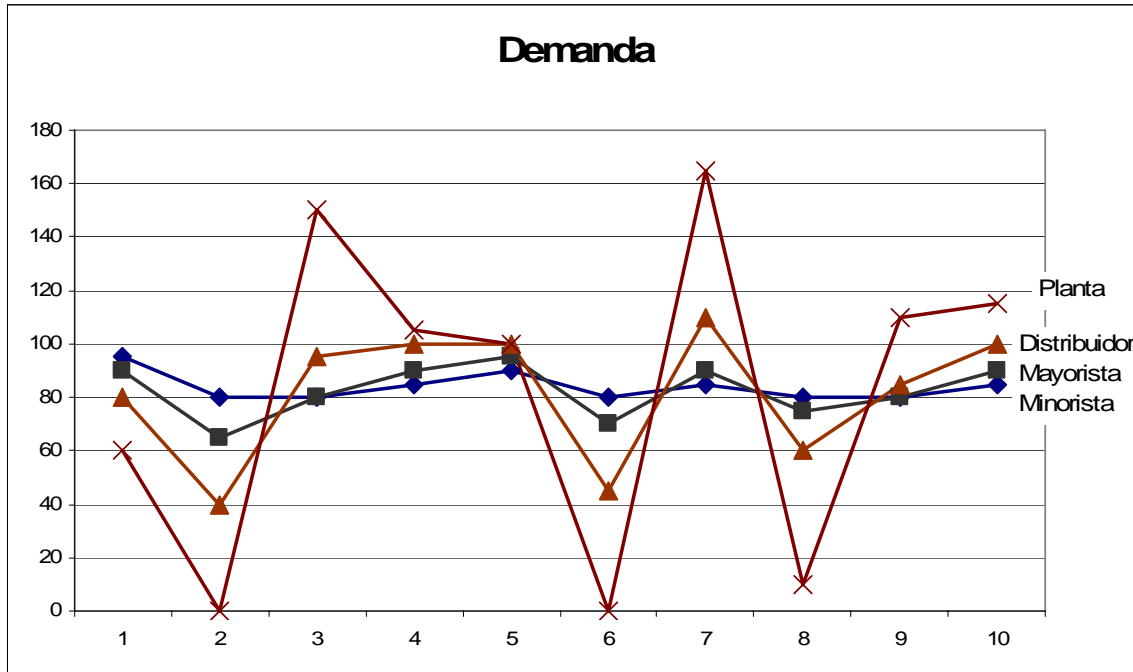
| | | Períodos | | | | | | | | | |
|---------------------------------|--------------|----------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Nivel | Concepto | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Consumidor | Demanda | 95 | 80 | 80 | 85 | 90 | 80 | 85 | 80 | 80 | 85 |
| Tienda de Abarrotes (Minorista) | Inv. Inicial | 100 | 95 | 80 | 80 | 85 | 90 | 80 | 85 | 80 | 80 |
| | Surte | 95 | 80 | 80 | 80 | 85 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| | Inv. Final | 5 | 15 | 0 | -5 | -5 | 10 | -5 | 5 | 0 | -5 |
| | Ordena | 90 | 65 | 80 | 90 | 95 | 70 | 90 | 75 | 80 | 90 |
| Mayorista | Inv. Inicial | 100 | 90 | 65 | 80 | 90 | 95 | 70 | 90 | 75 | 80 |
| | Surte | 90 | 65 | 65 | 80 | 90 | 70 | 70 | 75 | 75 | 80 |
| | Inv. Final | 10 | 25 | -15 | -10 | -5 | 25 | -20 | 15 | -5 | -10 |
| | Ordena | 80 | 40 | 95 | 100 | 100 | 45 | 110 | 60 | 85 | 100 |
| Distribuidor | Inv. Inicial | 100 | 80 | 40 | 95 | 100 | 100 | 55 | 110 | 60 | 85 |
| | Surte | 80 | 40 | 40 | 95 | 100 | 45 | 55 | 60 | 60 | 85 |
| | Inv. Final | 20 | 40 | -55 | -5 | 0 | 55 | -55 | 50 | -25 | -15 |
| | Ordena | 60 | 0 | 150 | 105 | 100 | 0 | 165 | 10 | 110 | 115 |
| Planta (Productor) | Inv. Inicial | 100 | 60 | 60 | 150 | 105 | 100 | 100 | 165 | 155 | 110 |
| | Surte | 60 | 0 | 60 | 105 | 100 | 0 | 100 | 10 | 110 | 110 |
| | Inv. Final | 40 | 60 | -90 | 45 | 5 | 100 | -65 | 155 | 45 | -5 |
| | Procesa | 20 | 0 | 240 | 60 | 95 | 0 | 230 | 0 | 65 | 120 |

Tabla 3. Elaboración propia basada en la fuente [Gigola, 2001]

Analizando la tabla encontramos que:

1 La demanda del minorista se comporta de forma uniforme y sus niveles de inventario no sufren serios desabastos. Esto es a consecuencia de que tiene un contacto directo con el comportamiento del consumidor, por lo que puede reaccionar más rápido a los cambios y modificar la cantidad que ordena, pero conforme las órdenes avanzan (el consumidor → el minorista → el mayorista → el distribuidor → el productor) aumenta la inestabilidad del inventario donde en ocasiones las órdenes son muy pequeñas y en otras son excesivamente grandes, esto debido a que desconocen el verdadero comportamiento del consumidor y sólo ven lo que su cliente solicita, dificultando la tarea de pronosticar con certeza cuando la demanda es estocástica.

Esto lo podemos visualizar en la siguiente gráfica:

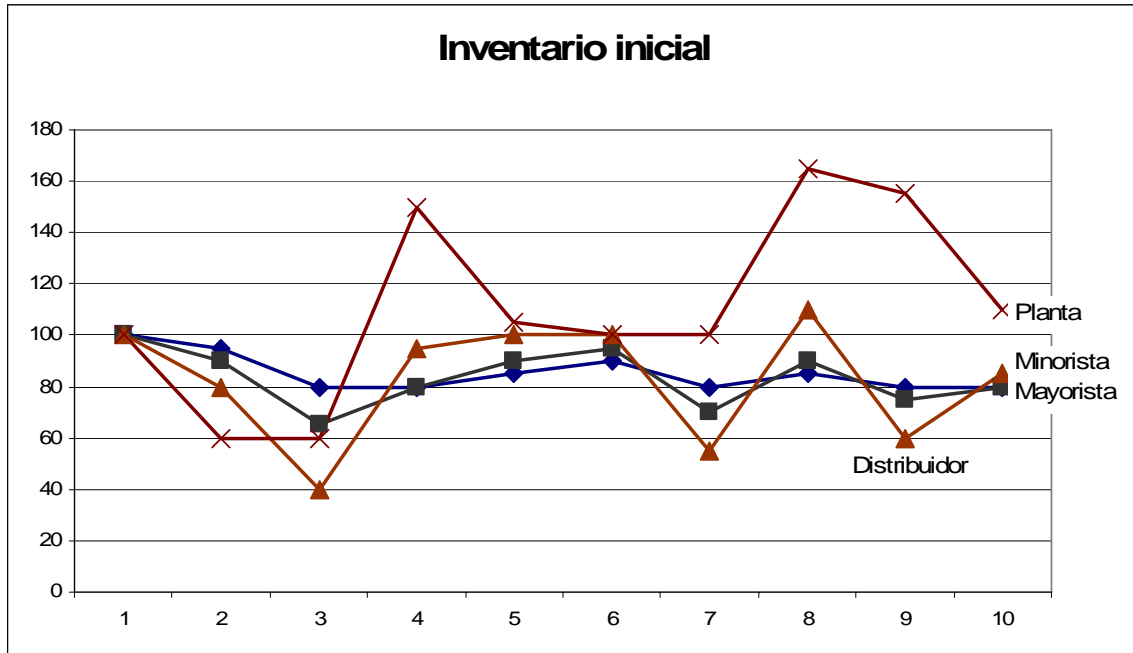


Gráfica 1. Elaboración propia

Este comportamiento ocasiona serios daños a todos los miembros de la cadena, principalmente al productor (que es el último eslabón de la cadena), ya que incurre en un exceso en sus costo por la compra de materia prima debido a una orden imprevista por su cliente, adicionando enormes gastos de producción, utilizando de forma ineficiente las horas de trabajo haciendo uso de horas extras debido a paros de máquina, falta de material, falta de personal operativo, e incluso se puede llegar a sobrepasar su capacidad de producción alargando los tiempos de entrega.

Los gastos de distribución que también pueden ser excesivos, incrementándose los costos de transporte debido a una ineficiente programación de los envíos tal como los gastos por expediciones urgentes.

2 Los niveles de inventario inicial se ven afectados debido a la ignorancia de la demanda original. Se destaca que el productor es quien conserva los inventarios más altos, seguido por el distribuidor y así subsecuentemente, ocasionando altos costos por almacenamiento. Lo podemos observar en la siguiente gráfica:

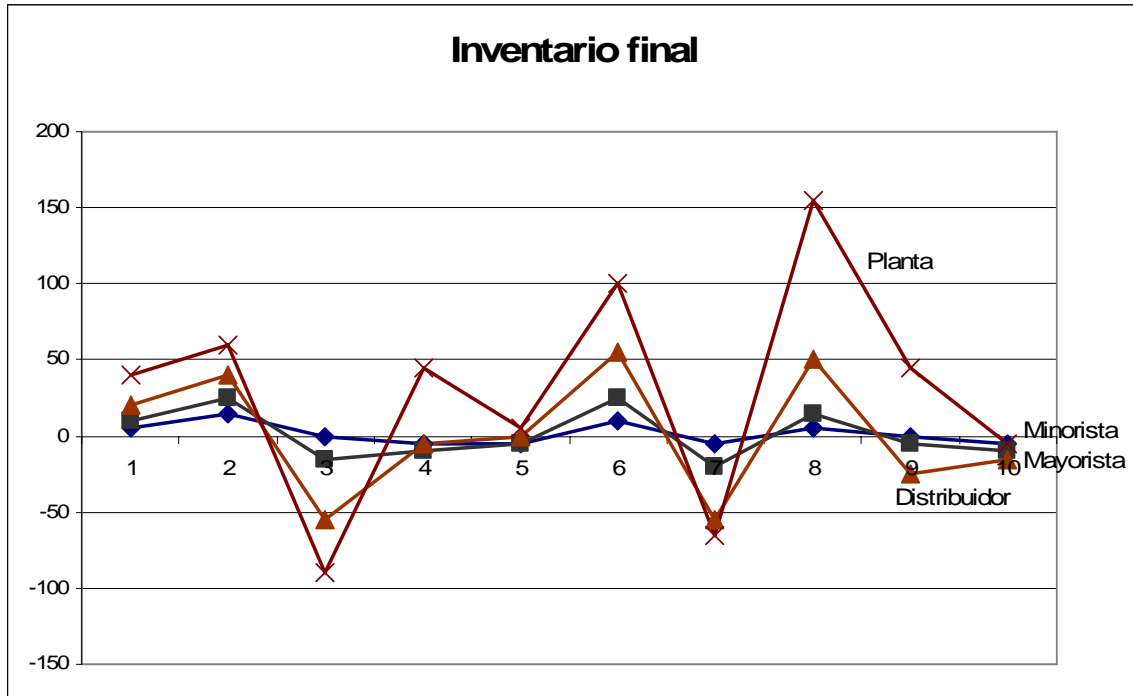


Gráfica 2. Elaboración propia.

Cabe señalar que el tener un inventario muy grande no es igual a “seguridad”, por el contrario es una señal de peligro, ya que puede ocurrir que el producto ya no sea de la preferencia del consumidor y se vuelva obsoleto, reflejándose por lo tanto en pérdidas para otros. Además, indica que el proceso de manufactura no está controlado.

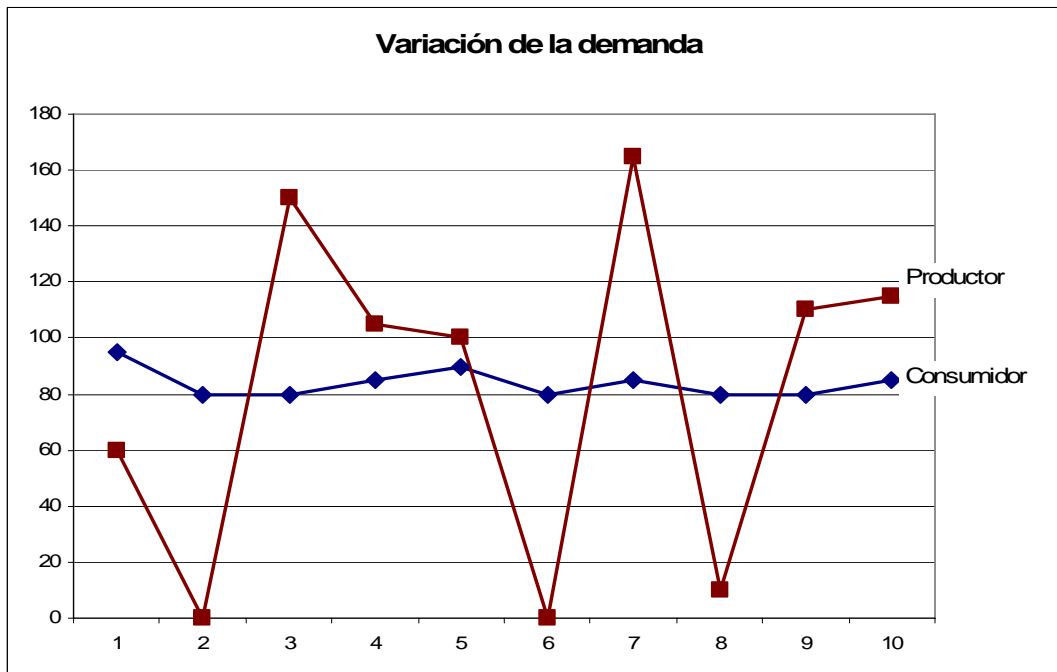
3 Los inventarios finales presentan subidas y bajas muy pronunciadas, especialmente para el productor. Esto afecta directamente al programa de envíos, provocando que la mayor parte de las entregas estén retrasadas debido a la escasez del producto en el momento en que ingresa una orden, dando como resultado un deficiente nivel de servicio, provocando descontentos entre los clientes trayendo como consecuencia sanciones o cambios de proveedores, pero la realidad es que el sistema no está sincronizado.

La siguiente gráfica lo muestra:



Gráfica 3. Elaboración propia.

En conclusión, por la falta de un canal de comunicación que enlace a cada empresa podemos ver en la siguiente gráfica que la cantidad demandada va aumentando significativamente, de tal forma que la demanda del productor está muy alejada de la demanda original.



Gráfica 4. Elaboración propia.

A esta variabilidad de la demanda se le conoce con el nombre de **Efecto Látigo** (*Bullwhip Effect*, **BE** de aquí en adelante así lo definiremos). Se le da este nombre por su peculiar característica, la cual mostramos con el mismo ejemplo en la figura siguiente. Vemos las variaciones que tiene la demanda desde el minorista hasta el productor, dando la apariencia de un látigo, cabe señalar que dicha variabilidad es independiente de la demanda original, pues este efecto es debido a la administración miope de la SC, esto es, cada quien ve la información que recibe.

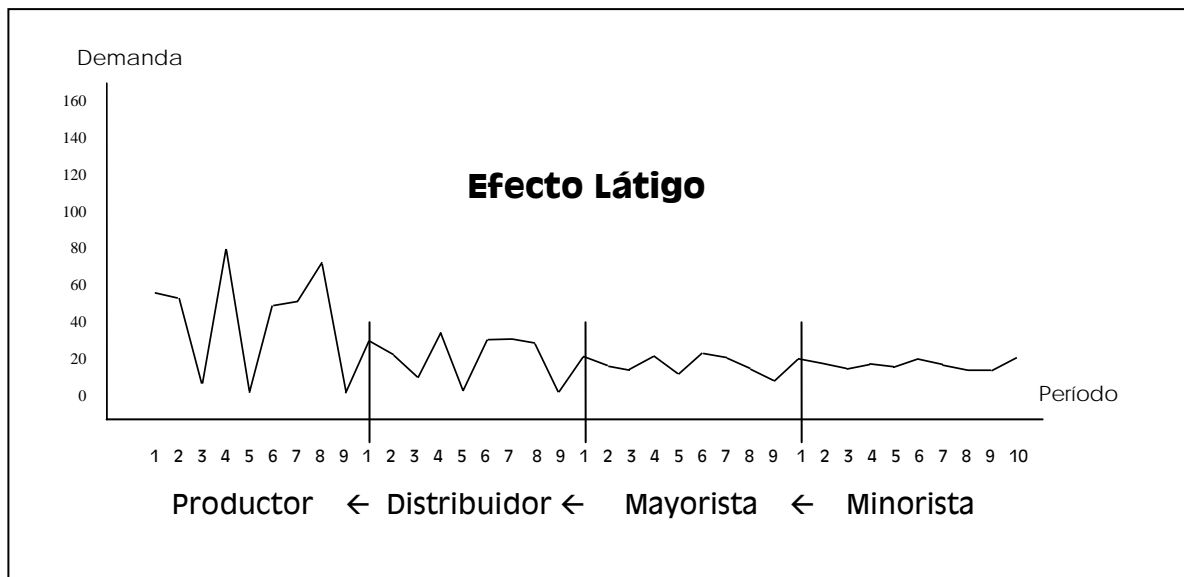


Figura 5. Elaboración propia.

Lee, Padmanabhan y Whang en 1997 y Lee, So y Tang en 2000 fueron quienes popularizaron el término de “efecto látigo” [Warburton, 2004], ellos describen que las órdenes del minorista hacia el proveedor original (productor en nuestro ejemplo) tienen una gran variación, de tal forma que la demanda del minorista es el disparador para ir incrementando las órdenes, es decir, el minorista solicita la cantidad que requiere para satisfacer su demanda, esta cantidad es la demanda del mayorista por lo que su pronóstico y su programa su producción se basa en esta información, pero la información que genera, ya trae consigo el error del minorista más la suya propia, así es que cuando llega al proveedor original la información acarrea la suma de los error de sus antecesores.

Por consiguiente, el analizar las causas y proponer soluciones para disminuir los efectos perjudiciales del BE, es una forma de aprovechar los recursos, disminuir los costos y mejorar el servicio.

2.2 El efecto látigo: Causas que lo originan y sus posibles soluciones

Lee, Padmanabhan y Whang [Lee et. al; 1997] identificaron *4 principales causas* que provocan el BE, estas son establecidas como generales por el hecho de que son efectos comunes dentro de todos los canales de distribución. Para poder entender el origen de estas causas; Lee, Padmanabhan y Whang inician con la idealización de una situación, considerando las siguientes condiciones:

1. La SC conformada por 2 elementos: un minorista y un proveedor.
2. El sistema de inventarios multiperíodo que es operado bajo la política de punto de reorden S , cuando S es la cantidad a ordenar en cada período es óptima y es exactamente igual a la demanda del período anterior, entonces las órdenes tienen la misma varianza.
3. La demanda anterior no se usa para pronosticar, es decir, cuando la demanda es invariable.
4. El reabastecimiento es instantáneo con un lead time fijo.
5. No hay costos por ordenar.
6. Los costos por "compra" del producto son fijos en el tiempo.

Si se suavizan las últimas cuatro condiciones encontramos que corresponden a *las 4 principales causas del BE* y que todas estas afirmaciones están interrelacionadas entre sí y además reflejan la dinámica del mercado, las cuales se enumeran a continuación:

1^a Causa del BE: *El uso de los pronósticos para calcular la demanda (Demand signal processing)* se realiza cuando la demanda es estocástica, por lo tanto es necesario hacer uso de la información histórica para pronosticar el siguiente período.

2^a Causa del BE: *La consolidación de las órdenes (Batch ordering)* se utiliza cuando el costo por ordenar es diferente de cero, entonces el ordenar en cada período puede ser poco económico y se opta por consolidar las órdenes para reducir gastos.

3^a Causa del BE: *Fluctuación o variabilidad en los precios y las promociones (Price variations)* en la vida real no existe un precio de compra constante del producto, pues éste se puede ver afectado por promociones o descuentos ofrecidos.

4^a Causa del BE: *Inflar las órdenes como reacción al riesgo por desabasto (Shortage gaming)* cuando es detectada una señal de alarma por desabasto, la primera reacción es inflar las órdenes, es decir, se toma como una estrategia de

compras el aumentar la cantidad a adquirir, se prevé la escasez y procuran anticiparse al hecho.

La identificación de estas causas, conducen a la prescripción de soluciones para suavizar y en algunos casos el poder eliminar el impacto perjudicial del fenómeno del BE, los cuales describiremos más adelante. Además, estos autores sugieren que la disposición de la información de las órdenes recibidas y el estatus del inventario por todos los miembros de la cadena son vitales para lograr un mejoramiento en la coordinación y sincronización.

Se debe tener muy presente en este tipo de consideraciones que los datos deben mostrar el consumo y no un patrón de ventas, en otras palabras, el sistema de inventarios requiere la información de la demanda no de las ventas.

Autores como Chen [Chen et. al; 2000] mencionan otros factores como son:

- i) Escasez en abastecimientos.
- ii) El atraso en los tiempos de suministro (Lead time).

Pero en realidad corresponden a una generalización de algún problema o se consideran como efectos y no causas.

El fenómeno del BE trae consigo severas consecuencias negativas en todos los niveles de la SC, tales como:

- Mantener demasiado alto el inventario de seguridad, es decir, cada miembro de la cadena considera la necesidad de retener una gran cantidad de materia prima/producto para prever circunstancias desfavorables, ya que normalmente este hecho da un sentimiento de seguridad, teniendo como propósito el asegurar la satisfacción de las órdenes.
- Tener una visión del desempeño de la empresa en decrecimiento. Esto significa que, cuando la empresa detecta que el comportamiento de la demanda es inestable y los pronósticos no se ajustan apropiadamente a la realidad, empieza a buscar mecanismos de defensa y todo aquello que no puede controlar se convierte en inventario, por lo tanto, muchos bienes pierden su valor o son abaratados.
- Tomar la decisión de hacer cambios en la fabricación, esto es, cuando las fluctuaciones en la demanda repercuten seriamente en los programas de producción, puede presionar de tal manera, que la empresa tome la decisión de buscar nuevas formas de inversión o adoptar un nuevo plan de inventarios, debido a un aparente crecimiento en la demanda, o bien,

la demanda puede ser casi nula, que tome la decisión de hacer recortes de personal y paros de máquina, significando pérdidas excesivas.

- Llevar a la empresa a una sobre capacidad de producción, impactando seriamente en los costos de transporte y almacenamiento, provocando enormes gastos que pueden terminar por llevar a la empresa a la quiebra.

Estos cambios bruscos pueden ser evitados, siempre y cuando se tenga la clara identificación de la causa que lo origina; al respecto Lee, Padmanabhan y Whang [1997] dan algunas medidas para mitigar sus efectos nocivos las cuales examinaremos a continuación.

2.2.1 Uso de los pronósticos para calcular la demanda (Demand signal processing)

De acuerdo a Lee, Padmanabhan y Whang [1997] la distorsión de la demanda surge cuando el minorista basa su pronóstico en la demanda del consumidor pero sin compartir la información real, por lo tanto, el productor desconoce la verdadera demanda y programa su producción con base en la señal recibida por el minorista y conforme va creciendo el número de intermediarios, se va distorsionando cada vez más la información.

Por lo general, cada miembro de la cadena pronostica su demanda con base en los datos históricos de su cliente y muchas veces esta información es parcial, esto conlleva a que el error incluido en el pronóstico se suma al error de su cliente y así sucesivamente. Algunos optan como medida de mejora, por el perfeccionar sus métodos de pronósticos pero esta medida no evita de ninguna manera el efecto amplificador del BE sino que por el contrario lo aumenta, debido a que los errores no se encuentran en el método sino en los datos [Gigola, 2001].

Una clara solución es que el productor tenga acceso a la demanda original, haciendo uso de medios electrónicos que faciliten y agilicen la transferencia de los datos en tiempo real, pero el solo hecho de acceder a una base de datos común no es una solución total, pues el usar diferentes formas de pronosticar provoca también las fluctuaciones. Para solucionar este problema se puede tener personal encargado que pronostique la demanda y la comunique a todos los miembros de la cadena. A este método se le conoce como un sistema de control de inventarios multiescalón centralizado [Lee et. al; 1997].

Otra medida benéfica es eliminar intermediarios como bodegas que sirven de interfase entre el proveedor y el cliente, que son innecesarios y que sólo aumentan el volumen de la cadena entorpeciendo su desempeño.

2.2.2 Consolidación de las órdenes (Batch ordering)

La agrupación de las órdenes se da a consecuencia de 4 factores [Lee et. al; 1997]:

Primero, la distorsión de la demanda se debe al proceso de revisión periódica. Puede ser aliviada proporcionando al productor el acceso a los datos de la demanda y/o a los datos del inventario de su cliente. Por lo tanto, el productor puede usar esta información para crear su programa de producción.

Segundo, los gastos por procesar una transacción de compra tienden a ser muy altos debido a la burocracia y al proceso de requerimiento para generar una orden. Para reducir la necesidad de consolidar las órdenes se puede hacer uso del modelo tradicional del **EOQ** (*Economic Order Quantity Model*) para reducir costos. Otro enfoque que puede ser usado es la coordinación de los envíos con el propósito de balancear las órdenes.

Tercero, algunos productores pueden influir en los compradores para que tomen la decisión de ordenar una cantidad de productos para llenar el envío y algunos otros ofrecen incluso descuentos por volumen. Un procedimiento frecuente para eliminar este tipo de prácticas, es el reabastecimiento en pequeños lotes, esto hace que los envíos sean más eficientes con una menor distorsión en la información de la demanda.

Cuarto, cuando la empresa detecta un aumento en la demanda, su primera reacción es colocar una orden que se incluya en el inventario de seguridad, cuya cantidad a ordenar depende de: a) la variabilidad de la demanda, b) la incertidumbre y c) la demora de los tiempos de suministro (lead time). Una solución efectiva es hacer uso de sistemas de transmisión de datos vía electrónica como el sistema **EDI** (*Electronic Data Interchange*) que es una gran ayuda para reducir los costos por ordenar y el tamaño de lote.

Un desarrollo interesante que se ha venido dando, es el crecimiento de terceros proveedores de logística, estas compañías se dedican a explorar economías de escala que no son tan accesibles a una relación tradicional comprador-vendedor. Estas compañías consolidan varias órdenes de varios clientes quienes se encuentran geográficamente próximos, esta opción puede ser muy económica para compradores individuales.

2.2.3 Fluctuación o variabilidad en los precios y las promociones (Price variations)

Normalmente, cuando se ofrecen descuentos o promociones de forma esporádica es por varios motivos, entre los cuales podemos mencionar:

- a) existe un exceso de producción, o
- b) el producto actual será reemplazado por un nuevo, o
- c) por negocios de marketing que ofrece un distribuidor.

A consecuencia de esto se venden cantidades mayores a la demanda normal durante un período programado, provocando una alta variabilidad de las existencias en los inventarios a lo largo de la SC.

La razón principal para una estrategia de compra de este tipo es que el comprador se beneficia con los descuentos ofrecidos durante un corto período, mientras que para el productor significa programas de producción irregulares, costos innecesarios de inventarios e información distorsionada de la demanda, por lo tanto, el hecho es que el comprador gana y el productor pierde.

Un camino para controlar el BE debido a la variación de precios y equilibrar esta situación comprador-productor es según Lee et. al. (1997), reducir la frecuencia de las promociones comerciales y/o descuentos al por mayor. Una fórmula reciente que se ha convertido en el centro del cambio para importantes productores es la estrategia: "*El precio bajo todos los días*" (**EDLP**, Every Day Law Price), que es un concepto opuesto a varias cadenas de alimentos o supermercados. De este modo, el productor puede tomar la práctica del EDLP y junto con el comprador acordar un contrato donde él se compromete a comprar una gran cantidad de bienes con un descuento, pero estas son enviadas en parcialidades en diferentes periodos. Este camino le provee al productor un plan de producción más uniforme y eficiente. A su vez el comprador puede aprovechar una estrategia de compra mejor planeada salvando para ambos el costo del inventario.

2.2.4 Inflar las órdenes como reacción al riesgo por desabasto (Shortage gaming)

"Pedir 100 para que me envíen las 50 que necesito [Gigola, 2001]" es una práctica muy común en las empresas y está muy relacionada con la limitación de la capacidad del proveedor debido a una mala elección, con el hecho de que la demanda potencial excede la capacidad de producción del proveedor, con la incertidumbre de la demanda o con un posible cambio en los precios de los materiales o debido a un posible riesgo de desabasto. Este tipo de información

se incluye muchas veces en los pronósticos que distorsionan aún más la información real afectando seriamente al sistema de inventarios el cual tarda varios periodos para poder estabilizarse.

Una alternativa a este problema puede ser asignar el abastecimiento en proporción al mercado del minorista con respecto al periodo anterior, note también que esto puede ser usado para la propia protección del productor, cuando él mismo comparte la información de su producción e inventarios con los demás miembros de la cadena. Sin embargo, esto no resuelve el problema de la disputa de los recursos para la satisfacción de todos en una situación de desabasto real. Una solución más eficiente viene en forma de un contrato que limita la flexibilidad del comprador, que va desde una opción sin restricciones de cantidad, hasta un retorno libre y políticas de cancelación de órdenes.

Por ejemplo, una forma común de operar los contratos es como sigue [Lee et. al; 1997]: un comprador inicia transmitiendo su pronóstico de demanda a 18 semanas antes del envío, después el comprador actualiza su pronóstico inicial 4 semanas antes, si ocurren cambios, solamente se permite modificar en un 30% del pronóstico inicial, después de las 4 semanas el comprador actualiza nuevamente el pronóstico un tiempo más, pero la siguiente modificación es a un 15% del pronóstico anterior, este proceso es observado en una computadora por cada proveedor. Cuando es enviado el tercer pronóstico la orden ya está cubierta por el proveedor. Este método de compartir información del pronóstico permite reducir riesgos y tener una mayor flexibilidad.

Podemos resumir en la siguiente tabla los factores que producen las causas principales que originan el BE, así como las estrategias sugeridas para mitigar sus efectos nocivos:

**EFECTO LÁTIGO:
Causas y estrategias**

| Causas | Factores que contribuyen | Estrategias |
|------------------------------|--|---|
| Uso de pronósticos | <ul style="list-style-type: none"> ▪ No hay visibilidad de la demanda final. ▪ Múltiples pronósticos. ▪ Lead time largos. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Acceso por venta o datos POS. ▪ Un solo control de reabastecimiento. ▪ Reducción del lead time. |
| Consolidación de las órdenes | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Altos costos de ordenar. ▪ Proceso de revisión periódica. ▪ Aleatoriedad o correlación de órdenes. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ EDI y CAO. ▪ Descuento por volumen, consolidación por terceras partes de logística. ▪ Citas de entrega regular. |
| Variación de los precios | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Precios Altos-bajos. ▪ Envío y compras asincrónico. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ EDLP. ▪ Contrato especial de compra. |
| Continúa... | | |

| | | |
|--------------------------|---|---|
| Inflación de las ordenes | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ignorancia de las condiciones de abastecimiento. ▪ Altos inventarios de seguridad. ▪ Ordenes sin restricción y política de libre retorno. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Asignación basada en la demanda pasada. ▪ Compartiendo información de capacidad y abastecimiento. ▪ Limitar la flexibilidad en cada período, reservación de capacidad. ▪ Programa de racionamiento proporcional. |
|--------------------------|---|---|

Tabla 4. Fuente [Lee et. al; 1997]

Donde:

POS: Point Of Sells

EDI: Electronic Data Interchange

CAO: Computer Assisted Ordering

EDLP: *"El precio bajo todos los días"*

Sin embargo, toda esta información sólo la puede proveer el minorista que tiene contacto directo con el comportamiento del consumidor por lo que su participación es muy importante, para lograr un adecuado flujo de información y bienes. No sólo se necesitan mejorar los procesos, los indicadores, o implantar nuevas filosofías sino que es necesario iniciar con un cambio de actitud.

En conclusión, la distorsión de la demanda surge como resultado de la optimización individual de cada miembro de la cadena de suministro, pero el compartir información a cerca del estatus del inventario, las ventas, la coordinación de las órdenes y la simplificación de los programas de precios/promociones del productor, pueden ayudar a mitigar el BE.

2.3 Estado del arte

La siguiente tabla resume algunos de los estudios realizados en torno el **BE**, algunos de estos se centraron en definir la dinámica de la SC utilizando varios tipos de distribuciones para ilustrar el comportamiento de la demanda, otros han hecho uso de experimentos numéricos para estudiarlo, entre otros.

| <i>Año</i> | <i>Autor</i> | <i>Clasificación</i> | <i>Contribución</i> |
|-------------------|---|---|--|
| 1958 (A) | Forrester (Warburton, 2004) | Primera definición de la dinámica de los sistemas productivos. Definición del BE. Primera definición del SCM. | Fue el primero en definir el BE en una simplificada forma, (A) demostró que la diferencia fundamental del retraso, es una reacción del inventario ante la demanda del consumidor, es considerado por lo tanto el pionero del (B) enfoque de simulación y establece la importancia entre la integración del flujo de información con el flujo de materiales. |
| 1961 (B) | | | |
| 1961 (A) | Burbidge (Warburton, 2004) | Definición de la sincronización de la demanda. Definición de la dinámica de los sistemas productivos. | (A) Enfatizó un nuevo principio para reducir el tiempo del ciclo y la sincronización de la orden. (B) Inventó su Ley de Dinámica Industrial, desde entonces ha sido empleada extensivamente la simulación para analizar las cadenas de suministro. |
| 1984 (B) | | | |
| 1989 | Sterman (Lee et. al; 1997) | Definición del BE. | Reportó evidencia del BE en un contexto experimental de la gestión de inventarios en el "Juego de la cerveza". |
| 1993 | Van Ackere y E. R. Larsen (Makui et. al; 2007) | Método para reducción/ eliminación del BE. | Proveen una útil estructura para clasificar los indicadores que pueden ser usados en la SC para reducir/ eliminar el BE. Distinguiendo 3 enfoques: a) rediseñar el proceso físico (como la reducción del lead time y la eliminación de un canal en la SC) b) rediseñar los canales de información (como proveer los datos de la demanda del consumidor a los largo de la SC) y c) rediseñar los procesos de decisión (usando diferentes reglas de reabastecimiento). |
| 1994 | John, Naim y Towill (Warburton, 2004) | Método para mejorar la eficiencia en los inventarios. | Usaron el Teorema de Valor Final (FVT) para demostrar una medida funcional para el inventario, en donde puede ocurrir un déficit a largo plazo, verificando la predicción a través de la simulación. |
| 1996 | Bourland, Powell y Pike (Warburton,2004) | Método para reducción/ eliminación del BE. | Examinaron el caso de un productor con revisión periódica que no está sincronizada con el minorista. |
| 1999 | Gavirneni, Kapuscinski y Tayur (Warburton, 2004) | Método para reducción/ eliminación del BE. | Consideraron un productor con capacidad limitada. |
| 2000 | F. Chen et. al. (Makui et. al; 2007) | Método para cuantificar el BE. | Cuantificaron el BE por medio de la política order-up-to basada en los pronósticos de suaviamiento exponencial y promedios móviles. |
| 2000 | J. G. Kim (Makui et. al; 2007) | Método para cuantificar el BE. | Cuantificó la amplificación de la varianza con un gama de lead times. |
| 2002 | Disney y Towill (Warburton, 2004) | Definición del BE. | Proveyeron una útil recopilación de la teoría del control aplicable el BE. |
| Continúa... | | | |

| Año | Autor | Clasificación | Contribución |
|------|--|---|---|
| 2002 | Dejonckheere, Disney, Lambrecht y Towill (Warburton, 2004) | Método para cuantificar el BE. | Usaron la transformada z para investigar el desempeño del BE en modelos order-up-to. |
| 2005 | Sheu Jiu-Biing (Makui et. al; 2007) | Método para reducción/eliminación del BE. | Mostraron una estrategia de control logístico multicapa de demanda sensible, para mitigar de forma eficiente y efectiva el BE. |
| 2006 | S. Geary (Makui et. al; 2007) | Método para reducción/eliminación del BE. | Determinó 10 principios que pueden ser utilizados para la reducción del BE, estos son: Principio de sistema de control, Principio de compresión del tiempo, Principio de información transparente, Principio de eliminación de escalón, Principio de de sincronización, Principio de multiplicador, Principio de de pronóstico de demanda, Principio de consolidación de órdenes, Principio de fluctuación del precio, Principio de gaming. |

Tabla 5. Elaboración propia

Como se puede observar, el BE ha sido documentado y estudiado en diferentes industrias y situaciones, dentro de un contexto experimental y gerencial [Warburton, 2004]. Concluyendo de este modo, que este fenómeno es un problema trascendental que limita el desarrollo integral de la SC.

2.4 Definición de la cadena de suministro como un sistema dinámico

Como se menciona anteriormente, Forrester (1958) fue el primero en estudiar la dinámica de los factores que intervienen dentro de la SC (como la investigación, la ingeniería, las ventas, las promociones, etc.) visualizándola como parte de un sistema industrial, sugirió que el éxito de un empresa depende en la interacción de 6 flujos, nombrados como: flujos de información, materiales, órdenes, dinero, personal y equipo importante [Mentzer et. al; 2001].

Forrester (1961) definió lo que se conoce como **Dinámica Industrial**, de la siguiente manera: *"...el estudio de las características de la retroalimentación de la información de la actividad industrial para demostrar cómo la estructura de la organización, la amplificación (en políticas), y el retraso (en la decisión y acciones) obra recíprocamente para influenciar el éxito de la empresa. Trata las interacciones entre los flujos de la información, el dinero, las órdenes, los materiales, el personal, y los bienes de equipo en una compañía, una industria, o una economía nacional."* [Angerhofer, 2000].

Posteriormente, Lane (1997) recapituló el enfoque de Forrester donde describe que la simulación en computadora es el medio para inferir la dinámica evolutiva del sistema, con el propósito de entender su comportamiento, pues una SC es un

sistema dinámico ya que contienen muchas relaciones no lineales, y darles una solución analítica para resolver un modelo de ecuaciones es infactible [Angerhofer, 2000].

En la primera publicación de Forrester, éste utilizó un modelo de un sistema de producción-distribución conocido como “Cadena de suministro de Forrester” o “Modelo de Forrester”, definido en términos de los 6 flujos ya mencionados. Basándose en un modelo clásico de SC (ver siguiente figura) ilustró la dinámica del sistema, utilizando la simulación en computadora logrando observar cómo el flujo de información influencia sobre la producción y la distribución en cada miembro de la cadena:

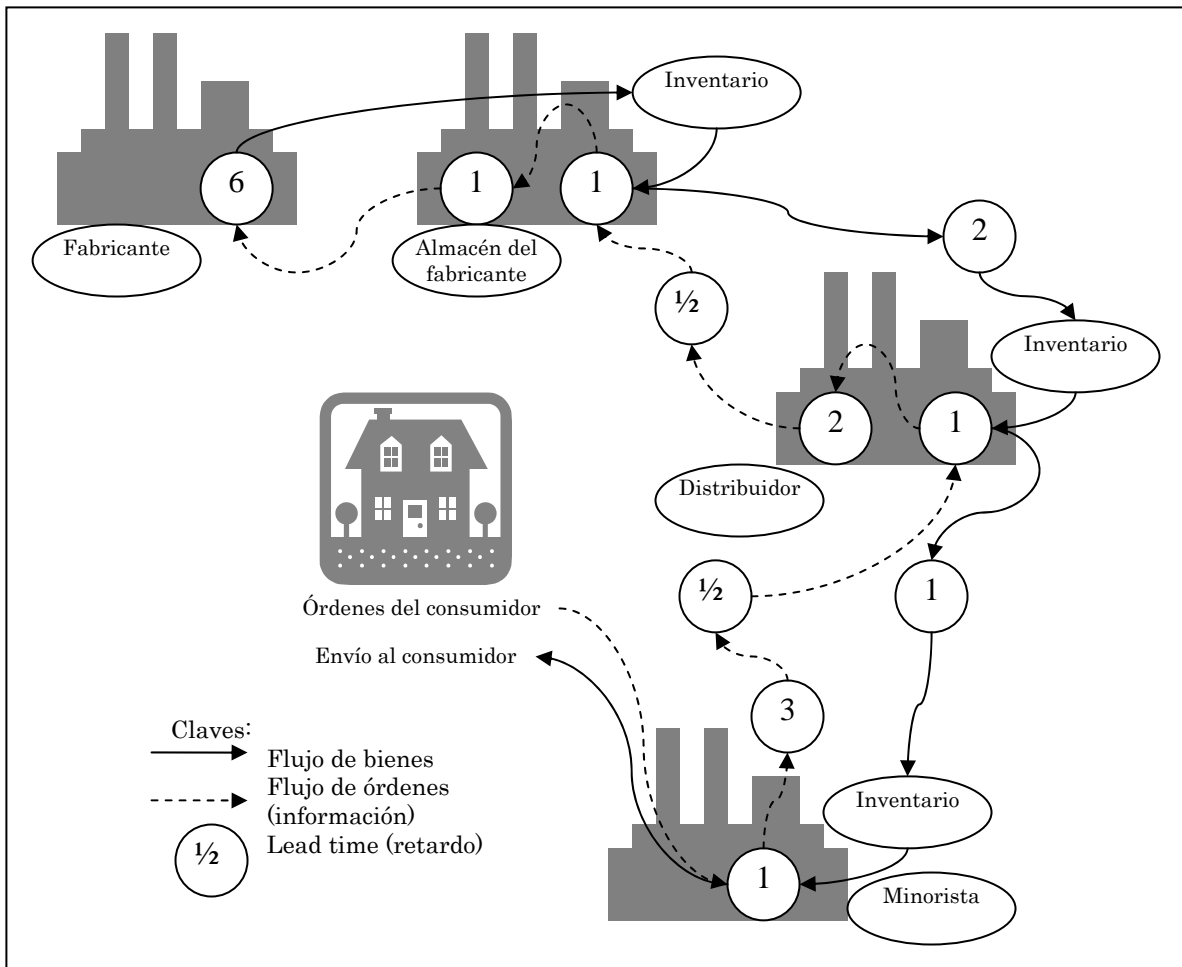


Figura 6. Fuente [Angerhofer, 2000].

En la ilustración anterior, vemos que el flujo de materiales es un flujo “aguas-abajo”, donde el material pasa del fabricante a su almacén, luego al distribuidor, al minorista y por último es enviado al consumidor. Las órdenes son un flujo de información inverso, que tiene asociado un retraso en cada escalón de la cadena,

el cual puede ser el *lead time* de la producción o un retardo en la administración para procesar una orden.

Usando este ejemplo, Forrester describió el proceso del sistema, resaltó la importancia de la retroalimentación en el flujo de la información, puntualizando que el primer paso para estudiar un sistema dinámico es identificando los problemas, formulando preguntas y respuestas; además, Forrester describió, analizó y explicó problemas que evolucionan alrededor de la SC como la amplificación de la demanda, el balance de inventarios, el efecto de las políticas de publicidad sobre la variación de la producción, el control descentralizado y el impacto del uso de la información tecnológica en el proceso de administración.

Capítulo III. El exponente Lyapunov

En base a lo estudiado en el primer y segundo capítulo, podemos concluir que una **SC es un sistema dinámico**, que puede ser modelado como la unión de flujos de información en el cual las relaciones no son siempre lineales. Por esta razón, cuando se presenta alguna causa que provoca inestabilidad en la cadena, se origina el fenómeno conocido como BE, esta inestabilidad puede ser cuantificada por medio del exponente de Lyapunov, el cual será tratado en esta tesis.

El exponente de Lyapunov es una medida que sirve para cuantificar la inestabilidad de los sistemas dinámicos y está basado en la teoría del caos, por lo cual, para que tengamos un mejor entendimiento, abordaremos inicialmente la conceptualización de la teoría del caos.

3.1 El concepto del caos

A mediados del siglo XX, se inició fuertemente el desarrollo de lo que se conoce como "*la ciencia del caos*". El físico Joseph Ford, proclamó en un artículo del libro *The New Physics a la nueva ciencia del caos como "el comienzo de la tercera revolución de la física del presente siglo"* [Sametband, 1999].

La palabra **caos** es de origen griego, que es equivalente a abismo o entidad sin forma [Ibid]. Es un estado de desorden que se presenta a largo plazo, que surge en sistemas dinámicos deterministas que exhiben una dependencia sensible a las condiciones iniciales; contrario a él está el *cosmos* que se define como "quien designa el orden".

En siglos pasados se tenía el conocimiento de que ciertos sistemas presentaban comportamientos indeterminados; y no fue sino hasta la aparición de las computadoras, que los investigadores pudieron percatarse que aun en los sistemas más simples, se presentaban comportamientos impredecibles a largo plazo y estos eran diferentes cada vez que se cambiaban las condiciones iniciales, aunque estas variaciones fueran mínimas. Actualmente, con el uso de las computadoras se facilita la comprobación de teorías mediante la experimentación, apoyándose en el uso de simulaciones de procesos reales y permitiendo crear modelos de sistemas complejos [Ibid].

A estos fenómenos estudiados se les denominó *caos determinista*, esto se refiere a que muchos sistemas en la naturaleza van cambiando conforme transcurre el tiempo. Actualmente la palabra complejidad designa el estudio de los *sistemas dinámicos* que pueden ser físicos, químicos, electromecánicos, biológicos, etc.

Dichos fenómenos aparecen cuando los sistemas son extremadamente sensibles a sus condiciones iniciales (que son de posición, velocidad, temperatura, etc.), de modo que pequeñas alteraciones provocan grandes diferencias en sus efectos, por lo que se hace imposible predecir con exactitud cómo se comportará el sistema después de cierto tiempo.

Un papel influyente en el estudio de estos fenómenos se dio en la escuela rusa de físicos y matemáticos, quien proveyó a científicos e investigadores renombrados como Landau, Kolmogorov, Andronov, Lyapunov, etc.; quienes desarrollaron las técnicas necesarias mucho antes de que el caos determinista pasara a ser un tema actual.

3.1.1 Orígenes del caos

A partir de los descubrimientos de Isaac Newton, de sus teorías de la dinámica clásica y de las ecuaciones diferenciales, se consideraba que "el Universo es ordenado y predecible; que tiene leyes expresables en lenguaje matemático, que podemos descubrirlas" [Ibid]. Además, Newton aplicó un concepto que ha sido esencial para el método científico, que es el de *aislar al fenómeno* en estudio del resto del universo del que forma parte, considerando únicamente las variables que son realmente relevantes. Este proceso científico hacía parecer que el universo podría llegarse a expresar de forma matemática y predecible.

De acuerdo al enfoque Newtoniano, un sistema dinámico puede ser dividido en: 1) *Condiciones iniciales* que son muy complejas, porque son una combinación de muchos factores que reflejan la complejidad del mundo en que vivimos y 2) *Las "leyes físicas" o naturales*, que son más simples y se expresan mediante ecuaciones diferenciales [Ibid].

Esta revolución del pensamiento científico, tuvo su más clara expresión con Pierre Simon de Laplace, un especialista en las leyes de la mecánica clásica, quien llegó a determinar que el tiempo era un factor que dejaba de tener un significado físico, a esto se le conoció como "demonio de Laplace" [Ibid]. De aquí que durante los siglos XVIII y la mitad del siglo XIX, sólo se podían resolver aquellas ecuaciones que representaban las leyes físicas simples para sistemas con condiciones iniciales simples, debido a lo engorroso de los cálculos porque se desarrollaban a mano y conforme avanzaba la complejidad en las ecuaciones, la tarea de encontrar una solución se hacía más difícil.

Pero en la segunda mitad del siglo XIX, quedó definido cuáles eran los límites de la mecánica clásica, pues perdían validez para velocidades extremadamente grandes o para un mundo extremadamente pequeño. Producto de esta crisis,

surgieron en la segunda mitad del siglo XX las teorías de la relatividad y la mecánica cuántica [Ibid].

Debido a estas deficiencias, se abrió paso a una nueva forma de estudiar los sistemas dinámicos, pues se encontró que no sólo las leyes complejas describen el mundo complejo en que vivimos, sino que en sistemas simples, sometidos a leyes simples, pueden tener un comportamiento caótico no previsible. Es entonces que podemos distinguir entre dos tipos de ecuaciones, las lineales y las no lineales.

Las ecuaciones lineales, tienen la característica de que sus soluciones se obtienen por medio de la integración y para la más simple de ellas (de una sola variable), su solución queda representada por un línea recta, de ahí su nombre. La mayoría de los fenómenos naturales se expresan mediante ecuaciones no lineales, y para poder resolverlos se usa el procedimiento tradicional llamado "aproximación lineal", que consta de eliminar los factores de menor influencia, siendo estas ecuaciones las que presentan mayor sensibilidad a las condiciones iniciales.

Esto no significa que todos los sistemas sean desordenados y caóticos, ya que para ciertas condiciones iniciales su comportamiento es ordenado y por lo tanto predecible. Aun en el estado caótico, existen sistemas que presentan propiedades que pueden comprenderse con la ayuda de la *teoría de probabilidades* [Ibid], como ejemplo, las turbulencias y oscilaciones físico-químicas y biológicas.

De modo que, cuando se trate de sistemas dinámicos a los cuales no se les puede aplicar las leyes de Newton para precisar su comportamiento, lo más cercano a una predicción es establecer la probabilidad de que ocurra un evento determinado, siendo C. Maxwell en 1873 y H. Poincaré en 1908, los primeros en apreciar estas características esenciales de los sistemas no lineales.

Poincaré se considera como el primer descubridor del caos, al examinar el caso del movimiento orbital de 3 cuerpos que mutuamente ejercen una fuerza gravitatoria sobre otros, pero él decía que este efecto se debía al **azar**, el cual tiene dos raíces principales:

- 1) *la sensibilidad a las condiciones iniciales*, que hace que aunque se conozcan las leyes del sistema, los pequeños errores iniciales tienen una enorme influencia sobre el estado final, y
- 2) *la complejidad de las causas*, porque debido al *proceso de aislamiento* que toma en cuenta una pequeña parte de las influencias a las cuales está sometido el sistema, provoca una disminución en el alcance de la predicción.

La obra de Poincaré ha sido básica para el estudio de los sistemas dinámicos y lo consagra como el fundador de los métodos que hoy permiten abordar las matemáticas del caos determinista, como la bifurcación, los atractores extraños y los exponentes de Lyapunov.

3.2 Sensibilidad de los sistemas no lineales

Los sistemas dinámicos deterministas son sensibles a las condiciones iniciales. Esta **sensibilidad** es una característica de los sistemas caóticos, pero no implica que esto se dé de forma automática, sino que hay sistemas que son sensibles pero no se comportan de forma caótica.

En un sistema caótico, la sensibilidad significa que en cualquier intervalo arbitrariamente dado, de valores iniciales pequeños, se irá amplificando significativamente en cada iteración, es decir, conforme evolucione el sistema. Contrario a éste, la **estabilidad** de un sistema no depende de los valores iniciales, esto es, no importa dónde inicie el sistema, su comportamiento será el mismo al final [Peitgen et. al; 2004]. De aquí, distinguimos un concepto más que es el de *atractor*. Los primeros trabajos sobre este tema fueron realizados por E. Lorenz, D. Ruelle y F. Takens.

Para entender el concepto de atractor de una forma sencilla, considere un sistema formado por un péndulo ordinario (ver siguiente figura), al cual se le da un impulso inicial y al cabo de un cierto tiempo, el péndulo vuelve a su estado inicial debido a la pérdida de energía, la trayectoria descrita es una espiral, que desemboca inevitablemente en un punto de reposo, de ahí que se le conozca como "**atractor**".

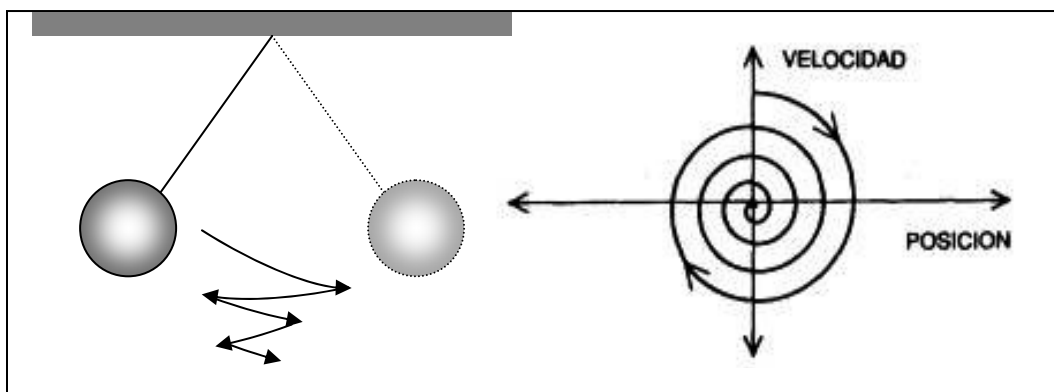


Figura 7. Fuente [Sametband, 1999]

Podemos diferenciar que un atractor tiene dos aspectos generales [Ibid]:

-
-
- [1] Un atractor jala en o sobre los puntos cercanos. Este tipo de atractores pertenecen a estados estables y predecibles, porque no tienen sensibilidad. Esto es evidente porque las trayectorias descritas que partan de cualquier condición inicial terminan irremediabilmente dentro del atractor, siguiendo un comportamiento estable y predecible [Sametband, 1999].
- [2] En un atractor caótico, las órbitas de puntos cercanos deben diverger de uno a otro debido a la dependencia sensible de las condiciones iniciales. Esto se distingue porque si uno examina dos trayectorias vecinas, estas se alejan rápidamente [Ibid].

Existen varios tipos de atractores, pero no los mencionaremos, sólo nos enfocaremos a describir a los *atractores extraños*.

Considere un sistema formado por dos péndulos acoplados, uno de los péndulos es liviano constituido por dos esferas unidas por un eje alrededor del cual pueden girar. De este último eje cuelga otro péndulo más pesado, que es el que imponen la oscilación básica, ambos péndulos tienen imanes permanentes, de modo que sus movimientos se acoplan. En la base del sistema hay un pequeño electroimán alimentado por una corriente eléctrica (ver figura).

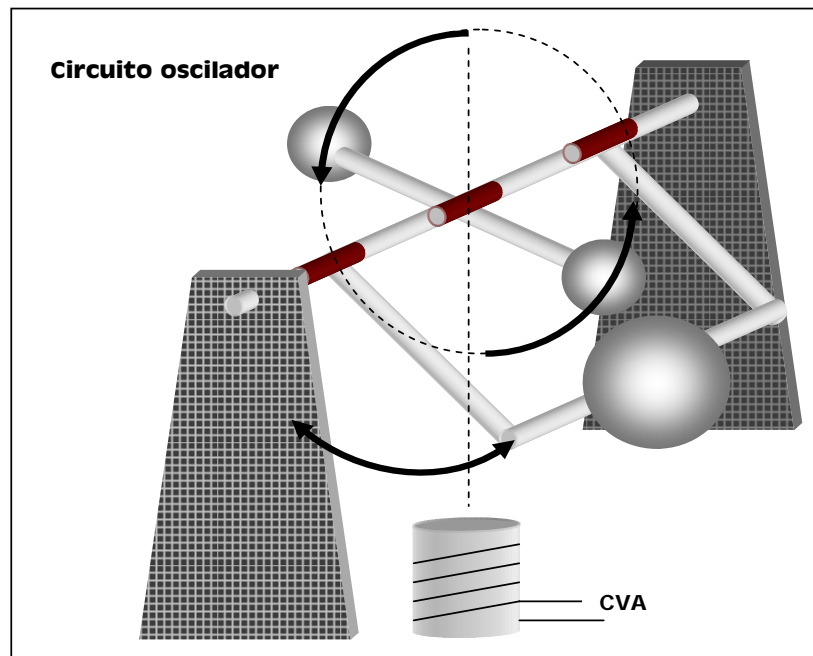


Figura 8. Fuente [Sametband, 1999]

Cuando se da el primer impulso, el péndulo más pesado oscila con regularidad, hasta que se acerca a una de las esferas, ésta recibe un impulso de atracción y

comienza a oscilar de tal forma que en un momento sus movimientos son de forma rítmica y en otros salta imprevisiblemente a movimientos caóticos [Ibid].

Si se examinan las dos trayectorias vecinas que describe este sistema, se puede ver que se separan rápidamente, a esto se le conoce como **atractor extraño**, cuya característica esencial es la amplificación de estas separaciones, por mínimas que sean. A esta susceptibilidad se le denominada *sensibilidad a las condiciones iniciales*, por lo tanto, después de cierto tiempo el sistema es impredecible.

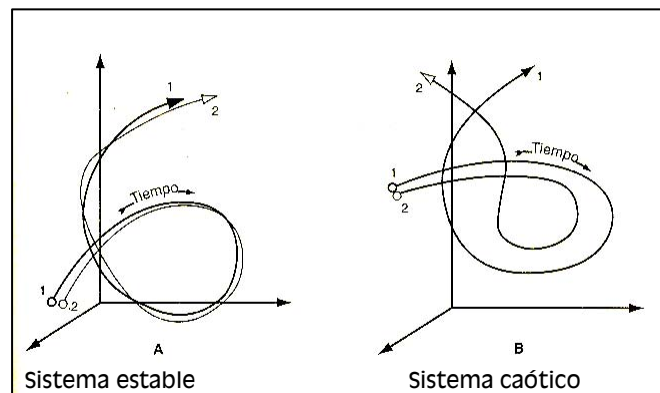


Figura 9. Fuente [Sametband, 1999]

Este tipo de atractor describe un comportamiento aparentemente contrario a la intuición, se distingue por tener conjuntamente dos tendencias opuestas "estiramiento y contracción" (ver figura anterior), es decir, una de las trayectorias converge hacia el atractor y la otra se aleja rápidamente, por lo tanto, este atractor caracteriza el comportamiento caótico. Otra condición esencial, es que las curvas formadas por las trayectorias no se pueden tocar, debido a la condición de determinismo. Si dos trayectorias convergen en un punto, quiere decir que tenemos dos soluciones distintas de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema, por lo tanto, resulta difícil de visualizar en el espacio de las fases¹, las curvas formadas por estas trayectorias.

¹ El espacio de las fases fue concebido por H. Poincaré, este es un espacio matemático abstracto distinto al descubierto por Descartes (coordenadas cartesianas). En este gráfico transforma las coordenadas en formas geométricas, teniendo como principal ventaja el poder describir las características generales del sistema y conocer su comportamiento a través del tiempo por medio de la observación, la descripción de sus ejes son las variables dinámicas del sistemas, es decir, son aquellas magnitudes que van cambiando con el tiempo (tomando el ejemplo del péndulo, son la velocidad y el ángulo respecto de la vertical).

La representación del comportamiento del sistema es por medio de trayectorias, que son curvas descritas por una sucesión de puntos, que pueden dibujar superficies o volúmenes, teniendo como restricción que ninguna trayectoria puede tocar a la otra, esto es porque si dos trayectorias convergen en un punto quiere decir que tenemos dos soluciones distintas de las ecuaciones

La razón de esta imposibilidad, es porque estas trayectorias ocupan un espacio mayor de 2 dimensiones (superficie) debido a su divergencia, pero además hay que considerar las condiciones del sistema dinámico (velocidad, posición y ángulo del péndulo) que corresponden a tres dimensiones, por lo tanto, debemos imaginar una figura geométrica con dimensión mayor a 2 pero menor a 3, que obviamente no es ni una superficie ni un volumen [Ibid].

Este tipo de formas irregulares y fragmentadas, son figuras geométricas que tienen características peculiares, como la autosimilitud y la dimensionalidad fraccional [Mandelbrot, 2003], que en un tiempo fueron concebidas como formas deformes e inaplicables, difíciles de estudiar.

Recientemente se han desarrollado nuevos métodos de análisis para estudiar estas formas irregulares que han sido llamadas "**fractales**"² por el matemático Benoît Mandelbrot, siendo el principal impulsor del estudio de estas extrañas formas geométricas.

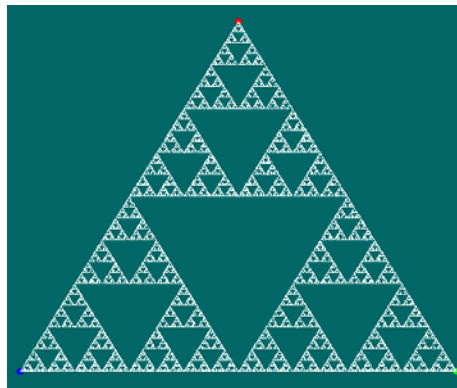


Figura 10. **Atractor de Sierpinski.** Fuente [Mandelbrot, 1997]

Se puede concluir que *el atractor extraño es un fractal* debido a que su dimensión es fraccional, cuya característica esencial es la amplificación de la

diferenciales que describen el sistema, o sea, dos comportamientos distintos al mismo tiempo, esto es contrario al carácter determinista.

De tal modo que un sistema dinámico con n variables independientes (llamados grados de libertad) se pueden representar en el espacio de las fases de n dimensiones, es decir, las dimensiones dependen de la cantidad de variables independientes del sistema, concepto definido por el matemático alemán Félix Hausdorff (1919) [Sametband, 1999].

² Si se analiza a detalle un brócoli, luego una rama, se puede ver que salen muchas ramitas semejantes, y así sucesivamente se va repitiendo el patrón a diferentes escalas. La amplificación de una parte del original es muy similar al original mismo, por lo tanto, un **fractal** es una forma geométrica que se repite a sí mismo en cualquier escala a la que se observe (concepto de autosimilitud).

divergencia entre trayectorias, en este proceso de contracción y estiramiento la distancia entre puntos aumenta, pudiéndose medir esta separación por medio del **exponente de Lyapunov** [Sametband, 1999]

3.3 El exponente de Lyapunov

El matemático, mecánico y físico **Lyapunov, Aleksandr Mikhailovich** fue quien desarrolló el exponente que lleva su nombre. Nació el 6 junio de 1856 en Yaroslavl, Rusia y murió el 3 de noviembre de 1918 en Odessa, Rusia.

Su interés por los sistemas dinámicos sobre la sensibilidad a las especificaciones de las condiciones iniciales, permite obtener resultados completamente distintos a partir de pequeñas diferencias, llevándolo a desarrollar extensos estudios sobre la estabilidad sistémica desde la perspectiva probabilística. Realizó importantes contribuciones al campo de la solución por aproximaciones sucesivas, a las ecuaciones dinámicas diferenciales no lineales, que han servido como base para el estudio analítico formal de los sistemas caóticos que exhiben un comportamiento fractal.

3.3.1 Definición del exponente de Lyapunov

El **exponente de Lyapunov**³ denotado por λ , mide el comportamiento dinámico irregular de sistemas no lineales, en otras palabras, es el factor promedio en el que un error es amplificado dentro de un sistema. En nuestro caso, puede ser interpretado como el comportamiento de “amplificación” de la demanda en la cadena de suministro [Makui et. al; 2007]. Para entender mejor el concepto, considere que se tienen dos series de tiempo iguales que sólo difieren de sus puntos iniciales, en donde el punto de inicio x_0 de la primera serie se halla muy próximo al primer punto de la segunda serie, el exponente indicará la tasa promedio de dicha diferencia, por lo tanto, el **exponente de Lyapunov** *cuantifica el promedio de crecimiento de pequeños errores infinitesimales en el punto inicial x_0* [Peitgen et. al; 2004].

Actualmente, el exponente de Lyapunov es usado en una muy amplia variedad de estudios [Arnold et. al; 1986], mencionando sólo algunas de sus aplicaciones están:

- ⇒ Ser usado en relación con sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales.

³ Dependiendo del enfoque deseado, puede ser analizado desde la perspectiva de la teoría del caos o de las curvas fractales.

-
- ⇒ Se extiende el concepto para el análisis de sistemas estocásticos no lineales.
 - ⇒ Sistemas dinámicos y bifurcaciones de campos de vectores.
 - ⇒ Determinar la capacidad de atractores desconocidos.

A continuación mostramos un método para calcular el exponente de Lyapunov facilitado por Peitgen et. al. [2004]:

Parte de un sencillo sistema lineal $x \rightarrow cx$ (transformación lineal), donde c es un parámetro >1 , dando un punto inicial x_0 , con un *error inicial* $E_0 = \varepsilon$, esto es, iniciamos con $u_0 = x_0 + E_0$, después de n iteraciones tenemos que $x_n = c^n x_0$, y la desviación es amplificada durante el curso de las iteraciones teniendo que $u_n = c^n(x_0 + E_0)$, entonces el *error en la etapa n* tiene un comportamiento:

$$E_n = u_n - x_n = c^n(x_0 + e) - c^n x_0 = c^n e$$

De esta ecuación despejamos a c^n , la razón obtenida determina numéricamente el proceso de crecimiento del error para el factor c , llamado factor de amplificación del error:

$$\left| \frac{E_n}{E_0} \right| = c^n$$

Para encontrar la fórmula apropiada, aplicamos el logaritmo natural en ambos lados de la ecuación y dividimos entre n :

$$\ln \left| \frac{E_n}{E_0} \right| = n \ln c$$

$$\ln c = \frac{1}{n} \ln \left| \frac{E_n}{E_0} \right|$$

La cantidad del lado derecho nos da el logaritmo de crecimiento del error de la constante c , este número es una constante: $c \approx e^{0.7} \approx 2$ (resultado obtenido por experimentación⁴), esto es independientemente del valor inicial de x_0 . A partir de esta ecuación se deduce un método de aproximación al exponente de Lyapunov. Reescribiendo el factor de amplificación del error de forma general, es decir, intentando calcular por separado el factor de error en cada iteración, tenemos que:

⁴ Ver [Peitgen, 2004] Pág. 473-475

$$\left| \frac{E_n}{E_o} \right| = \left| \frac{E_n}{E_{n-1}} \right| \cdot \left| \frac{E_{n-1}}{E_{n-2}} \right| \cdots \left| \frac{E_1}{E_o} \right|$$

Sin embargo, si intentamos calcular de esta forma el factor de amplificación total del error resultaría un número difícil de representarlo en una computadora ordinaria, para solucionar este problema aplicamos las propiedades de los logaritmos, tenemos ahora:

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \ln \left| \frac{E_n}{E_o} \right| &= \frac{1}{n} \ln \left| \frac{E_n}{E_{n-1}} \cdot \frac{E_{n-1}}{E_{n-2}} \cdots \frac{E_1}{E_o} \right| \\ &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \ln \left| \frac{E_k}{E_{k-1}} \right| \end{aligned}$$

¿Cómo podemos ahora estimar el factor de amplificación del error para cada iteración?, consideremos:

$\left| \frac{E_{k+1}}{E_k} \right|$, esto describe cuán pequeño es el error E_k en x_k , en la k i-ésima iteración

Este error es independiente del tamaño del error E_k , si fijamos arbitrariamente un valor pequeño de ε para un valor inicial E_o y estimamos $\left| E_{k+1}/E_k \right|$:

$$\tilde{E}_{k+1} = f(x_k + \varepsilon) - f(x_k)$$

$$\left| \frac{\tilde{E}_{k+1}}{\varepsilon} \right| = \frac{f(x_k + \varepsilon) - f(x_k)}{\varepsilon}$$

$$\text{entonces: } \frac{1}{n} \ln \left| \frac{E_n}{E_o} \right| \approx \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \ln \left| \frac{\tilde{E}_k}{\varepsilon} \right|$$

Reescribiendo lo anterior para el crecimiento del error en la iteración n :

$$\frac{E_k}{E_{k-1}} = \frac{f(x_{k-1} + E_{k-1}) - f(x_{k-1})}{E_{k-1}}$$

Sabemos que: $\lim_{E_0 \rightarrow 0} \frac{E_k}{E_{k-1}} = f'(x_{k-1})$

Aplicando el logaritmo en ambos lados:

$$\lim_{E_0 \rightarrow 0} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \ln \left| \frac{E_k}{E_{k-1}} \right| = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \ln |f'(x_{k-1})|$$

Donde f es una función polinomial $x_{n+1} = f(x_n)$.

Cuando $n \rightarrow \infty$ obtenemos el **exponente de Lyapunov**:

$$\lambda(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \ln |f'(x_{k-1})|$$

Entre las características generales que tiene el exponente son:

- ❖ Algunos sistemas dinámicos continuos dependientes del tiempo sin un punto fijo tendrán ≥ 1 exponentes cero.
- ❖ La suma de los exponentes debe ser negativa en sistemas dinámicos disipativos⁵, esto es, al menos un exponente de Lyapunov es negativo.
- ❖ Un exponente de Lyapunov positivo refleja una "dirección" de estiramiento y contracción, por lo tanto determina el caos en el sistema.

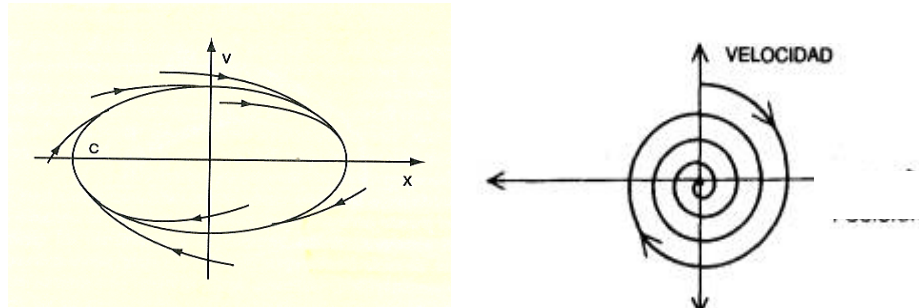
Para conocer si el sistema se encuentra dentro de una región estable o caótica, el exponente de Lyapunov sigue las siguientes reglas de signos:

- $\lambda < 0 \Rightarrow$ el sistema es atraído a un punto fijo o la órbita es periódica y estable, por lo tanto, el sistema es disipativo y exhibe una estabilidad asintótica⁶.

⁵ Un sistema disipativo es aquel en donde hay pérdida de energía.

⁶ La asintota es una curva a la cual se acerca indefinidamente otra, sin llegar jamás a coincidir. Cuando el límite de una función tiende a infinito, está función vale exactamente igual que su asintota.

Esto es, el sistema es irremediamente atraído hacia el atractor, ya sea que converja en un punto o una órbita.



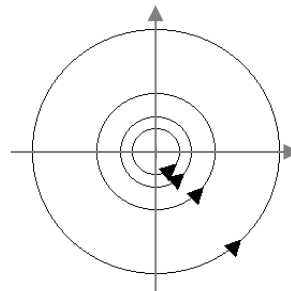
Disipativo
(Atracción a un punto fijo)
 $\lambda < 0$

Disipativo
(Atracción a una órbita)
 $\lambda < 0$

Figura 11. Fuente Carlos H. von der Becke [<http://members.fortunecity.es/rednovohcop/caos.html>] 1991

- $\lambda = 0 \Rightarrow$ El sistema está en un estado estable, entonces, es un sistema conservativo⁷.

Considere nuevamente el ejemplo de un solo péndulo el cual tiene un comportamiento ideal, en donde si le damos un impulso la trayectoria descrita será un círculo concéntrico, y si aumentamos el impulso mayor será la circunferencia, esta trayectoria se repetirá ciclo tras ciclo.

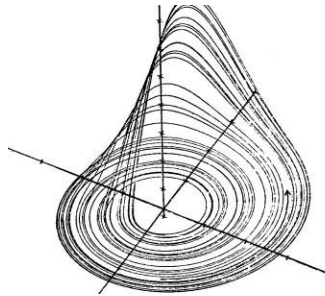


Conservativo
(Punto fijo neutral y órbitas)
 $\lambda = 0$

Figura 12. Fuente [Sametband, 1999]

- $\lambda > 0 \Rightarrow$ El sistema es caótico e inestable. Los puntos cercanos divergen independiente de qué tan cerca estén en un inicio.

⁷ Los sistemas conservativos son aquellos en los que la energía se mantiene constante



Caótico
(Atractor tridimensional caótico)
 $\lambda=0$

Figura 13. Fuente Carlos H. von der Becke [<http://members.fortunecity.es/rednovohcop/caos.html>] 1991

De ahí que el signo del exponente distingue entre las regiones de comportamiento caótico cuando es **positivo** (especialmente cuando la sensibilidad a pequeños valores iniciales es muy grande), y las del comportamiento estable y predecible cuando es **negativo**. Dicho exponente indica la “**dilatación y contracción**” que sufre el espacio, es evidente que debe haber un exponente por cada dimensión.

En conclusión, el exponente de Lyapunov $\lambda(x_0)$ es un poderoso recurso experimental para separar la inestabilidad del comportamiento estable y predecible y para medir estas propiedades. Es importante notar que puede ser generalizado, de tal forma que tiene aplicaciones para muchos interesantes sistemas dinámicos en matemáticas y la ciencia. Éste se ha vuelto una clave para la medición, evolución y detección del comportamiento caótico, lo difícil en la vida real, es que se desconocen aún la mayor parte de los modelos matemáticos que describen algún fenómeno en particular.

El propósito de este trabajo es utilizar esta herramienta para analizar el comportamiento en dos diferentes SC referente al BE.

Capítulo IV. Aplicación del exponente de Lyapunov

4.1 Descripción del modelo de cadena de suministro utilizado

Primeramente debemos considerar un modelo básico de cadena de suministro. Este modelo es explicado según Chen et. al. (2000) de la siguiente forma:

Considere una SC que consta de dos niveles (un solo minorista y un solo productor), en que cada período t , el minorista observa su nivel de inventario y coloca una orden de tamaño q_t al productor, después de haber colocado la orden el minorista observa y satisface la demanda del consumidor D_t para ese período. Las demandas que no son satisfechas se colocan en espera, se considera el lead time fijo entre el tiempo en colocar una orden y cuando esta es recibida por el minorista, tal que una orden colocada al final del periodo t , se recibe al inicio del periodo $t+L$, esto quiere decir que no hay lead time.

Por lo tanto, la demanda del minorista es vista como una variable aleatoria de la forma:

$$D_t = \mu + \rho D_{t-1} + \varepsilon_t$$

Note, que si $\rho=0$, implica que la demanda es i. i. d. con media μ y varianza σ^2

Donde μ es una constante no negativa que expresa la media de la demanda, ρ es un parámetro de correlación con $|\rho| < 1$, y el error ε_t , que es independiente e idénticamente distribuido (i. i. d.) de una distribución normal con media cero y varianza σ^2 . Esta forma de procesar la demanda ha sido asumida por varios autores para analizar el BE como Lee et. al (1997), Kahn et. al. (1987) y Makui et. al. (2007) [Chen, 2000].

Como sabemos, la variabilidad en las órdenes recibidas en cada uno de los elementos en la SC, se va haciendo cada vez mayor, a diferencia de la variabilidad de la demanda original. Con frecuencia, algunos investigadores han sugerido como estrategia para reducir el BE, la centralización de la información de la demanda. Como vimos en el capítulo uno, esta forma de administrar las metas y objetivos de todos los miembros de la cadena, implica el conocimiento pleno de la demanda del consumidor.

La forma matemática que expresa este tipo de política es [Chen, 2000; Ryan, 1997]:

$$\frac{\text{var}(q^k)}{\text{var}(D)} \geq 1 + \left(\frac{2 \sum_{i=1}^k L_i}{p} + \frac{2 \left(\sum_{i=1}^k L_i \right)^2}{p^2} \right) (1 - \rho^p)$$

Donde:

- p es el número de observaciones del pronóstico,
- L es el Lead time,
- q es la orden colocada,
- k corresponde al nivel de la cadena,
- D la demanda del consumidor y
- ρ es el parámetro de correlación.

El parámetro de correlación ρ , puede tener un impacto significativo sobre el incremento en la variabilidad de la demanda. Si $\rho \geq 0$, significa que la demanda esta positivamente correlacionada, si $(1 - \rho^p) < 1$ y ρ mayor, son pequeños los aumentos en la variabilidad, si $\rho=0$, esto es, la demanda es i. i. d., entonces, si hacemos uso de $\rho=0$, por lo tanto, tenemos la siguiente expresión para poder cuantificar el incremento en la variabilidad del minorista hacia el productor:

$$\frac{\text{var}(q^k)}{\text{var}(D)} \geq 1 + \left(\frac{2 \sum_{i=1}^k L_i}{p} + \frac{2 \left(\sum_{i=1}^k L_i \right)^2}{p^2} \right) \dots\dots\dots(1)$$

Ahora bien, para poder hacer uso del exponente de Lyapunov como una medida del BE aplicamos el método propuesto por Makui et. al. (2007), que muestra la relación entre la ecuación (1) para la información centralizada de la demanda y la correspondiente al exponente de Lyapunov (2), de la siguiente manera:

Considerando que en un sistema divergente, la distancia entre cada par de puntos puede incrementarse de forma exponencial de acuerdo a:

$$|x_{n+1} - x_n| = |x_1 - x_0| e^{\lambda n}; \quad \lambda > 0 \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{ó} \quad \lambda(x_o) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \ln |f'(x_{k-1})|$$

Inicialmente, tomamos la ecuación (1) para poder expresarla en la forma de la ecuación (2), por lo que extraemos el último k i-ésimo término de la ecuación (1):

$$\left[\frac{\text{var}(q^k)}{\text{var}(D)} \right] = 1 + \left\{ \left[\left(\frac{2 \sum_{i=1}^{k-1} L_i}{p} \right) \right] + [2L_k/p] + \left[\frac{2 \left(\sum_{i=1}^{k-1} L_i \right)^2}{p^2} \right] + \left[\frac{2(L_k)^2}{p^2} \right] \right\}$$

Juntando los terminos correspondientes a k - 1 definimos una forma general para $\text{var}(q^{k-1})/\text{var}(D)$:

$$\left[\frac{\text{var}(q^k)}{\text{var}(D)} \right] = 1 + \underbrace{\left\{ \left[\left(\frac{2 \sum_{i=1}^{k-1} L_i}{p} \right) \right] + \left[\frac{2 \left(\sum_{i=1}^{k-1} L_i \right)^2}{p^2} \right] \right\}}_{\left[\frac{\text{var}(q^{k-1})}{\text{var}(D)} \right]} + \left\{ [2L_k/p] + \left[\frac{2(L_k)^2}{p^2} \right] \right\}$$

Multiplicando ambos lados de la ecuacion por $\text{var } D$:

$$\left[\frac{\text{var}(q^k)}{\cancel{\text{var}(D)}} \right] (\cancel{\text{var}(D)}) = \left[\frac{\text{var}(q^{k-1})}{\cancel{\text{var}(D)}} \right] (\cancel{\text{var}(D)}) + \left\{ [2L_k/p] + \left[\frac{2(L_k)^2}{p^2} \right] \right\} (\text{var}(D))$$

$$\text{var}(q^k) - \text{var}(q^{k-1}) = \left\{ [2L_k/p] + \left[\frac{2(L_k)^2}{p^2} \right] \right\} \text{var}(D) \dots \dots \dots \text{(A)}$$

Evaluando en un punto fijo, k = 1 :

$$\text{var}(q^1) - \text{var}(q^0) = \left\{ [2L_1/p] + \left[\frac{2(L_1)^2}{p^2} \right] \right\} \text{var}(D) \dots \dots \dots \text{(B)}$$

Dividiendo A entre B tenemos :

$$\frac{\text{var}(q^k) - \text{var}(q^{k-1})}{\text{var}(q^1) - \text{var}(q^0)} = \frac{\left[\cancel{2}L_k/p \right] + \left[\cancel{2}(L_k)^2/p^2 \right] \cancel{\text{var}(D)}}{\left[\cancel{2}L_1/p \right] + \left[\cancel{2}(L_1)^2/p^2 \right] \cancel{\text{var}(D)}} \dots \dots \dots \text{(C)}$$

Comparando la función (C) y (1), obtenemos:

$$e^{\lambda n} = \frac{\left[\frac{(L_k)^2}{p^2} \right] + [L_k/p]}{\left[\frac{(L_1)^2}{p^2} \right] + [L_1/p]}$$

Despejando λ , tenemos la correspondiente expresión del exponente de Lyapunov para la política con información centralizada:

$$\lambda = \left(\frac{1}{k} \right) \ln \frac{\left[\frac{(L_k)^2}{p^2} \right] + [L_k/p]}{\left[\frac{(L_1)^2}{p^2} \right] + [L_1/p]}$$

Para asegurar que sea $\lambda > 0$:

$$\ln \left(\frac{1}{k} \right) \ln \frac{\left[\frac{(L_k)^2}{p^2} \right] + [L_k/p]}{\left[\frac{(L_1)^2}{p^2} \right] + [L_1/p]} > 0(k)$$

$$\ln \frac{\left[\frac{(L_k)^2}{p^2} \right] + [L_k/p]}{\left[\frac{(L_1)^2}{p^2} \right] + [L_1/p]} > e^0$$

$$\frac{\left[\frac{(L_k)^2}{p^2} \right] + [L_k/p]}{\left[\frac{(L_1)^2}{p^2} \right] + [L_1/p]} > 1$$

$$\left(\frac{1}{p^2} \right) \left[\frac{(L_k)^2}{p^2} \right] + \left(\frac{1}{p} \right) [L_k/p] > \left(\frac{1}{p^2} \right) \left[\frac{(L_1)^2}{p^2} \right] + \left(\frac{1}{p} \right) [L_1/p]$$

$$(L_k)^2 + pL_k > (L_1)^2 + pL_1$$

$$1 > \frac{(L_1)^2 + pL_1}{(L_k)^2 + pL_k} \dots \dots \dots (E)$$

Con la ecuación (E) mostramos la condición en la iteración k , λ es positivo.

4.2 Ejemplo de aplicación

Para analizar el impacto que tiene el uso de la política centralizada sobre el BE, volvamos a utilizar el ejemplo del capítulo 2. Para lo cual necesitamos los siguientes datos:

-
- k= 2 Número de niveles en la cadena.
 - L₁=1 Lead time minorista
 - L₂=2 Lead time mayorista
 - L₃=3 Lead time distribuidor
 - L₄=5 Lead time productor
 - p=10 Número de observaciones

Es importante observar que el valor del minorista permanece fijo y sólo van cambiando los correspondientes valores de los demás elementos de la cadena, esto es porque el exponente mide la diferencia entre parámetros, en otras palabras, mide la variabilidad entre un valor inicial y otro, así que, calculando el exponente tenemos los siguientes resultados:

$$\lambda_1 = \left(\frac{1}{k}\right) \ln \frac{\left[\frac{(L_2)^2}{p^2}\right] + [L_2/p]}{\left[\frac{(L_1)^2}{p^2}\right] + [L_1/p]} = \left(\frac{1}{2}\right) \ln \frac{\left\{\left[\frac{2}{10}\right] + \left[\frac{(2)^2}{(10)^2}\right]\right\}}{\left\{\left[\frac{1}{10}\right] + \left[\frac{(1)^2}{(10)^2}\right]\right\}} = 0.3900792788$$

$$\lambda_2 = \left(\frac{1}{k}\right) \ln \frac{\left[\frac{(L_3)^2}{p^2}\right] + [L_3/p]}{\left[\frac{(L_1)^2}{p^2}\right] + [L_1/p]} = \left(\frac{1}{2}\right) \ln \frac{\left\{\left[\frac{3}{10}\right] + \left[\frac{(3)^2}{(10)^2}\right]\right\}}{\left\{\left[\frac{1}{10}\right] + \left[\frac{(1)^2}{(10)^2}\right]\right\}} = 0.6328331867$$

$$\lambda_3 = \left(\frac{1}{k}\right) \ln \frac{\left[\frac{(L_4)^2}{p^2}\right] + [L_4/p]}{\left[\frac{(L_1)^2}{p^2}\right] + [L_1/p]} = \left(\frac{1}{2}\right) \ln \frac{\left\{\left[\frac{5}{10}\right] + \left[\frac{(5)^2}{(10)^2}\right]\right\}}{\left\{\left[\frac{1}{10}\right] + \left[\frac{(1)^2}{(10)^2}\right]\right\}} = 0.9597964204$$

De esta forma obtenemos los correspondientes exponentes para cada nivel, pero para obtener el exponente de toda la cadena, se suman los exponentes particulares, entonces: $\lambda = 1.9827088858 > 0$, (note que debemos considerar el mayor número de decimales posibles, esto es porque el exponente mide *el promedio de crecimiento de pequeños errores infinitesimales en el punto inicial*). De este resultado y de acuerdo a la regla de signo, podemos concluir que la SC se encuentra en la región de **comportamiento caótico**.

A partir de este resultado se puede deducir que la utilización de la política de centralización de la información de la demanda ayuda a reducir los efectos nocivos del BE, pero no elimina por completo el incremento en la variabilidad de la demanda, aunque todos tengan conocimiento de la demanda original, por lo tanto el BE todavía existe. Esto se debe a la interrelación que existe entre todos los factores que intervienen en la administración de la SC, entre los más importante que podemos mencionar están: el método para pronosticar la demanda (aunque en este caso la demanda fue determinista), deficiencias en la producción y la política de inventario empleada, que provocan dicha variabilidad entre la demanda y las órdenes colocadas.

Una SC contiene múltiples factores que tienen relaciones entre sí a través de la línea de abastecimiento, en otras palabras, es una red integrada por varias empresas y cada una de ellas envuelve múltiples niveles, procesos y funciones organizacionales. Además, una SC no es un ente aislado, sino que está relacionada con una o más cadenas, por esta razón es muy difícil llegar a una completa integración, coordinación y sincronización, pero el hacer uso de la política de centralización beneficia para reducir la inestabilidad en la cadena. Por ello, es importante considerar que las acciones tomadas no importando el método, técnica o los proyectos de mejora empleados son sólo para reducir los efectos nocivos del BE no para eliminarlo por completo,

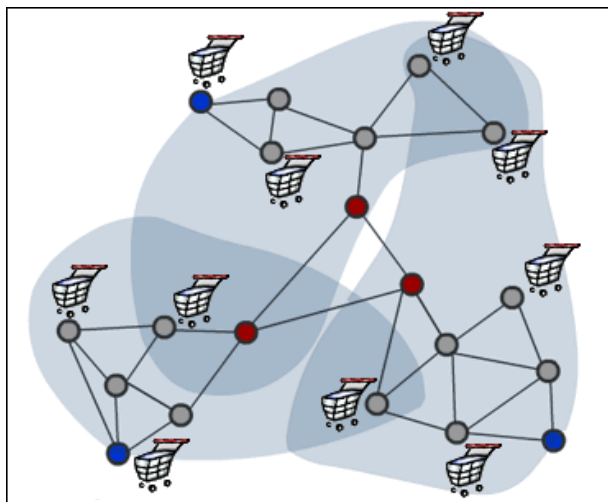


Figura 14. Red de suministro. Fuente www.e-global.es/b2b-blog/wp-images/graficos/r...

4.3 Aplicación a un caso práctico

Se aplicó el análisis del exponente de Lyapunov en un caso práctico para cuantificar si la SC es sensible al BE, esto es, si existe sensibilidad a las condiciones iniciales que corresponden a la demanda original. La identidad de la empresa que nos proporcionó la información real necesaria para realizar el presente trabajo se mantendrá bajo confidencialidad.

4.3.1 Descripción de las operaciones

La empresa en estudio está dedicada a la producción y distribución de refrescos y agua embotellada, cuenta con un centro de planeación que opera bajo la política de información centralizada, nombrado como Departamento de Planeación, este se divide en tres áreas: *Pronósticos*, *Producción* y *Distribución*

Primaria, quienes proveen información a tres plantas: una ubicada en Cuernavaca, Morelos y dos en Toluca, Estado de México. La planta de Cuernavaca a su vez distribuye a 6 centros de distribución denominados Cue 1,..., Cue 6 y las plantas de Toluca distribuyen a 10 centros denominados Tol 1,..., Tol 10. En total, la empresa cuenta con 16 centros que conforman la *primera fase de distribución*, después cada centro de forma individual planea sus rutas de entrega a los diferentes puntos de venta como supermercados y/o tienditas locales, ésta compone la *segunda fase de distribución*. Por último al final de la cadena se encuentra el consumidor.

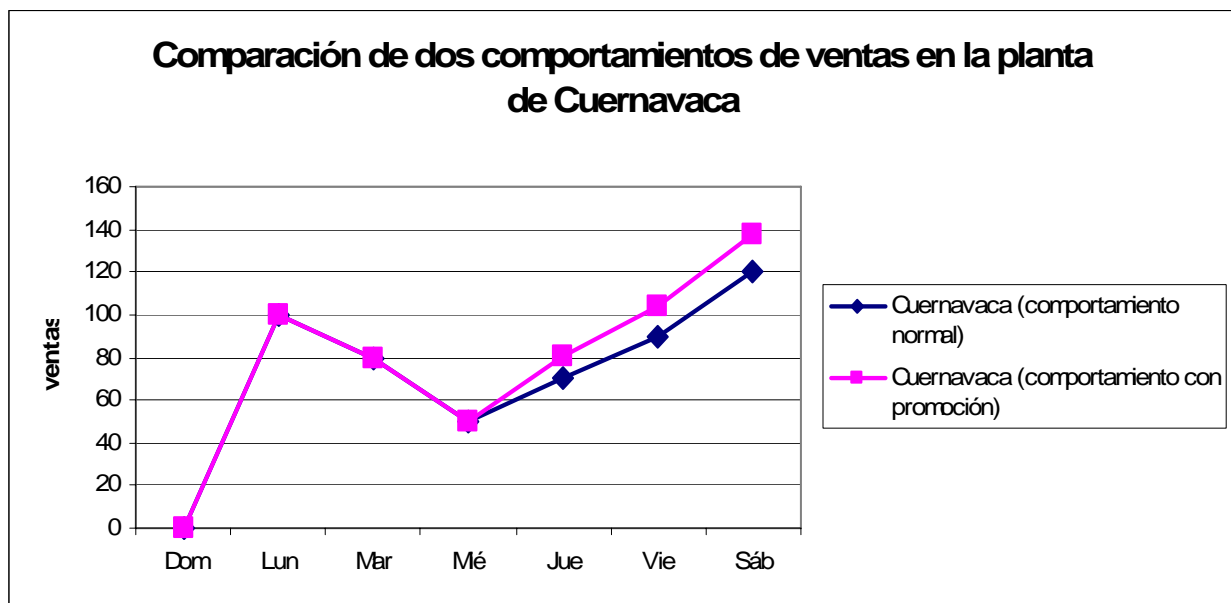
A continuación proporcionamos un ejemplo de la descripción de un producto que elabora la empresa en cada planta:

| Planta | Centro de distribución |
|---|---|
| <p>Cuernavaca <i>Producto:</i> CC de 12oz <i>Descripción:</i> Envase de vidrio de 355ml, retornable, caja con 24 botellas</p> | <p>Cue 1 Cue 2 Cue 3 Cue 4 Cue 5 Cue 6</p> |
| <p>Toluca 1 <i>Producto:</i> CC de 600ml <i>Descripción:</i> Envase de Pet de 600ml, no retornable, caja con 12 botellas</p> | <p>Tol 1 Tol 2 Tol 3 Tol 4 Tol 5</p> |
| <p>Toluca 2 <i>Producto:</i> Agua 1lt <i>Descripción:</i> Envase de Pet de 1lt, no retornable, caja con 16 botellas</p> | <p>Tol 6 Tol 7 Tol 8 Tol 9 Tol 10</p> |

Seguidamente, detallaremos las operaciones que realiza cada área del Departamento de Planeación:

Pronósticos:

Esta área se encarga de calcular la venta semanal / día / SKU¹ / centro de distribución. Realiza primero un *pronóstico estadístico*, utilizando herramientas como: promedio móviles, series de tiempo, intervalos de confianza, etc., dependiendo del producto y centro de distribución del que se trate. Lo edita y consulta con el Departamento de Mercadotecnia para preguntar si va a lanzar alguna promoción, descuento, paquete, etc., si la respuesta es afirmativa, Mercadotecnia le indica el tipo de producto, promoción, lugar y el período que abarcará, con esta información se ajusta el pronóstico basándose en información histórica. Por ejemplo: se tiene el conocimiento del comportamiento normal para un producto *x* en la planta de Cuernavaca para el cual su pronóstico estadístico es de 120 SKU, pero también se sabe por antecedentes, que cuando va a estar en promoción, el volumen de producción se incrementa en un 15% adicional.



Gráfica 5. Elaboración propia

La elaboración de este pronóstico requiere mucho detalle, pues se pronostica para cada producto que es distribuido en cada centro de distribución, por día, para la semana que inicia, más una semana anticipada; en total son 220 productos para 16 centros de distribución dando un total de 3,520 pronósticos que tienen una ventana de tiempo de 2 semanas. Una vez ajustado el pronóstico se envía a Producción para elaborar el programa de producción.

¹ SKU: (Stock Keep Unit) unidad mínima de almacenamiento. En este caso el SKU de la empresa son las cajas completas de refresco.

Producción:

Esta área se encarga de la elaboración del programa de producción global, una vez elaborado es enviado a cada gerente de planta correspondiente. Este programa demanda menor detalle, pues sólo requiere saber el total a producir de cada producto y el inventario en piso existente (producto terminado).

Cada planta cuenta con una línea de producción automática para el llenado, envasado y etiquetado del líquido; que tiene cierta capacidad de producción, por lo que el encargado del programa de producción debe balancear cada línea con la mezcla de productos adecuada para poder cumplir con el programa de producción semanal, indicando dentro del programa en qué turnos y horarios se estará produciendo cierto producto. Adicional a esto, también programa los mantenimientos preventivos y correctivos necesarios, así como el programa de materias primas. Por ejemplo:

| Horario | Dom | Lun | ... |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------|
| 6:30- 14:00 | 3,000 FN12oz | 3,000 CC12oz | ... |
| 14:00- 21:30 | 3,000 ML12oz | 3,000 CC12oz | ... |

Tabla 6. Elaboración propia

Si en el transcurso de la semana existen problemas dentro de cada línea de producción que afecten el cumplimiento del programa, los gerentes responsables de cada planta deben dar aviso inmediato a Producción, para que se realicen los cambios necesarios y se ajuste el programa de producción, de tal forma que al final de la semana se esté cumpliendo sin existir desabasto. Es importante hacer notar que la solución a los problemas que se presenten en la producción es responsabilidad de cada gerente de planta.

Distribución Primaria:

Una vez que el producto terminado se encuentra en piso (almacén de producto terminado), esta área se encarga de la elaboración del programa de envíos. La elaboración de este programa es más complejo porque requiere de la información del pronóstico, del inventario en piso de la planta y de la cantidad de inventario con que cuenta cada centro de distribución. Se elabora diariamente de acuerdo con la información que recibe del área de producción, de cada centro de distribución y en base a la situación actual en que se encuentre el transporte, por ejemplo: si existe transporte disponible, si se a completado el embarque correspondiente o viceversa.

Con el propósito de evitar desabastos, la empresa tiene establecidas políticas que se le conocen como *días pisos*, estas políticas consisten en calcular la cantidad de inventario que se tiene cada día en cada centro de distribución y ver para cuántos días alcanza, con el fin de poder completar la cantidad demandada en cada envío. Estas políticas son:

- ⇒ La suma de lo que se debe enviar es menor al inventario disponible en planta, *se envía la solicitada*.
- ⇒ La suma de lo que se debe enviar es mayor al inventario disponible en planta, *sólo se envía la cantidad almacenada*.

En caso de que no sea posible completar la cantidad demandada, deben hacerse ajustes al programa de envío, de tal forma que en el transcurso de la semana sean enviados los productos faltantes evitando al máximo el desabasto.

Además de esto, se debe calcular la cantidad que se debe enviar en cada trailer y cuántos de estos pues, además de considerar su capacidad propia está no se debe exceder a lo impuesto por la Secretaria de Comunicaciones y Transporte (SCT). Cabe señalar que la programación de los viajes se hace diariamente.

Estas tres operaciones se ejecutan desde el Departamento de Planeación, que es el responsable de planear, administrar, coordinar y controlar la primera fase de distribución, que se compone desde la elaboración del pronóstico, hasta la entrega del producto en los centros de distribución, la siguiente figura lo ilustra:

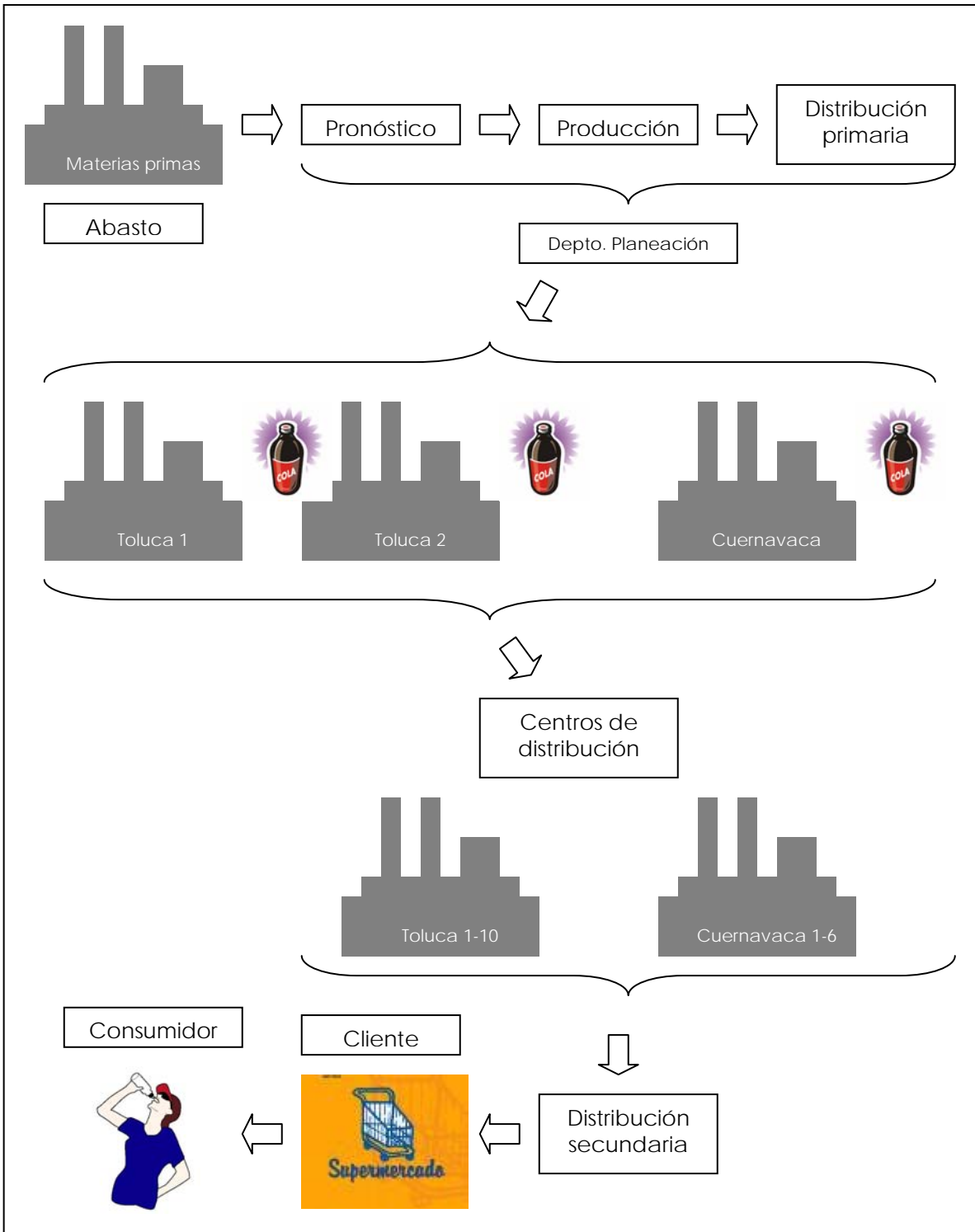


Figura 15. Elaboración propia.

4.3.2 Aplicación del exponente de Lyapunov para cuantificar el efecto látigo

En base a lo anterior, definiremos entonces que la SC con los siguientes elementos, cada uno con sus respectivo lead time:

| | Tiempo |
|---------------------------------|-------------------------------|
| Cliente (L_1) | Semanal= 7 días |
| Pronósticos (L_2) | Semanal= 5 días |
| Producción (L_3) | Semanal= 6 días |
| Distribución primaria (L_4) | Diario= 6 días |
| Centros de distribución | *** |
| Numero de niveles (k) | 2 |
| Período pronosticado (p) | 6 meses= 22 semanas= 132 días |

Los datos usados para el pronóstico se obtienen de las *ventas* que realiza cada uno de los centros de distribución (Cue 1,... Cue 6, Tol 1,..., Tol 10) a los supermercados (tales como WalMart, Comercial Mexicana, Gigante, etc.) de las dos regiones (Cuernavaca y Toluca). Este es un punto importante que hay que aclarar, porque como se expuso en la teoría, es mejor usar datos de *demanda* y no de venta porque estos últimos no están reflejando el verdadero consumo, pero en este caso en particular es debido al uso de su unidad mínima, para medir el producto terminado, que son SKU's; además, el interés de la empresa está sobre la venta de las cajas completas y no del producto individual.

Aclarado este punto, procedemos a calcular el correspondiente exponente de Lyapunov, de la misma forma que se hizo con el ejemplo numérico dado en apartados anteriores, obteniéndose los siguientes resultados:

Primer nivel: Cliente-Pronóstico

$$\lambda_1 = \left(\frac{1}{k}\right) \ln \frac{\left[\frac{(L_2)^2}{p^2}\right] + [L_2/p]}{\left[\frac{(L_1)^2}{p^2}\right] + [L_1/p]} = \left(\frac{1}{2}\right) \ln \frac{\left\{[5/132] + \left[\frac{(5)^2}{(132)^2}\right]\right\}}{\left\{[7/132] + \left[\frac{(7)^2}{(132)^2}\right]\right\}} = -0.1754826220$$

Segundo nivel: Cliente-Producción

$$\lambda_2 = \left(\frac{1}{k}\right) \ln \frac{\left[\frac{(L_3)^2}{p^2}\right] + [L_3/p]}{\left[\frac{(L_1)^2}{p^2}\right] + [L_1/p]} = \left(\frac{1}{2}\right) \ln \frac{\left\{[6/132] + \left[\frac{(6)^2}{(132)^2}\right]\right\}}{\left\{[7/132] + \left[\frac{(7)^2}{(132)^2}\right]\right\}} = -0.0806854639$$

Tercer nivel: Cliente-Distribución primaria

$$\lambda_3 = \left(\frac{1}{k}\right) \ln \frac{\left[\frac{(L_4)^2}{p^2}\right] + [L_4/p]}{\left[\frac{(L_1)^2}{p^2}\right] + [L_1/p]} = \left(\frac{1}{2}\right) \ln \frac{\left\{\left[\frac{6}{132}\right] + \left[\frac{(6)^2}{(132)^2}\right]\right\}}{\left\{\left[\frac{7}{132}\right] + \left[\frac{(7)^2}{(132)^2}\right]\right\}} = -0.0806854639$$

Análisis de resultados

Entonces, su correspondiente exponente de Lyapunov es: $\lambda = -0.3368535498 < 0$, por lo tanto se encuentra en una **región periódica y estable**. Esto quiere decir, que el sistema es irremediamente atraído hacia el atractor.

Explícitamente, cuando ocurre algún problema que interrumpe el flujo del envío del producto como la falta de materia prima, paro de máquina, descompostura de algún vehículo, etc.; principalmente en los eslabones correspondientes a las plantas, estos son reportados inmediatamente al Departamento de Planeación para tomar acciones correctivas (por ejemplo, trabajar horas extras, hacer uso de proveedores secundarios).

Estas acciones están en caminadas a cumplir con lo programado (no para ajustar el programa a las circunstancias), pues la eficiencia del sistema se mide por medio de metas cumplidas entonces, estas desviaciones o problemas se pueden asemejar a un péndulo estable que repone la energía que va perdiendo por medio de su fuente, para compensar estas deficiencias y mantener al sistema dentro de una trayectoria estable.

Consecuentemente, se puede considerar a la estrategia de política centralizada como la fuente que mantiene la estabilidad del sistema. Como se ha sustentado en esta tesis, el procurar un adecuado flujo de información entre las partes componentes de la SC, garantiza a su vez un adecuado flujo de materiales, pues al monitorear continuamente el estado en el que se encuentra la producción y los inventarios es más fácil encontrar una solución a los problemas cuando estos se presentan, en lugar de tener revisiones periódicas, en donde muchas veces no es mostrada toda la información debido al poco tiempo con que se cuenta, y aspectos que en su momento no parecen ser importantes, al pasar el tiempo se convierten en un grave problema, que involucra a otras áreas.

El BE se hace presente en este tipo de situaciones aunque se utilicen los mejores métodos para pronosticar la demanda, si el sistema no controla su fuente de información, puede que el pronóstico tenga serios errores y refleje una falsa realidad, conllevando entonces a ordenar en cada período, un poco más de lo

necesario (materias primas y/o producto terminado), optando por consolidar las órdenes con el propósito de reducir gastos por ordenar y enviar.

Recordemos que estas fluctuaciones o variabilidad son las causas que desestabilizan al sistema y originan el fenómeno del BE.

Conclusiones

Actualmente las empresas se encuentran inmersas en una complejidad, en donde la incertidumbre y la impredecibilidad no solo las afecta independientemente sino también a la SC a la que pertenece, debido a que el mercado va cambiando, dando como resultado estructuras y procesos más diversos, tales como el abasto y distribución global e innovaciones tecnológicas, conformando de esta forma un ente económicamente dinámico, por esta razón concluimos que la SC puede ser considerada como un **sistema complejo**.

De los resultados obtenidos en ambos casos estudiados determinamos que la variabilidad en la demanda que es el llamado BE, imposibilita el flujo de materiales desde el proveedor hasta el consumidor, afectando la planeación y control de los procesos e inventarios, trayendo como consecuencias graves períodos de desabasto y en otros exceso de material, interrumpiendo además el canal de comunicación entre cada miembro de la cadena dificultando la búsqueda de una solución efectiva.

Se utilizó el exponente de Lyapunov con el propósito de cuantificar la sensibilidad a la que está expuesta la SC real que analizamos, del cual concluimos que puede ser utilizado como un indicador para mostrar el estado actual en que se encuentra, por lo que en un monitoreo continuo puede detectarse si el sistema se está saliendo de control, ya que el exponente es sensible al cambio en los lead times, principalmente el que correspondiente al primer nivel (cliente).

Cabe señalar que el exponente de Lyapunov sólo puede ser usado en cadenas de suministro que utilicen una política de centralización de la información.

Se visualizó la importancia que se tiene al hacer uso de la política de centralización de la información para lograr la integración y la coordinación de la SC, mediante la concentración y control del flujo de información. Esta forma de operar tiene un impacto directo principalmente en las actividades de programación de la producción y control de inventarios.

Por último se puede concluir que el SCM tiene como objetivo el *controlar* el BE, haciendo uso de las nuevas tecnologías de información, comunicación y transporte, que permiten el desarrollo de métodos y herramientas más eficientes para sincronizar la demanda y coordinar las actividades entre proveedores, productores y distribuidores, resaltando como factor crítico el flujo de información que debe mantenerse sin interrupciones a lo largo de la SC, ya que los sistemas de información juegan un papel trascendental en la toma de decisiones y en el manejo eficiente de los datos.

Debido a los anterior el desarrollo de nuevas tecnologías de información son cada vez más accesibles a las empresas independientemente de su tamaño, entre los que podemos mencionar: los sistemas EDI (Intercambio Electrónico de Datos), RFID (Sistemas de Identificación de Producto por Radio Frecuencia) y la Internet. Otra táctica que han seguido otras empresas, es investigar la conducta del consumidor a través del trato directo con el cliente en el punto de venta, registrando información valiosa y de interés, ya que las computadoras sólo registran lo vendido no lo deseado.

Lo importante es que la empresa se concientice de que forma parte de un sistema, y que debe buscar los mecanismos necesarios para integrarse junto con sus proveedores y clientes para la búsqueda de soluciones conjuntas, para mejorar su desempeño. Por lo tanto, el diagnóstico que precede a la búsqueda de una solución debe ser una tarea interna, pues no hay que olvidar que la integración colaborativa entre cliente-proveedor, es un esquema de ganancias compartidas, enfocada a generar flujos de valor a lo largo de la cadena.

Recomendaciones

A continuación damos algunas recomendaciones que se deberían considerar al momento de elaborar algún proyecto de mejora:

Un sistema de información requiere ser alimentado con datos precisos y sin ambigüedad de cada producto y de cada movimiento que se realice, pues un error muy frecuente es el contactar al cliente para cambiar la orden, cuando no se tiene, afectando así al sistema con información irreal, con el propósito aparente de evitar registrar los niveles de desabasto y fingir un excelente nivel de servicio.

Por otra parte no existe *software* alguno que resuelva todos los problemas, es común creer que teniendo lo más novedoso en sistemas de información, el proceso se controlará, por lo que se invierten grandes sumas en la adquisición de sistemas sofisticados, inadecuados a los requerimientos de los procesos y por lo tanto, se termina por adecuar el sistema al *software*, pues ningún *software* por sí solo pronostica la demanda y controla el inventario

Bibliografía

- [1] Angerhofer Bernhard J. [2000], Department of Information Systems and Computing, "System dynamics modelling in supply chain management: Research review", *Proceeding of the 2000 winter Simulation Conference*, Uxbridge, Middlesex UB8 3PH, UK.
- [2] Blecker Thorsten, Wolfgang Kersten, Christian M. Meyer [2005], "Development of an approach for analyzing supply chain complexity", Mass Customization. Concepts – Tools- Realization. Proceedings of the International Mass Customization Meeting, June 2-3, 2005, Klagenfurt/ Austria, Gito Verlag, Berlin, pp. 47-59.
- [3] Chen Frank, Zvi Drezner, Jeniffer K. Ryan, David Simchi-Levi [2000], "Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: The impact of forecasting, lead time, and information", *Management Science*, Vol. 46, N0.3, pp.436-443, ISSN 0025-1909.
- [4] Cooper Martha C., Douglas M. Lambert, and Janus D. Pagh [1997], "Supply chain management: more than a new name for logistic", *The International Journal of Logistic Management*, Vol. 8 No. 1, pp. 1-14. ISSN: 0957-4093.
- [5] ESADE, Equipo de profesores de [2004], "Guía de la Innovación Producción y Logística", 1ª edición, España, Catalunya Innovación, pp.115. ISBN 84-393-6186-6. Disponible en:
http://www.cidem.com/cidem/binaris/imprologcastella_tcm48-9005.pdf
- [6] Gigola Cristina [2001], "Bullwhip Effect, los efectos de una mala sincronización de la cadena de suministro", *Escuela de Negocios. Año 3, Vol. 5* pp. 1-8, ITAM-DAIIO-2001-4.
- [7] Gigola Cristina [2004], "Supply Chain Management, Mitos y realidades", Departamento de Ingeniería Industrial y de Operaciones. Año 2, Vol. 5 pp. 1-4, ITAM-DAIIO-2004-2.
- [8] Jiménez José Elías Sánchez [2005], "Estado del arte de los modelos matemáticos para la coordinación de inventarios en la cadena de suministro", *Publicación técnica No. 281 SCT, Sanfandía Oro.*, pp.27-29. ISSN 0188-7297.
- [9] Kahn Kenneth B., John T. Mentzer [1996], "Logistics and interdepartmental integration", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 26 No.8, pp. 6-14, MCB University Press, 0960-0035. ISSN: 0960-0035.

- [10] Kim Jeon G, Dean Chatfield, Terry P. Harrison, Jack C. Hayya [2006], "Quantifying the bullwhip effect in a supply chain with stochastic lead time", *European Journal of Operational Research* 173, pp. 617-636. ISSN 0377-2217.
- [11] Lee H. L., V. Padmanabhan, S. Whang [1997], "Information Distortion in a supply chain: the bullwhip effect", *Management Science*, Vol. 43 No. 4, pp. 546-558, Frontier Research in Manufacturing and Logistics. ISSN 0025-1909
- [12] Li Xiuhui, Qinan Wang [2007], "Coordination mechanisms of supply chain systems", *European Journal of Operational Research* 179, pp. 1-16, ELSEVIER.
- [13] Lummus Rhonda R. Robert J. Vokurka [1999], "Defining supply chain management: a historical perspective and practical guidelines", *Industrial Management & Data Systems* 99/1, pp. 11-17. MCB University Press, ISSN 0263-5577.
- [14] Mandelbrot, Benoit [2003], "La geometría fractal de la naturaleza", 2a edición, España, Tusquets Editores, S. A., pp. 22-39.
- [15] Martín-Andino Ramón Benítez [2006], "El efecto látigo (Bullwhip) en las cadenas de suministro y la dependencia de los agentes que las integran", Tesis de doctorado, Universidad Pontificia de Madrid, ETS de Ingeniería (ICAI).
- [16] Makui Ahmad, Alireza Madadi [2007], "The bullwhip effect and Lyapunov exponent", *Applied Mathematics and Computation* 189, pp. 35-40, ELSEVIER.
- [17] Mentzer John T, William DeWitt, James S. Keebler, Soonhong Min, Nancy W. Nix, Carlo D. Smith, and Zach G. Zacharia [2001], "Defining supply chain management", *Journal of Business Logistic*, Vol. 22 No. 2, pp. 1-25.
- [18] Miao Lixin, Xiongbo Guo, Zhiwei Miao [2003], "The bullwhip effect in the supply chain and corresponding solution", *IEEE*, Vol. 2, Tsinghua University, Beijing China, pp. 1054-1059. ISBN: 0-7803-8125-4.
- [19] Monrroy César Olivares [2002], "Curvas fractales", México, Editorial Alfaomega, pp. 333-345.
- [20] Peitgen Heinz-Otto, Hartmut Jürgens, Dietmar Saupe [2004], "Chaos and fractals, new frontiers of science", 2a edición, Unit State, Springer-Verlag, pp. 475-479.
- [21] Samaranayake Premaratne [2005], "A conceptual framework for supply chain management: a structural integration", *Supply Chain*

Management: *An International Journal*, Emerald Group Publishing Limited, Vol. 10, pp.47-59, ISSN 1359-8546.

[22] Sametband Moisés José [1999], "Entre el orden y el caos, la complejidad", 2ª edición, México, Fondo de cultura Económica, pp. 7-69.

[23] Warburton Roger D. H. [2004], "An analytical investigation of the bullwhip effect", *Production and Operations Management*, Vol. 13, No. 2, pp. 150-160, ISSN 1059-1478.

[24] Multimedia on the Internet: Aleksandr Mikhailovich Lyapunov
http://www.thebestlinks.com/Aleksandr_Lyapunov.html

[25] Multimedia on the Internet:
<http://members.fortunecity.es/rednovohcop/caos.html> Holding -
Pequeñas y Medianas Empresas - Año 1, N° 2- 1991