

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
(UNIDAD ZACATENCO)
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INGENIERÍA

MODELO DE INVENTARIOS PARA EL SERVICIO POST-VENTA DE REFACCIONES A UNA RED DE TELECOMUNICACIONES

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERIA DE
SISTEMAS PRESENTA:**

M. en C. MAURICIO FLORES CADENA

ASESOR

Dr. OSWALDO MORALES MATAMOROS



México D.F., Septiembre 2011



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 12:00 horas del día 16 del mes de FEBRERO del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. – ZAC. para examinar la tesis titulada:

"MODELO DE INVENTARIOS PARA EL SERVICIO POST- VENTA DE REFACCIONES A UNA RED DE TELECOMUNICACIONES"

Presentada por el alumno:

FLORES	CADENA	MAURICIO
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)
Con registro:		
A	0	8 0 4 1 1

aspirante de:

DOCTORADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis

DR. OSWALDO MORALES MATAMOROS

Presidente

DR. ALEXANDER BALANKIN

Segundo Vocal

DR. RICARDO TEJEIDA PADILLA

Tercer Vocal

DR. JORGE ARMANDO ROJAS RAMÍREZ

Secretario

DR. LUIS MANUEL HERNÁNDEZ SIMÓN

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DR. JAIME ROBLES GARCÍA
I. P. N.
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

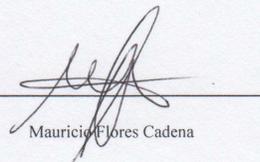


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 13 del mes Septiembre del año 2011, el que suscribe Mauricio Flores Cadena alumno del Programa de Doctorado en Ingeniería de Sistemas con número de registro A080411, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME-Z, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del doctor Oswaldo Morales Matamoras y cede los derechos del trabajo intitulado “Modelo de inventarios para el servicio post-venta de refacciones a una red de telecomunicaciones”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección fmauricio@yahoo.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


Mauricio Flores Cadena

Índice general

Agradecimientos	XI
Simbología	XIII
Acrónimos	XV
Resumen	XVII
Abstract	XIX
Aportaciones	XXI
1 Introducción	1
1.1. Justificación	6
1.2. Objetivo general	7
1.3. Objetivos específicos	7
1.4. Esquema de tesis	8
2 Marco metodológico	9
2.1. La Ciencia de Sistemas	10
2.2. Metodologías y modelos de sistemas complejos	12
2.3. Método de la investigación	13
2.3.1. Modelo de Sistemas Viables	13
2.3.2. Descripción del servicio post-venta de refacciones a través del MSV	16
2.3.3. Descripción concreta del sistema 1 del MVS para la creación del modelo de inventarios	21

3 Marco conceptual	25
3.1. Redes complejas	25
3.1.1. Definiciones básicas	26
3.1.2. Análisis de redes complejas	27
3.2. Cadenas de suministro	30
3.3. Modelos de inventarios	33
3.3.1. Modelos de inventarios de refacciones	35
3.3.2. Política de inventarios ($S-1,S$)	36
3.4. Análisis de la dinámica de inventarios	41
3.4.1. Representación gráfica de la dinámica de inventarios	41
3.4.2. Efecto látigo en cadenas de suministro	44
3.4.3. Análisis fractal	45
3.4.4. Estimación del parámetro de Hurst	47
4 Análisis y caracterización de cadenas de suministro de refacciones	51
4.1. Análisis estadístico de series de tiempo	51
4.2. Análisis fractal de series de tiempo	55
4.3. Análisis de redes complejas en series de tiempo	55
4.4. Conclusiones	56
5 Modelo dinámico de la cadena de suministro de refacciones	59
5.1. Construcción del modelo dinámico	59
5.2. Generación de escenarios de la cadena de suministro	61
5.3. Discusión de resultados	68
Conclusiones	69
Trabajos futuros	71
Referencias bibliográficas	72
A. Gráficas de redes	83
B. Glosario de Términos	93
C. Publicaciones	97
D. Congresos	101

Índice de figuras

1.1.	Desarrollo global de telecomunicaciones	1
1.2.	Desarrollo de las telecomunicaciones en Mexico.	2
1.3.	Cadena de suministro del servicio post-venta de refacciones.	4
1.4.	Cadena de suministro de refacciones simplificada.	5
2.1.	Modelo de sistemas Viables	14
2.2.	Balance servicio-costo y la frontera de eficiencia.	16
2.3.	Servicio post-venta de refacciones-enfoque MSV	17
2.4.	Sistema simplificado del servicio de intercambio de refacción en avanzada	23
3.1.	Emergencia de una red, de acuerdo al mecanismo de añaduría preferencial.	29
3.2.	Diagrama ejemplo del modelo de duplicación parcial.	29
3.3.	Ejemplo de configuraciones de cadenas de suministro.	31
3.4.	Cadena de suministro del servicio post-venta de refacciones.	32
3.5.	Proceso operativo del servicio de intercambio de refacciones en avanzada.	34
3.6.	Modelo de inventarios (S-1,S).	38
3.7.	Comportamiento de \bar{B} e \bar{I} para diferentes valores de L	40
3.8.	Representación de la demanda de refacciones.	42
3.9.	Representación gráfica de los datos acumulados de la deman- da, recolección de unidades defectuosas y reparación.	43
3.10.	Ejemplo del algoritmo de visibilidad gráfica.	49
4.1.	Series de tiempo de: (a) demanda y (b) de unidades defectu- osas pendientes de recolectar con el cliente.	52
4.2.	Series de tiempo de: (c) unidades enviadas a reparación y (d) unidades que retornan de reparación al FOE.	52
4.3.	Colas de unidades en la cadena de suministro.	53

4.4.	Colas de unidades en la cadena de suministro para diferentes tiempos de entrega.	54
5.1.	Gráfica que compara el nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 0,5$ y $\lambda = 0,5$	62
5.2.	Gráfica que compara el nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 0,5$ y $\lambda = 1$	63
5.3.	Gráfica que compara el nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 0,5$ y $\lambda = 2$	64
5.4.	Gráfica que compara el nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 1$ y $\lambda = 0,5$	65
5.5.	Gráfica que compara el nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 1$ y $\lambda = 1$	66
5.6.	Gráfica que compara el nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 1$ y $\lambda = 2$	67
A.1.	Red correspondiente a la cola del proceso $ED(t)$	83
A.2.	Red correspondiente a la cola del proceso $ER(t)$	84
A.3.	Red correspondiente a la cola del proceso $RI(t)$	85
A.4.	Red correspondiente a la cola cuando $L = 1$	86
A.5.	Red correspondiente a la cola cuando $L = 7$	87
A.6.	Red correspondiente a la cola cuando $L = 14$	88
A.7.	Red correspondiente a la cola cuando $L = 30$	89
A.8.	Red correspondiente a la cola cuando $L = 60$	90
A.9.	Red correspondiente a la cola cuando $L = 90$	91

Índice de tablas

4.1. Estadísticas de las series de tiempo.	53
4.2. Cálculos estadísticos a las series de tiempo de las colas de unidades en la cadena de suministro.	54
4.3. Exponente de Hurst de las colas.	55
4.4. Análisis de redes complejas sobre las series de tiempo de las colas.	56
4.5. Análisis de redes con diferentes tiempos de ciclo.	57
5.1. Comparación del nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 0,5$ y $\lambda = 0,5$	62
5.2. Comparación del nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 0,5$ y $\lambda = 1$	63
5.3. Comparación del nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 0,5$ y $\lambda = 2$	64
5.4. Comparación del nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 1$ y $\lambda = 0,5$	65
5.5. Comparación del nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 1$ y $\lambda = 1$	66
5.6. Comparación del nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 1$ y $\lambda = 2$	67

Agradecimientos

Por el apoyo recibido para la elaboración de este trabajo de investigación, agradezco a mi asesor el Dr. Oswaldo Morales M., así como al Dr. Ricardo Tejeida y el Dr. Isaías Badillo por su colaboración en el desarrollo de los trabajos presentados en congresos y publicaciones. Sin restar importancia, también agradezco a todas aquellas personas de las cuales recibí su ayuda, tiempo y amistad.

Doy mi gratitud al Instituto Politécnico Nacional por brindarme la oportunidad de realizar este doctorado, y al Conacyt por la beca obtenida para el desarrollo del mismo.

Simbología

λ	Demanda o tasa de fallas de refacciones (proceso Poisson)
λ^γ	Tasa de fallas (proceso discreto estable)
γ	Exponente de estabilidad de la variable aleatoria de la demanda
L	Tiempo de reabastecimiento del stock
Q	Tamaño de lote
r	Punto de reorden
s	Nivel de inventario-base
t	Variable del tiempo continuo, $t \geq 0$
$D(t)$	Demanda acumulada hasta el tiempo t (Proceso Poisson)
$D^\gamma(t)$	Demanda acumulada hasta el tiempo t (Proceso discreto estable)
$I(t)$	Inventario disponible
$B(t)$	Pedidos faltantes o backorder
$IN(t)$	Inventario neto = $I(t) - B(t)$
$A(t)$	Indicador de que el inventario quede vacío = $\mathbf{1}\{IN(t) \leq 0\}$
$IO(t)$	Inventario en orden de pedido
$PI(t)$	Posición del inventario = $IN(t) + IO(t)$
\overline{BE}	Tiempo promedio que esperan los clientes en backorder
\overline{IE}	Tiempo promedio que está en inventario una refacción
g	Función de probabilidad de masa Poisson
G	Distribución de probabilidad acumulada de g
G^0	Distribución de probabilidad acumulada complementaria de g
G^1	Función de pérdida de g

$C(t)$	Unidades entregadas al cliente al tiempo t
$ED(t)$	Unidades defectuosas pendientes de recolectar al tiempo t
$RD(t)$	Unidades defectuosas recolectar que llegan a reparar al tiempo t
$ER(t)$	Unidades defectuosas enviadas a reparar al tiempo t
$RR(t)$	Unidades que han llegado a reparar al tiempo t
$UR(t)$	Unidades reparadas enviadas al almacén el tiempo t
$RI(t)$	Unidades reparadas recibidas en el almacén al tiempo t
CD_0	Centro de distribución
CR	Centro de reparación
A_i	Almacén i para $(i = 1, 2, \dots, n)$ de una cadena de suministro
$G = [V, J]$	Gráfica que denota la configuración de la cadena de suministro
V	Conjunto de vértices (eslabones) de la cadena de suministro
J	Conjunto de arcos que unen la cadena de suministro
Γ^+	$\{Sucesores\ de\ i\} = j \in V (i, j) \in J$
Γ^-	$\{Predecesores\ de\ i\} = j \in V (j, i) \in J$
H	Exponente de Hurst
$\rho(h)$	Índice de auto-correlación
\bar{l}	Camino promedio más corto en una red
\bar{C}	Coefficiente promedio de clúster en una red
$Q_{kl}(t)$	Cola de unidades pendientes de procesar en la cadena de suministro
$P(z)$	Función generadora de probabilidad
g_s	Función de probabilidad de masa discreta estable
G_s	Distribución de probabilidad acumulada de g_s
G_s^0	Distribución de probabilidad acumulada complementaria de g_s
G_s^1	Función de pérdida de g_s

Acrónimos

NSC	Nivel de Servicio Contratado
FOE	Fabricante Original de los Equipos
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
COFETEL	Comisión Federal de Telecomunicaciones
ITEL	Indicador de la producción del sector telecomunicaciones
SR	Servicio de reparación
SA	Servicio de intercambio de refacción en avanzada
MSV	Modelo de Sistemas Viables
TGS	Teoría General de Sistemas
PRE	Planeación de Recursos Empresariales
ARC	Administración de las Relaciones con el Cliente
SSD	Sistema de Soporte de Descisiones
ARP	Administración de las Relaciones con los Proveedores
ETA	Tiempo estimado de arribo
FCE	Factores Críticos de Exito
KPI	Son las medidas de desempeño del servicio
CEP	Cantidad Económica de Pedido
METRIC	Acrónimo del inglés: A Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control

Resumen

Modelo de inventario de refacciones para el servicio post-venta a una red de Telecomunicaciones

El servicio post-venta de refacciones en el sector de empresas de telecomunicaciones es una importante fuente de ingresos para los fabricantes originales de equipos (FOE). Un buen funcionamiento del servicio post-venta provee una ventaja competitiva para los FOE en contra de sus competidores, ya sea para la adquisición de nuevos clientes o para retener a los existentes. Sin embargo, el diseñar y administrar del servicio post-venta enfrenta a los FOE a diversos retos.

Como parte del servicio post-venta, en este trabajo de investigación se desarrolla un modelo matemático para calcular el nivel adecuado de inventario de refacciones para eventuales fallas en los equipos. Para ello, (i) se estudia el sistema en cuestión a través de la metodología: Modelo de Sistemas Viables, (ii) se analiza con técnicas de fractales y redes complejas las series de tiempo de la cadena de suministro, y se caracterizan las mismas con una distribución de colas pesadas, (iii) y para construir el modelo de inventarios, se considera a la demanda como una distribución discreta estable. El modelo creado, ofrece una alternativa en la literatura para modelar la demanda como un proceso de colas pesadas en comparación a la utilización del proceso Poisson.

Abstract

Spare part inventory model to support post-sales service in Telecom networks

The after-sales service is an important source of revenue and profit for OEM (Original Equipment Manufacturer) Telecom firms. A good performance of the after-sale service provides a competitive advantage for the OEM firms against their competitors, whether for the acquisition of new customers or retaining existing ones. However, the design and management of the after-sales service face up diverse challenges.

This research work supports the after-sales service by developing a mathematical inventory model that leverage the availability of spares versus the service availability of the telecom network in case of an equipment failure. In so doing, (i) the system is defined through the Viable System Model methodology, (ii) the time series of the supply chain are analyzed by using fractals and complex networks tools and the system is characterized by a heavy tail distribution, (iii) and considering last outcome the demand is modeled in the inventory model by a discrete stable proces. The built model provides an alternative in literature to model demand with a heavy tail distribution versus the used of Poisson process.

Aportaciones

Como resultado de este trabajo de investigación, abajo se indican las aportaciones, tomando en cuenta la literatura consultada en revistas y libros especializados:

- Identificación del efecto látigo en una cadena de suministro de refacciones.
- Utilización del algoritmo de visibilidad gráfica para calcular el exponente de Hurst en las series de tiempo, y para convertir estas a una red.
- Basado en el análisis de la red -creada con el algoritmo de visibilidad gráfica- se mostró matemáticamente como emerge el efecto látigo.
- Se demostró que la demanda de la cadena de suministro se ajusta a una distribución de ley de potencia, cuando en la literatura se considera Poisson o Binomial Negativa.
- Se desarrollo un modelo de inventarios que considera a la demanda con una distribución discreta estable. Similar a este trabajo, pero para una variable aleatoria continua estable, se encontró únicamente el desarrollado por Roundy y Samorodnitsky [1].

1 Introducción

Kuhlman y Alonso [2] mencionan que “Las telecomunicaciones modernas son un catalizador del desarrollo de las naciones: representan un elemento indispensable para el funcionamiento adecuado de las empresas e instituciones y forman parte de la vida cotidiana de una gran parte de los habitantes de este planeta”. Las telecomunicaciones tienen un gran impacto en las relaciones entre las empresas y en la vida cotidiana del individuo. Y todo esto a un ritmo de cambio nunca antes conocido [2].

Un estudio realizado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)¹, indica cómo ha evolucionado el uso de las telecomunicaciones a nivel mundial entre los años 2000 a 2010 (véase figura 1.1).

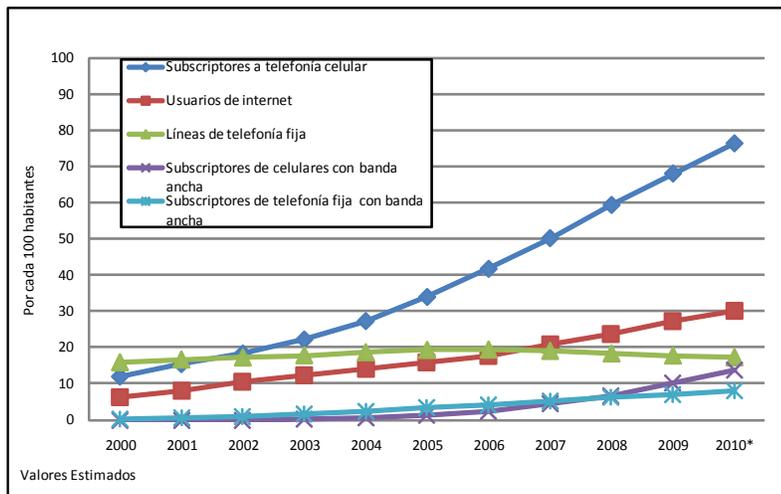


Figura 1.1: Desarrollo de las telecomunicaciones a nivel global.

Fuente: ITU World Telecommunication /ICT Indicators database.

¹ITU en inglés, el cual forma parte de la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

En la figura 1.1 se observa que la telefonía fija se ha mantenido casi estable en todos los años, mientras que los usuarios de telefonía móvil muestran el mayor crecimiento -de 12 habitantes por cada 100 en el año 2000, a un promedio de 76.2 habitantes por cada 100 en el año 2010-. También se puede observar en la figura 1.1 el aumento en el número de subscriptores al internet. Para el caso de México, la figura 1.2 muestra más o menos la misma tendencia que a nivel global.

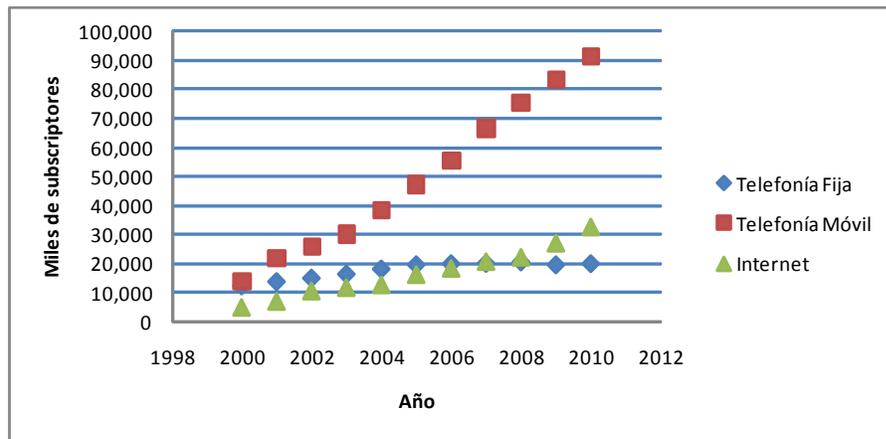


Figura 1.2: Desarrollo de las telecomunicaciones en Mexico.
Fuente: Comisión Federal de Telecomunicaciones (COFETEL).

Luna [3] concluye que la telefonía fija tradicional ha madurado hasta encontrarse ahora saturada, y esta ha sido superada por el surgimiento de otras tecnologías que tienen que ver con el servicio de telefonía móvil, ancho de banda de Internet y voz IP (VoIP²). Una de las diferencias entre ellas es que la telefonía fija esperó un prolongado tiempo antes de entrar a su etapa de saturación, mientras que en las demás tecnologías se preve un periodo corto de saturación por la presión competitiva que ejerce el sector sobre ellas [3].

La oferta de servicios de telecomunicaciones va en paralelo con el desarrollo científico y tecnológico y con el cada día más exigente nivel de servicio solicitado por los clientes. De acuerdo con Kuhlmann y Alonso [2], “la disponibilidad en equipos modernos debe ser del 99.9 %, lo que representa en promedio cerca de 45 minutos fuera de servicio en cada mes de operación”.

²VoIP es el término que se utiliza para administrar la entrega de información de voz sobre el internet.

Para poder mantener la confiabilidad requerida, los operadores de telefonía³ requieren de servicios de mantenimiento total a su red de telecomunicaciones, es decir, mantenimiento en sitio, mantenimiento remoto, actualizaciones de software, refacciones, reparaciones, etc., que garanticen el nivel de confianza en el servicio a sus clientes. Sin embargo, esta no es una tarea sencilla y el riesgo de falla en el equipo siempre está latente. Para ejemplificar el impacto económico y en servicio por causa de una falla crítica en el equipo, a continuación se describe un caso particular con el operador TELCEL.

El día 6 de Febrero del 2007 alrededor de 10 millones de usuarios de la empresa de telefonía móvil TELCEL en México se quedaron sin servicio de llamadas durante casi todo un día. Cálculos de analistas del sector revelaron que las pérdidas directas de la empresa TELCEL podrían sumar más de 90 millones de pesos, afectando a otras empresas de telefonía móvil por casi 38 millones de pesos y a las de telefonía fija por 18 millones de pesos. El origen de la falla fue en una tarjeta de señalización que se localiza en el mecanismo encargado de enrutar las llamadas de una central telefónica [4, 5].

Dada la complejidad de mantener el servicio de telecomunicaciones, el riesgo de que este se corte y los altos costos relacionados con el mantenimiento, ha ocasionado que los operadores de telefonía decidan subcontratar los servicios de mantenimiento de la red de telecomunicaciones directamente con el fabricante original del equipo (FOE), reduciendo sus gastos operativos de entre 10 y 15 % anual [6]. Esto representa una oportunidad de negocio para el FOE, es decir, una fuente importante de ganancias, adquisición y retención de clientes, diferencia competitiva, etc. Sin embargo, el diseño y operación de los recursos para que el FOE ofrezca los servicios de mantenimiento a los operadores de telefonía enfrenta diferentes complejidades⁴.

Dentro de la diversidad de servicios de mantenimiento post-venta que ofrece el FOE, en este trabajo de investigación se estudia únicamente el

³Los operadores de telefonía son aquellas empresas que ofrecen servicios de telecomunicaciones a los usuarios finales, por ejemplo: telefonía fija, telefonía móvil e internet.

⁴Por ejemplo, gran volumen de información y materiales, ciclo de vida de los productos, administración del catálogo de productos, operación de centros de reparación, capacidad límite de los mismos, administración de almacenes y transportistas, disponibilidad de técnicos, centros de atención a clientes, presupuestos de inversión, contratos con clientes con diferentes niveles de servicio, diferentes sistemas de información, volatilidad en la demanda, volatilidad en los tiempos de tránsito y reparación, etc.

servicio de intercambio de refacciones en avanzada, el cual se describe a continuación,

Definición 1.1 (Servicio de intercambio de refacción en avanzada). *El cliente⁵ solicita al FOE una unidad en avanzada (ya sea nueva o reparada con anterioridad), que deberá entregarse en el tiempo contratado (por ejemplo 4 horas, siguiente día hábil, etc.). Una vez que el cliente recibe la unidad, este regresa una unidad defectuosa al FOE, generalmente en los siguientes días posteriores a la recepción. Una vez que el FOE recibe la unidad defectuosa, éste la envía a reparar y cuando esta retorna se integra nuevamente a los almacenes del FOE para atender una futura demanda del cliente. Paralelo a la entrega, y debido al compromiso de entrega por parte del FOE con el cliente, una unidad en condiciones de funcionamiento se reabastece de un centro de distribución al almacén local de donde se entregó al cliente la unidad.*

La figura 1.3 muestra el flujo y los eslabones de la cadena de suministro para ofrecer el servicio de intercambio de refacción en avanzada de la definición 1.1. En esta figura, A_i denota al almacén i , para $i = \{1, 2, 3, \dots, n\}$, CD_0 denota al centro de distribución y CR al centro de reparación.

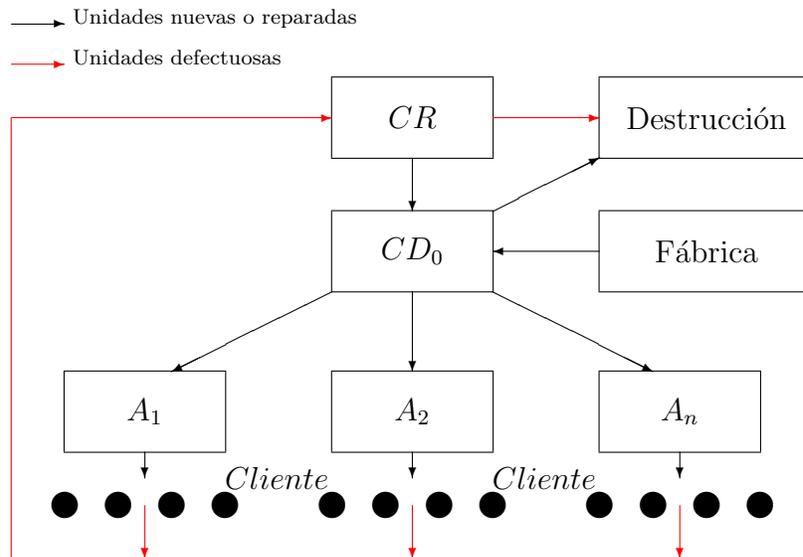


Figura 1.3: Cadena de suministro del servicio post-venta de refacciones.

⁵En lo que resta de la tesis, al operador de telefonía se le nombrará como el cliente.

Nótese que la figura 1.3 incluye también el eslabón de la Fábrica y de la Destrucción. El proceso de comprar material y/o de destruirlo no están incluidos en la definición 1.1, ya que estos son utilizados ocasionalmente y, más bien, lo que prevalece es la reparación de las unidades. Por tal motivo, estos eslabones no son considerados en el estudio de esta tesis. Tampoco se considera la cadena de suministro con un centro de distribución mostrada en la figura 1.3, sino más bien una simplificada que incluye únicamente un almacén, la localidad del cliente y un centro de reparación (véase la figura 1.4), con lo que la definición 1.1 cambia a la siguiente.

Definición 1.2 (Servicio de intercambio de refacción en avanzada -modelo simplificado-). *El cliente solicita al FOE una unidad en avanzada (ya sea nueva o reparada con anterioridad), que deberá entregarse en el tiempo contratado (por ejemplo 4 horas, siguiente día hábil, etc.). Una vez que el cliente recibe la unidad, este regresa una unidad defectuosa al FOE, generalmente en los siguientes días posteriores a la recepción. Una vez que el FOE recibe la unidad defectuosa, éste la envía a reparar y cuando esta retorna se integra nuevamente a los almacenes del FOE para atender una futura demanda del cliente.*

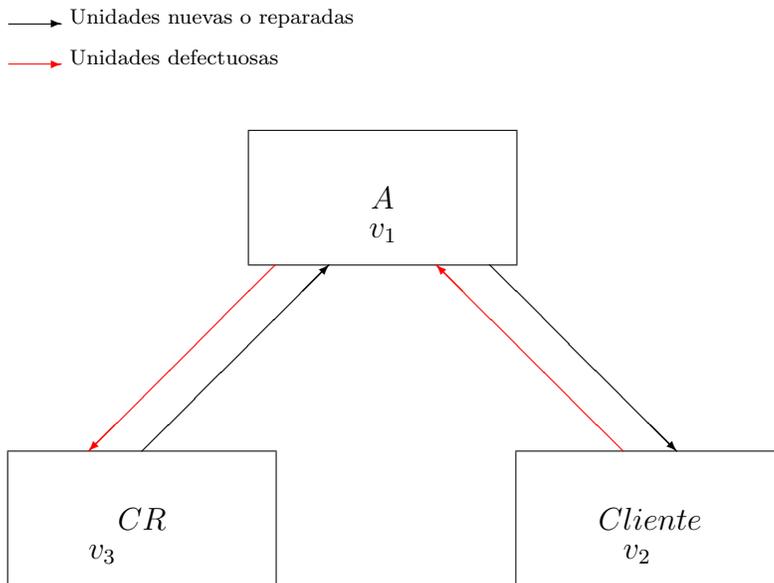


Figura 1.4: Cadena de suministro de refacciones simplificada.

El objetivo principal de este trabajo de investigación es la construcción de un modelo de inventarios que permita cumplir con el nivel de servicio de disponibilidad de inventario requerido para ofrecer el servicio de intercambio de refacciones en avanzada para la definición 1.2.

Con la finalidad de estudiar el sistema en cuestión, la presente tesis considera básicamente dos áreas del conocimiento: 1) un enfoque interdisciplinario y sistémico tomando en cuenta los desarrollos de la Ingeniería de Sistemas, tales como el modelo de sistemas viables⁶, y de sistemas complejos⁷, tales como fractales y redes complejas; y 2) los conocimientos de investigación de operaciones y procesos estocásticos para la creación del modelo de inventarios.

Para crear el modelo, en el Capítulo 2 se indican las metodologías y conceptos de la Ingeniería de Sistemas para describir el sistema en estudio. En el Capítulo 3 se establece el marco teórico correspondiente a fractales y redes complejas para el estudio de la dinámica del sistema; además se define la cadena de suministro de manera precisa y se menciona la literatura existente en teoría de inventarios para refacciones y del efecto látigo⁸. En el Capítulo 4 se caracteriza el sistema en un nivel macro, esto es, estadísticamente, utilizando las herramientas matemáticas de fractales y redes complejas concluyendo que los procesos se comportan, de acuerdo a una ley de potencia; y a nivel micro se muestra cómo emerge la variabilidad en los procesos de la cadena de suministro. Considerando los resultados anteriores, en el Capítulo 5 se construye el modelo matemático que considera a la demanda como un proceso estocástico de colas pesadas.

1.1. Justificación

La justificación de la presente investigación está dada en dos vertientes. Por un lado, en la literatura mostrada en la sección 3.3, los modelos hasta aquí estudiados se enfocan a considerar a la demanda como un proceso Poisson [10, 11] o como una probabilidad Binomial Negativa [12]. En el

⁶Véase [7].

⁷Este enfoque estudia cómo, de la relación no-lineal entre las partes del sistema, emerge un comportamiento colectivo en él, y cómo este sistema interactúa y forma relaciones con su ambiente [8, 9].

⁸El efecto látigo se refiere a la tendencia a incrementar la variación en las órdenes conforme se avanza en cada eslabón de una cadena de suministro; véase la sección 3.4.2.

primer modelo se utiliza sólo un parámetro para caracterizar a la demanda (λ =media). En el segundo caso se ocupan dos parámetros para caracterizar dicha demanda, que son la media y la varianza. Muckstadt [13] considera a la demanda de las refacciones como un proceso Poisson no-estacionario. Sin embargo, en la caracterización del sistema se demostró que este no cumple con lo establecido en la literatura, y que más bien el comportamiento de la demanda de refacciones se ajusta más a una distribución de colas pesadas, lo que justifica la presente tesis. También, se mostró el mecanismo de emergencia del efecto látigo en la cadena de suministro, lo que también es una nueva propuesta en la literatura. Adicional a lo expuesto, los trabajos antes mencionados no consideran las metodologías de la Ciencia de Sistemas. De esta rama del conocimiento, este trabajo considera más el enfoque de sistemas complejos, dada la emergencia del efecto látigo, producto de las relaciones no-lineales entre los procesos que conforman la cadena de suministro.

La otra vertiente por la que se justifica el trabajo está relacionada con la necesidad de tener modelos de inventarios que permitan a los administradores de este, ofrecer un servicio de refacciones en avanzada a través de un modelo que se apegue más al comportamiento real del sistema, dado el alto impacto que se tiene por una falla en el equipo de telecomunicaciones.

1.2. Objetivo general

- Construir un modelo de inventarios que permita cumplir con el nivel servicio de disponibilidad de refacciones para ofrecer el servicio de intercambio en avanzada de las mismas a una red de telecomunicaciones.

1.3. Objetivos específicos

- Seleccionar la metodología de sistemas que soporte la investigación.
- Establecer el marco conceptual que soporte la investigación.
- Establecer el estado del arte de modelos de inventario de refacciones.
- Analizar y caracterizar la dinámica de inventarios en las cadenas de suministro en refacciones para el sector telecomunicaciones.
- Desarrollar un modelo de inventarios para eficientar la cadena de suministro de refacciones en el sector telecomunicaciones.

1.4. Esquema de tesis

La tesis establece en el **Capítulo 2** el marco metodológico que sustenta la investigación; en él se define lo que es un sistema, sus métodos y modelos de sistemas complejos. También se describe el sistema del servicio post-venta de refacciones utilizando el Modelo de Sistemas Viables desarrollado por Beer [7]. El **Capítulo 3** consta de todo el marco teórico que permite analizar los datos y sienta las bases para construir el modelo de inventarios. Este apartado incluye teoría tanto del campo de la investigación de operaciones como el de fractales y redes complejas. En este apartado se incluyen también los trabajos realizados en la literatura de modelos de inventarios y del efecto látigo. El análisis de los datos y su caracterización son mostrados en el **Capítulo 4**, en donde se observa que el comportamiento de los datos no corresponde a los modelos ya existentes y, de alguna manera, justifica el desarrollo de un nuevo modelo. En el **Capítulo 5** se desarrolla el modelo que toma en cuenta el comportamiento no-lineal de la cadena de suministro y su efecto látigo, esto es, que la demanda de refacciones se comporta conforme a una distribución de colas pesadas.

2 Marco metodológico

A lo largo de la historia, la ciencia se ha desarrollado con diferentes paradigmas y métodos¹ para su estudio. Los principales esquemas propuestos del método científico son los siguientes [15]:

1. El *método inductivo-deductivo*, en el cual la ciencia avanza por acumulación de hechos experimentales y extrayendo una teoría de ellos. A este grupo pertenecen Aristóteles y sus comentaristas mediavales, Francis Bacon, Galileo, Newton, Locke, Herschel, Mill, los empiristas, los positivistas lógicos, los operacionistas y los científicos contemporáneos en general. Recientemente los conceptos de probabilidad y estadística apoyan las conclusiones de la inferencia inductiva de manera matemática [16, 17].
2. El *método a priori-deductivo*. Dada una serie de principios generales, de los cuales se deducen instancias particulares, ya sea que estas se puedan demostrar o no objetivamente. Los pensadores que pertenecen a este grupo son: Pitágoras, Platón, Arquímedes, Descartes, Leibniz, Berkeley, Kant, Eddington, los idealistas y la mayor parte de los racionalistas.
3. El *método hipotético-deductivo*. La hipótesis se establece deduciendo sus consecuencias, con respecto al mundo real y procediendo a averiguar si la predicción derivada es correcta o no [18]. Entre sus miembros se

¹La palabra “método” proviene “del latín *methodus*, y este a su vez, del griego *μέθοδος*, palabra compuesta por el prefijo *μετά*, que en nuestro idioma se puede traducirse como “junto a”, “después de”, “entre” o “con”, dependiendo de la palabra que viene a continuación, y de *ὁδός*, “camino”. El significado etimológico de “método” vendría a ser así como “junto al camino”, lo que puede interpretarse como “siguiendo al camino”. El significado, tanto filosófico como convencional de “método”, es el de procedimiento, esto es, la serie y el orden de los pasos que se dan para alcanzar cierto fin...” [14].

encuentran Hume, Whewell, Kant (con reservas), Popper, Medawar, Eccles y algunos científicos y filósofos contemporáneos.

4. *No hay método.* Aquí no se supone la existencia del método científico, dado que nunca se han podido revelar las reglas históricamente y, por otro lado, el crecimiento y progreso actual de las ciencias que determinan que existan varios métodos científicos. Su mayor representante es Feyerabend.

La investigación científica durante el siglo veinte fue reduccionista; esto es, que para poder comprender los fenómenos de la naturaleza, primero se descifraron sus componentes. El supuesto era que una vez que se entendieran sus partes, sería fácil comprender el todo; sin embargo, esto no ayudó siempre a entender el comportamiento del sistema en su totalidad [19, 20]. De alguna manera, esto permitió el surgimiento del enfoque sistémico, el cual sostiene que toda cosa es un sistema o un componente de un sistema. Bunge [21], menciona que este enfoque es parte de la ontología inherente a la cosmovisión científica moderna y, de ese modo, constituye una guía para la teorización, pero no su sustituto prefabricado.

2.1. La Ciencia de Sistemas

De acuerdo con Bunge [21], el enfoque de sistemas es una alternativa tanto respecto al individualismo (atomismo) como al colectivismo (u holismo). Por consiguiente, es también una alternativa tanto al microreduccionismo (todo viene de abajo) como al macroreduccionismo (todo viene de arriba). El individualismo ve al árbol, pero pierde al bosque; en tanto que el holismo ve el bosque, pero pasa por alto los árboles. Sólo el enfoque sistémico facilita la visión tanto de los árboles (y sus componentes) como del bosque (y su entorno más amplio).

La Ciencia de Sistemas está aún en formación. Su desarrollo se distingue a través de las siguientes generaciones [22]: la 1ª se desarrolla entre 1890 hasta 1950 en campos de la ingeniería y la milicia; la 2ª constituye el estudio de la Teoría General de Sistemas (TGS) desarrollada por Bertalanffy [23] en 1950, quien formuló y derivó aquellos principios que eran válidos para los sistemas en general²; la 3ª pertenece al estudio de los sistemas complejos; la

²En Dubrovsky [24] y Checkland [25] se menciona que aún está en disputa el éxito de

4^a corresponde al movimiento de la ciencia de sistemas naturales; y la 5^a se fundamenta en los problemas de los sistemas del sistema³, por ejemplo salud pública, calentamiento global, cancer, pandemias, educación, seguridad, etc. Tanto la 3^a como la 5^a generación son campos muy activos de investigación actualmente.

El enfoque de sistemas del presente trabajo de investigación está relacionado con la 3^a generación, esto es, sistemas complejos, a la cual se le considera como una disciplina científica reciente en el campo de lo transdisciplinario. En años recientes, diferentes teorías, métodos y escuelas han surgido en el estudio de sistemas complejos, para modelar sistemas biológicos, económicos, físicos, sociales, entre otros. Foote [26] menciona que la comunidad científica acuñó el nombre de sistemas complejos para describir fenómenos, estructuras, agregados, organismos o problemas que tienen en común las siguientes características: (i) son inherentemente complicados o intrincados; (ii) raramente son completamente determinísticos, los datos pueden ser medidos sólo en términos probabilísticos; (iii) los sistemas tienen comportamientos emergentes⁴; y (iv) los modelos matemáticos del sistema son usualmente complejos y contienen comportamientos no-lineales o caóticos.

Respecto a la ontología de los sistemas, Dubrovsky [24] menciona que *“los sistemas no son objetos sensibles. Nadie puede ver sus partes, relaciones o unidad, así como nadie puede ver las causas y efectos, o las fuerzas e interacciones, lo único que se puede observar son cosas particulares y eventos”*. De manera similar, Gao et al. [27] y García [28] indican que un sistema complejo usualmente no puede ser estudiado descomponiendo el sistema en subsistemas que lo constituyan, sino que sólo se pueden medir ciertas señales generadas por el sistema y analizarlas para conocer más el comportamiento de dicho sistema.

la TGS. Ya que ha sido claro, que ésta ha fallado en formular dichos principios generales a todos los sistemas.

³En inglés System of systems (SoS).

⁴Bunge [21] define a la emergencia como *“P es una propiedad global [o colectiva o no distributiva] de un sistema de clase K, ninguno de cuyos componentes o precursores posee P”*.

2.2. Metodologías y modelos de sistemas complejos

El estudio y enfoque de los sistemas complejos varía, dependiendo la institución o escuela que los investiga. De acuerdo con Zexian [29], estas escuelas son: (1) escuela de Sistemas Complejos Dinámicos, en donde su fundador es Forrester y más recientemente Sterman [30], ambos del Massachusetts Institute of Technology en los Estados Unidos; otros desarrollos recientes de esta escuela incluye también al New England Institute of Complex System liderada por Bar-Yam [31], esta escuela utiliza métodos matemáticos de dinámica no-lineal y considera a la complejidad y a la emergencia como dos conceptos claves. (2) La escuela de la Auto-organización, la cual es famosa por sus teorías de estructuras disipativas de Prigogine [32] y cinérgica de Haken [33]. (3) La escuela del Caos, la cual utiliza la dinámica del caos para estudiar a los sistemas complejos como un todo y caracterizarlos por medio de sus métodos matemáticos. (4) La escuela de los Sistemas Complejos Adaptables, relacionada principalmente a las investigaciones realizadas en el Instituto Santa Fe, en donde se han utilizado métodos como la simulación basada en multi-agentes, autómatas celulares e inteligencia artificial [34, 35]. (5) La escuela de Evolución de Sistemas Cibernéticos que utiliza conceptos de control multi-nivel para analizar la formación y desarrollo de sistemas complejos; algunos de sus logros representativos son: el programa de investigación de los principios de cibernética, utilizando herramientas como el control jerárquico, selección evolutiva, etc.. (6) El estudio de los sistemas complejos desde la perspectiva de la Administración Organizacional, considerando al sistema complejo como un sistema abierto con funciones de auto-adaptación y auto-ajuste; entre sus mayores representantes están Checkland, Jackson, Stacey y Beer [7]. Y (7) la filosofía de Laszlo y Bunge [21], quienes hicieron una generalización filosófica de la ciencia de la complejidad y aplicaron el pensamiento de los sistemas complejos al estudio de los problemas globales y las ciencias sociales.

Asimismo, (8) Newman, Barabási y Watts [36, 20, 37] han explorado las Redes Complejas como las sociales y las de la Web, encontrando que éstas presentan propiedades ubicuas a todas las redes como los “mundos pequeños”⁵ y las leyes de potencia. Finalmente, (9) el estudio de los Fractales brinda otro

⁵El estudio de este fenómeno en las redes formaliza la noción de que uno está solo a seis contactos (nodos) de cualquier otra persona en este planeta.

enfoque y herramientas matemáticas para el estudio de los sistemas complejos [38]; Balankin [39] menciona que *actualmente el estudio del comportamiento fractal de los sistemas complejos comprende tres enfoques principales: teórico, computacional y experimental. El objetivo es obtener, por una parte, la descripción más simple y parsimoniosa del fenómeno en estudio y, por la otra, la representación más fiel a las características observadas*; este mismo autor indica que la dimensión fractal puede servir como un cuantificador de la complejidad de los sistemas.

2.3. Método de la investigación

Para cumplir con el objetivo general y específicos de esta tesis, el método de investigación considera el enfoque de sistemas complejos. Para describir las interacciones y jerarquías del sistema en estudio, se utilizó el modelo de sistemas viables (MSV) descrito en la sección 2.3.1 y 2.3.2, y en la sección 2.3.3 se muestra de manera simplificada el sistema que contempla el modelo de inventario desarrollado en el Capítulo 5. En el Capítulo 3, referente al marco conceptual, se indica la teoría de modelos de cadena de suministro e inventarios, y por la parte de sistemas complejos la teoría de fractales y redes complejas que permiten caracterizar las series de tiempo en el Capítulo 4. Finalmente, en el Capítulo 5 se desarrolla el modelo matemático de los inventarios, tomando en cuenta la caracterización realizada en el Capítulo 4.

2.3.1. Modelo de Sistemas Viables

Las organizaciones humanas son más complejas de lo que usualmente admitimos. El organigrama no muestra cómo realmente trabaja la organización y, de hecho, los sistemas reales tienen una variedad que es matemáticamente infinita. Considérese el modelo de un sistema en la figura 2.1; la *Operación* es el elemento que realiza las cosas, la *Administración* controla a los que hacen las cosas y el *Ambiente* es el espacio en donde las cosas funcionan. La variedad en el *Ambiente* siempre es mayor que en la *Operación* y la de la *Operación* a la de la *Administración*. Para que la *Operación* pueda acoplarse al *Ambiente*, esta debe de conjuntar la variedad de ambas. Y para que la *Administración* pueda acoplarse a la *Operación*, estas deben de conjuntar su variedad. Para absorber la mayor variedad posible del *Ambiente*, la *Operación* tiene que atenuar la variedad que recibe y amplificar su variedad. De igual manera,

esto debe de suceder entre la *Administración* y la *Operación*. Para esto se debe de tomar en cuenta la Ley de Variedad Requerida de Ashby [40], que estipula que el control puede suceder sólo en el caso en que la variedad de lo controlado sea, al menos, tan grande como la variedad de la situación que se quiere controlar. Si esto se puede mantener, el sistema está en equilibrio y se denomina como sistema auto-organizable. De lo contrario, el sistema está en desequilibrio y eventualmente puede colapsar.

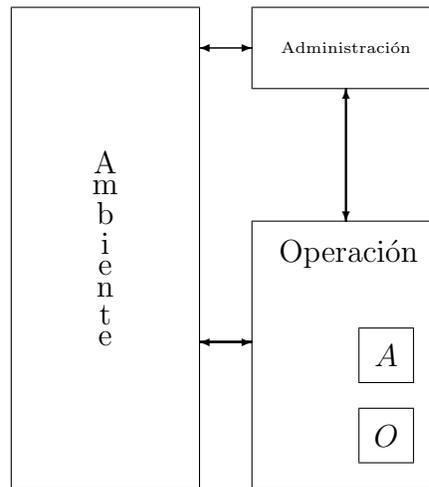


Figura 2.1: Modelo de sistemas Viables.

Fuente: Elaboración propia basada en [41].

Lo que persiste en un sistema auto-organizable es la relación entre sus componentes y no los componentes por sí mismos. Estos sistemas tienen la habilidad de recrearse continuamente, sin dejar de poderse identificar. Esto se debe a que los sistemas tienen un propósito, el cual provee el armazón para mantener la identidad.

El Modelo de Sistemas Viables (MSV), desarrollado por Beer [41], revela cuál es la estructura necesaria de un sistema para que cumpla con el criterio de viabilidad. Este requiere que las organizaciones sean o se vuelvan ultra estables, esto es, que sean capaces de adaptarse apropiadamente al ambiente, o que adapten su ambiente a ellas. El MVS modela la estructura de la organización y el cómo se relaciona entre ella misma; esto incluye procesos, comunicaciones y flujo de información. El modelo se compone de cinco sistemas; en resumen, Kinloch et al. [42] estipula que los sistemas 1-3 se ocupan

del “aquí y ahora” en la operación de la organización. El sistema 4 del “allá y entonces” - responde de manera estratégica a los efectos externos, al ambiente y a la demanda futura de las organizaciones. Finalmente, el sistema 5 se ocupa de buscar un balance entre el “aquí y ahora” y el “allá y entonces” para proveer políticas y directrices que mantengan a la organización como una entidad viable.

Sistema 1 se refiere a la operación fundamental dentro del sistema viable que engloba varias actividades primarias. Cada actividad es en sí misma un MVS.

Sistema 2 consta de un centro regulatorio de cada elemento del Sistema 1 y permite al Sistema 3 monitorear y coordinar las actividades del sistema 1.

Sistema 3 es responsable del controlar al Sistema 1 y proveer la interfase con los Sistemas 4-5.

*Sistema 3** tiene la función de auditar y monitorear la relación entre el Sistema 3 y 1, de tal manera que asegure que la calidad del servicio, los estándares de seguridad, información financiera, control interno, etc. estén en orden.

Sistema 4 tiene el propósito de ir más allá, hacia el ambiente para monitorear cómo la organización necesita adaptarse para mantenerse viable, y para ello requiere la retroalimentación a través del Sistema 3.

Sistema 5 es responsable de las decisiones de política dentro de la organización. Su rol original es el de definir efectivamente la identidad y el ethos de la organización - su personalidad y propósito.

Adicional a estos cinco sistemas, existen algunos principios que hacen al sistema viable.

- La variedad de la Administración, la Operación y el Ambiente se difunden a través de sistemas institucionales que tienden a igualarse; estos deben diseñarse, de tal manera que minimicen el daño en la gente y el costo.
- Los cuatro canales que contienen la información entre la Administración, la Operación y el Ambiente deben tener cada uno la capacidad para transmitir una cantidad dada de información relevante para seleccionar la variedad generada en el subsistema original en un determinado instante de tiempo.

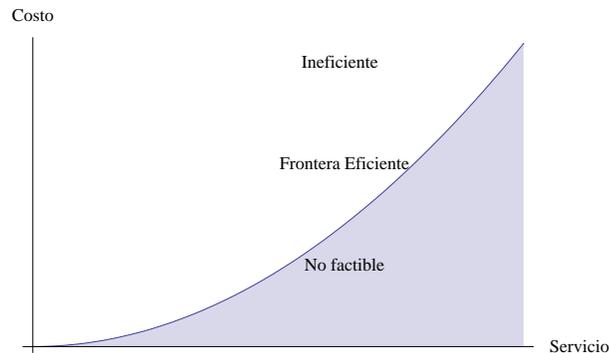


Figura 2.2: Balance servicio-costo y la frontera de eficiencia.
Fuente: [43].

- Cuando la información contenida en un canal, que se distingue de una cierta variedad, cruza la frontera, ésta hace una transducción; la variedad de quien realiza la transducción debe ser, al menos, equivalente a la variedad del canal.
- La operación de los tres principios mencionados debe ser mantenida cíclicamente a través del tiempo sin interrupción o demoras.

2.3.2. Descripción del servicio post-venta de refacciones a través del MSV

Las organizaciones requieren un enlace entre la estrategia y la operación; los FOE compiten en servicios, pero se requiere hacer un balance entre estos y sus costos. Este balance puede ser obtenido a través de una curva llamada frontera de eficiencia, como se observa en la figura 2.2. Esto representa el sistema más eficiente y de menor costo para lograr un cierto nivel de desempeño del sistema. Los puntos por debajo de esta curva no son factibles y por arriba son ineficientes. Considerando este balance y el determinar el sistema, en esta sección se aplica el modelo MSV a una organización que ofrezca el servicio post-venta de refacciones para unir la estrategia con la operación de manera viable.

Sistema 1 - Operación.

La operación del servicio post-venta de refacciones fue brevemente descrito en la Introducción de este trabajo de investigación. Este sistema contiene todas las actividades principales para proveer el servicio de refacciones des-

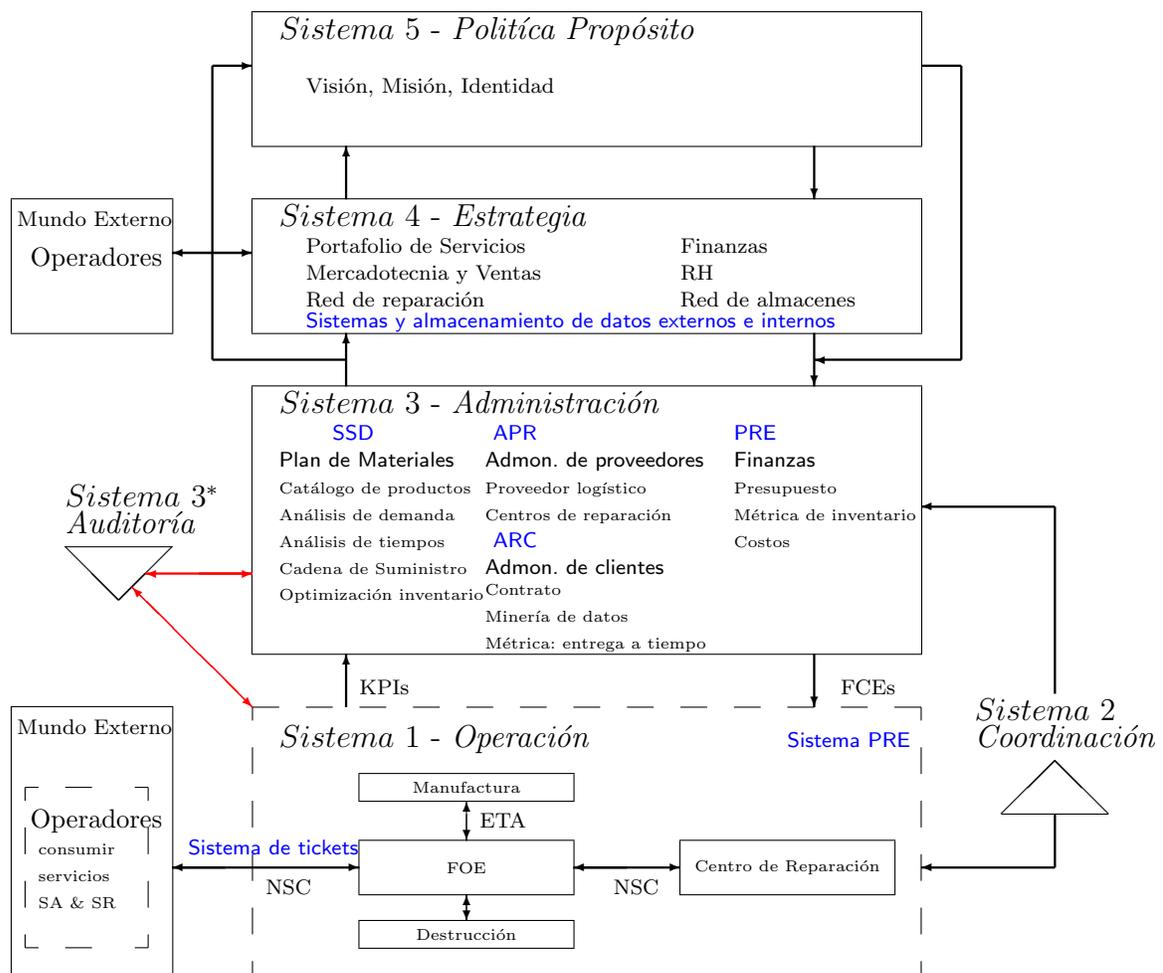


Figura 2.3: Servicio post-venta de refacciones-enfoque MSV.
Fuente: Elaboración propia basada en [41].

crito en la definición 1.1. La figura 2.3 muestra cómo las diferentes entidades del sistema se relacionan unas con otras. El FOE es el centro de operación principal ⁶. La conexión entre la solicitud del servicio y el FOE es a través de un Centro de Atención y un sistema para administrar las solicitudes. Si el servicio es el SA, entonces el cliente especifica el número de parte, la dirección de entrega, el contacto, número telefónico, etc. y el FOE debe de entregar la refacción de acuerdo a un tiempo de entrega contratado [45]. La unidad defectuosa se retorna al FOE en el momento de la entrega de la unidad buena o días después, de acuerdo a un contrato. Una vez que el FOE recibe la unidad que falló, entonces esta es enviada a reparar con un número de solicitud de reparación. Otras actividades que tienen cabida dentro de la Operación son el reabastecimiento y rebalanceo del inventario en los almacenes, así como la compra de refacciones nuevas y la destrucción física de unidades que se tienen como exceso o que ya son irreparables. Todas estas actividades son registradas en un sistema de solicitudes de servicio y de Planeación de Recursos Empresariales (PRE, en inglés ERP), el cual tiene los costos asociados a todas las operaciones o transacciones.

El SR varía del de SA en el orden el el cual fluyen las unidades en la cadena de suministro, pero con los mismos elementos (véase la figura 2.3), y además requiere menor inversión en inventario y el riesgo de no cumplir con el tiempo de entrega contratado es también menor. El proceso comienza con la solicitud de un servicio de reparación al FOE. Posteriormente, este recibe la unidad que falló y la envía a un centro de reparación. Una vez que la unidad es reparada, esta se retorna al FOE en un tiempo contratado. Todas las transacciones son registradas en el sistema PRE.

Para efectos de este trabajo, el Sistema 1 representa el sistema a estudiar. Este es definido de manera muy concreta en la sección 2.3.3. Del análisis del flujo de materiales en la cadena de suministro para ofrecer el servicio post-venta SA del Sistema 1, se crea un modelo (ver Capítulo 5) que apoye la toma de decisiones del Sistema 3.

Sistema 2 - Coordinación.

La cadena de suministro⁷ indicada en el Sistema 1 incluye múltiples niveles y organizaciones. La coordinación del inventario y su flujo en un sistema multinivel representa un gran reto para el FOE. Para poder ser viable y

⁶En la práctica, el almacenaje y el transporte regularmente se subcontratan con un operador logístico, el cual se considera como un socio estratégico [44].

⁷Véase la definición en la sección 3.2.

estar dentro de la frontera de la curva eficiente (véase la figura 2.2), la Operación requiere tener mucha cooperación y balance de los recursos dentro de ella misma. Hopp [43] estipula que, para que se dé esta coordinación, se requieren los siguientes principios: (i) los cuellos de botella en la operación causan congestión, (ii) la variabilidad degrada el desempeño y (iii) el efecto látigo⁸.

La estructura jerárquica de la organización coordina también diferentes tareas individuales en la cadena de suministro. Bar-Yam [8] menciona que ahora “las organizaciones reales no son puramente jerárquicas, sino híbridas entre jerárquicas y redes. Existe mucha conexión y correspondencia lateral entre la gente y deciden qué hacer”⁹. Finalmente, el material que fluye dentro de la cadena de suministro representa también, de alguna manera, el flujo de información y de recursos financieros. Todas las operaciones deben ser no solo registradas, sino coordinadas en el sistema PRE. En el Sistema 3, los datos deberán de convertirse en información.

Sistema 3 - Administración y 3* Auditoría.

El Sistema 3 se ocupa básicamente de las tareas tácticas relacionadas con el servicio post-venta de las refacciones. Su principal preocupación son los clientes, por lo que la revisión de las métricas de desempeño está dentro de las principales tareas a realizar. La medición de refacciones entregadas a tiempo es una métrica típica para evaluar el desempeño del FOE. La información importante para optimizar los recursos del servicio es tener una base de datos de los contratos, en donde viene el alcance y detalle del servicio contratado. Esta información es usada en el proceso de planeación del inventario y en la elaboración de las métricas de desempeño. El análisis de datos es también una tarea muy importante para entender y pronosticar las fallas de los equipos de los clientes. Esta parte del proceso es soportado por un sistema de Administración de las Relaciones con el Cliente (ARC, en inglés Customer Relationship Management (CRM)).

En términos de Planeación, el análisis comprende a: la demanda, el tiempo de retorno, las colas en la cadena de suministro y la optimización del

⁸Véase la definición y este tema en la sección 3.4.2.

⁹Bar-Yam [8] comenta que si un sólo individuo tiene el control de la organización, entonces esta está limitada en su complejidad, respecto a la complejidad total del individuo en cuestión (de alguna manera esto es lo mismo que la ley de Variedad Requerida de Ashby). Dos ideas son ilustradas por Bar-Yam: 1) existe un balance entre la complejidad y la escala y 2) el éxito de la organización depende tanto de la complejidad como de la escala.

inventario. Esto provee las bases para la toma de decisiones aplicables al Sistema 1, como por ejemplo el reabastecimiento y rebalanceo de inventario, establecimiento de las prioridades de reparación y recolección de unidades defectuosas, determinación de exceso y compra de inventario. Estos análisis deben realizarse mediante un Sistema de Soporte de Descisiones (SSD, en inglés Decision Support System (DSS)).

En la Administración de las Relaciones con los Proveedores (ARP, en inglés Supplier Relationship Management (SRM)) el objetivo es alinear los procesos entre el FOE, sus operadores logísticos y los centros de reparación.

La administración financiera revisa métricas como la rotación del inventario, el análisis del valor de inventario, presupuestos para compra de inventario y los costos logísticos y de reparación asociados a los contratos de los clientes.

El Sistema 3 de Auditoría permite que la administración del Sistema 3 esté en contacto directo con las operaciones. Esto provee una retroalimentación que crea un ambiente de mejora continua.

Una vez que el Sistema 3 recibe toda la información y, con base también en las guías establecidas por el Sistema 4, el Sistema 3 establece los factores críticos de éxito (FCE) que aseguran el éxito del servicio.

Sistema 4 - Estrategia.

La función del Sistema 4 está enfocada fuertemente en el futuro y más involucrada en la Administración Estratégica. Es aquí en donde se debe elaborar la gama de servicios a ofrecer y esto debe estar alineado con los recursos estratégicos y de información con la que cuenta el FOE. Por ejemplo, el diseño de la red logística para ofrecer el servicio, la red de centros de reparación, definición del presupuesto, recursos humanos y definición de la organización, investigación de mercados, planeación estratégica, infraestructura de sistemas, entre otros. El Sistema 4 traduce las instrucciones del Sistema 5 del Comité Directivo y también la información del Sistema 3.

Otro rol importante del Sistema 4 es la de estar en contacto con el ambiente en el cual se desenvuelven los FOE. Por lo tanto, el Sistema 4 es el punto en donde la información, tanto interna como externa, se consolida y analiza. El Sistema 4 requiere determinar en qué parte de la curva de la frontera de eficiencia se quiere estar (véase la figura 2.2). Para poder analizar la información tanto interna como externa, el Sistema 4 utiliza diferentes herramientas de SSD y de minería de datos.

Sistema 5 - Política.

El Sistema 5 provee una visión global de todo el sistema y define la

identidad y ethos de la organización. El principal propósito de las políticas es la de proveer claridad de la dirección a la cual va la organización y sus valores; y también la de diseñar, a un nivel muy alto, las condiciones de efectividad de la organización. Una de las principales condiciones de la efectividad de la organización está relacionada en el cómo las funciones de estrategia y administración están organizadas e interconectadas. De acuerdo con Bar-Yam [8], “la regla de oro es que la complejidad de la organización debe tener un buen ensamble con la complejidad del ambiente en todas las escalas para poder aumentar la probabilidad de supervivencia”¹⁰.

2.3.3. Descripción concreta del sistema 1 del MVS para la creación del modelo de inventarios

La finalidad de esta sección es la de delimitar, de manera concreta, el sistema que se estudia en esta investigación, que involucre los elementos necesarios para la creación del modelo matemático en el Capítulo 5. La figura 2.4 muestra dicho sistema simplificado. Para describirlo, se considera que el sistema A puede ser modelado en cualquier instante con la cuaterna [21]:

$$\mu(A) = \langle C(A), E(A), S(A), M(A) \rangle \quad (2.1)$$

en donde A es el sistema del servicio de intercambio de refacciones en avanzada y

- $C(A) = \textit{Composición}$: la cantidad de elementos que constituye a A es muy basta, por ejemplo, personas, dinero, vehículos, instalaciones, etc. Para efectos de modelar el sistema, básicamente sería la colección de todas las tarjetas electrónicas del sistema A ;
- $E(A) = \textit{Entorno}$: el entorno del sistema A interactúa con este en dos sentidos: 1) en el momento en el que falla el equipo del cliente (este puede ser por muchos motivos como obsolescencia y/o degradación del equipo, falta de mantenimiento, capacitación, condiciones ambientales), y comienza el servicio de intercambio de refacciones en avanzada; y 2) así como en la variabilidad que experimentan los tiempos de

¹⁰A pesar de que el Sistema 5 está para ver por la efectividad de la organización en su estrategia y administración, esta regla debe de aplicar y permearse a través de toda la organización.

traslado de las tarjetas electrónicas en la cadena de suministro; tanto las fallas como los tiempos de traslado serán modelados a través de una variable aleatoria.

- $S(A) = Estructura$: la cadena de suministro es la estructura en donde fluyen las tarjetas electrónicas de A , la cual consta de: 1) los almacenes administrados por el FOE; 2) los sitios del cliente en donde está instalados sus equipos de telecomunicaciones; y 3) de los centros de reparación a donde se envían las unidades defectuosas para su reparación.
- $M(A) = Mecanismo$: la colección de procesos de A son los siguientes: 1) originado de una falla en el equipo del cliente, el FOE entrega una tarjeta electrónica en condiciones funcionales al cliente; 2) el cliente retorna una tarjeta defectuosa al FOE como intercambio de la unidad en condiciones funcionales que este último le entregó; 3) el FOE envía la tarjeta electrónica defectuosa a un centro de reparación; y 4) el centro de reparación retorna la unidad que recibió del FOE, en condición de reparada, para que se integre al inventario de unidades en condiciones funcionales del FOE para una futura demanda del cliente.

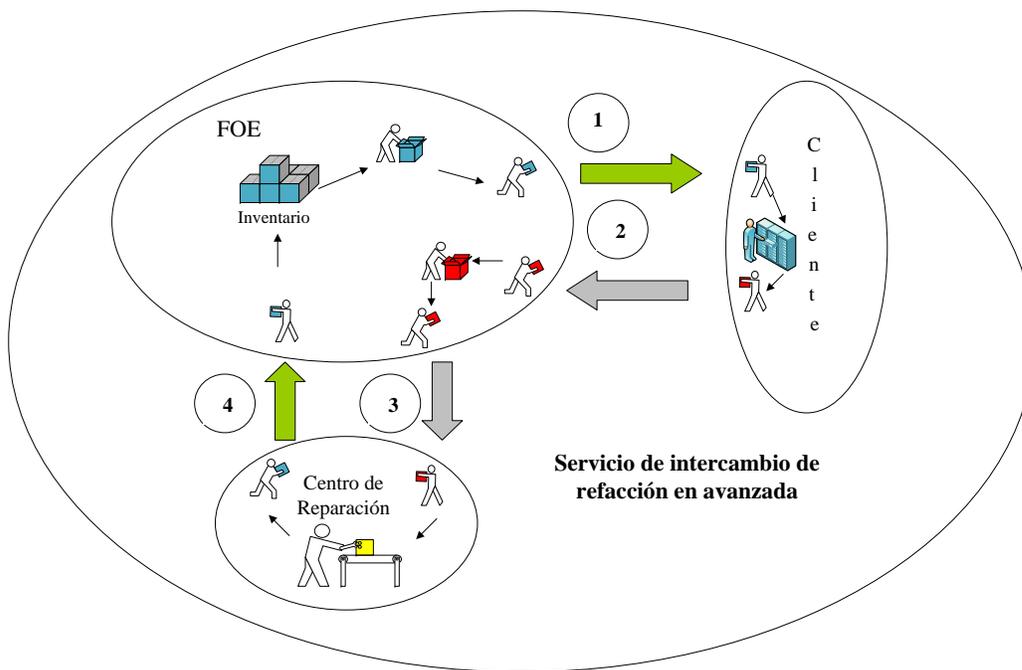


Figura 2.4: Sistema simplificado del servicio de intercambio de refacción en avanzada.

Fuente: Elaboración propia.

3 Marco conceptual

El presente capítulo tiene como finalidad establecer el marco teórico bajo el cual se realiza la presente investigación. Inicialmente se definen algunas métricas y definiciones de las redes complejas en la sección 3.1, las cuales se utilizan para el estudio de la variabilidad de las series de tiempo, así como para definir la cadena de suministro. Posteriormente se establece la cadena de suministro a estudiar en este trabajo de investigación la sección 3.2. En la sección 3.3 se incluyen las ecuaciones y variables del modelo de inventarios Poisson, existente en la literatura, que sirve como base teórica para el desarrollo del modelo matemático en el Capítulo 5. Finalmente, en la sección 3.4 se indica cómo se estudian los datos dinámicos de la cadena de suministro, así como las herramientas matemáticas para calcular el exponente de escalamiento de las series de tiempo de la cadena de suministro en estudio.

3.1. Redes complejas

En términos generales, una red es un sistema que admite una representación matemática abstracta a través de una gráfica, en donde sus nodos (vértices) identifican a los elementos del sistema y el conjunto de conexiones entre los nodos (arcos) representa la presencia de una relación o interacción entre los elementos. De manera rigurosa, las redes se describen a través del lenguaje matemático de la teoría de gráficas [46].

El término de redes complejas es muy reciente, este nace aproximadamente en la década de 1990, cuando investigadores de distintas áreas de la ciencia -científicos en computación, biólogos, sociólogos, físicos y matemáticos- comenzaron a estudiar intensivamente diversas redes reales y sus modelos. La noción de estas redes se refiere a aquellas que tienen una arquitectura más compleja que, digamos, las que se generan de una gráfica aleatoria uniforme con un cierto número de nodos y arcos. Usualmente en la arquitectura

de las redes complejas, los *hubs* - nodos extremadamente conectados- juegan un papel determinante. En este sentido, la gran mayoría de las redes en el mundo real son complejas [47].

3.1.1. Definiciones básicas

Con la finalidad de estudiar las redes complejas, en esta sección se nombran aquellas definiciones de la teoría de gráficas que se utilizan en esta tesis.

Definición 3.1. *Una gráfica indirecta W se define por el conjunto de pares $W = [V, J]$, donde V es el conjunto de vértices y J el conjunto de arcos.*

Un arco puede representarse como la pareja (i, j) , donde $i, j \in V$ son los vértices que unen dicho arco.

Definición 3.2. *Se llama sucesor de i a todo vértice $j \in V$, tal que existe $(i, j) \in J$. Se llama predecesor de i a todo vértice $j \in V$, tal que existe $(j, i) \in J$.*

También se definen las funciones $\Gamma^+, \Gamma^- : X \rightarrow \wp(X)$ (conjunto potencia de X), donde para $i \in V$, $\Gamma^+ = \{\text{sucesores de } i\} = \{j \in V \mid (i, j) \in J\}$ y $\Gamma^- = \{\text{predecesores de } i\} = \{j \in V \mid (j, i) \in J\}$ [46] y [48].

Definición 3.3. *Dos vértices i y j son adyacentes o vecinos si éstos están unidos por un arco.*

Definición 3.4. *El grado del vértice i (denotado como k) se define como el número de arcos incidentes a i .*

Definición 3.5. *El camino del vértice i al j de longitud l en W es la secuencia ordenada de distintos vértices $i = j_0, j_1, \dots, j_l = j$ que satisface $\{j_a, j_{a+1}\} \in E(W)$ para $a = 0, 1, \dots, l - 1$.*

Definición 3.6. *Dados dos vértices $i, j \in V(W)$, la distancia entre i y j , denotada como $d(i, j)$, es la distancia más corta de entre todos los caminos entre i y j .*

3.1.2. Análisis de redes complejas

El estudio de redes muy grandes ha motivado la introducción de nuevas definiciones y del análisis estadístico para su estudio. A pesar de que éstas redes son muy grandes y complejas, estas muestran cierta coherencia. Chung y Lu [49] y Chung [50] indican las siguientes propiedades:

- **Fenómeno del mundo pequeño** - este se refiere al mínimo número de arcos entre los vértices; también conocido en las redes sociales como seis grados de separación [51]. Este fenómeno muestra las dos siguientes características: 1) cualquier par de nodos están conectados en la red por un número corto de arcos y 2) dos nodos que compartan otro nodo vecino en común, es muy probable que también sean vecinos. La primera característica se mide comparando el camino corto promedio \bar{l} de la ecuación 3.1 con uno comparable de una gráfica aleatoria: $\bar{l}/\bar{l}_{GA} \sim 1^1$.

$$\bar{l} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{ij} l_{ij} \quad (3.1)$$

donde l_{ij} denota el camino más corto entre dos nodos i y j . La segunda característica se mide comparando el coeficiente promedio de clúster de la ecuación 3.2 a una de una gráfica aleatoria, de acuerdo con $\bar{C}_{datos} \gg \bar{C}_{GA}$

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_i C(i) \quad (3.2)$$

donde

$$C(i) = \frac{e_i}{k_i(k_i-1)/2} \quad (3.3)$$

y e_i se puede calcular en términos de la matriz adyacente \mathbf{X} para los vértices i, j y l como

$$e_i = \frac{1}{2} \sum_{jl} x_{ij} x_{jl} x_{li} \quad (3.4)$$

¹GA se refiere a gráfica aleatoria.

El hecho de que cualquier par de nodos esté conectado por el camino pequeño más corto y la conuinación de un alta densidad de clústers, constituye lo que comúnmente se llama fenómeno del mundo pequeño [51].

- **Distribución del grado de la red como una ley de potencia** - se refiere a aquellas redes en donde la distribución del grado de los nodos conectados se comporta como una ley de potencia $P(k) \sim k^{-\gamma}$.
- **Grandes** - El tamaño típico de estas redes está en el rango de cientos de miles e inclusive billones de nodos.
- **Dispersa** - Dado el número de nodos N en una gráfica y el máximo número de arcos $\binom{N}{2}$, la densidad de una gráfica es el número de arcos existentes J dividido entre el número máximo posible de arcos (sin permitir arcos que conecten al nodo consigo mismo): $Densidad = J/[N(N - 1)/2]$. Una gráfica es dispersa si $Densidad \ll 1$ [52].

El exponente γ de una gráfica que exhibe una ley de potencia en la distribución de los grados de sus nodos puede tener dos diferentes rangos de valores. Barabási and Albert [53] encontraron que $\gamma = 3$, y que este tipo de redes son consecuencia de dos mecanismos genéricos: i) las redes se expanden continuamente por la adición de nuevos vértices y ii) los nuevos vértices se añaden a la red conectándose preferentemente a aquellos nodos que tienen un grado muy elevado de conecciones con otros nodos. A este mecanismo se le llamó esquema de *añaduría preferencial*, que puede ser descrito como “el rico se hace más rico”, y produce gráficas con ley de potencia con valores de γ desde 2 hasta ∞ [54]. La figura 3.1 muestra un ejemplo del mecanismo de añaduría preferencial en una red.

El rango $1 < \gamma < 2$ se produce a través del *modelo de duplicación parcial* que se basa en la duplicación de la información genética en las redes biológicas. Este modelo se describe a continuación [55].

Sea z_0 una constante y W_{z_0} una gráfica en z_0 vértices. Para $z > z_0$, W_z se construye por la duplicación parcial de W_{z-1} de acuerdo a lo siguiente: un vértice aleatorio, u , de W_{z-1} se selecciona, y un nuevo vértice, v , se añade a W_{z-1} , de tal manera de que para cada vecino x de u , con probabilidad p , un nuevo arco $v - x$ se agrega (véase la figura 3.2).

El exponente γ y la probabilidad p se relacionan de acuerdo a la ecuación 3.5,

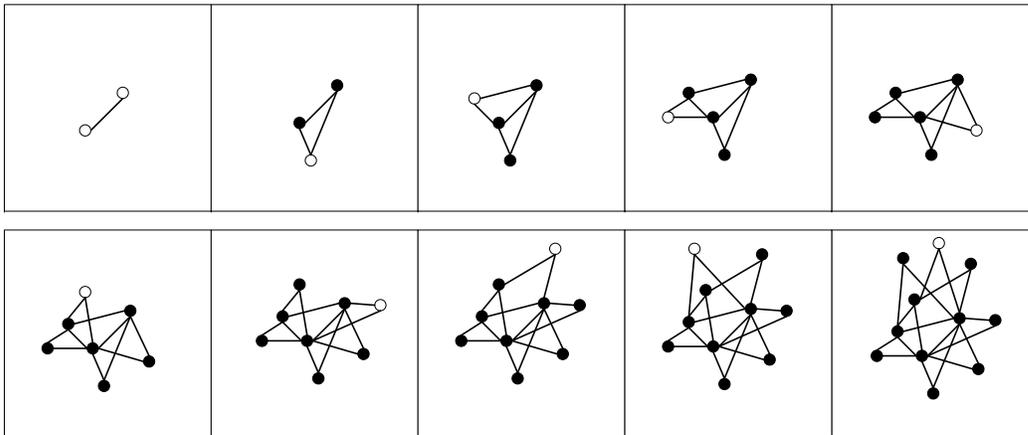


Figura 3.1: Emergencia de una red, de acuerdo al mecanismo de añaduría preferencial.
Fuente: [20].

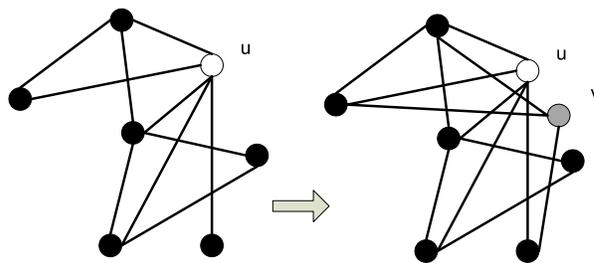


Figura 3.2: Diagrama ejemplo del modelo de duplicación parcial.
Fuente: [55].

$$p(\gamma - 1) = 1 - p^{\gamma-1} \quad (3.5)$$

donde el valor de γ está entre 1 y 2; la probabilidad p está entre $0,5 < p < 0,56714329\dots$, y la ecuación 3.5 se puede aproximar linealmente por,

$$\gamma \approx 9,45 - 14,9p \quad (3.6)$$

3.2. Cadenas de suministro

En la década de 1980 las compañías descubrieron nuevas tecnologías de manufactura y estrategias que les permitieron reducir sus costos y ser más competitivas en el mercado. Estrategias tales como Justo a Tiempo, *kanban*, Manufactura Esbelta y Calidad Total produjeron ahorros considerables a las compañías hasta un cierto límite. Muchas de estas compañías han descubierto recientemente que la administración de las cadenas de suministro es el siguiente paso para incrementar sus ganancias y su cobertura en el mercado [44]. Esta administración busca diseñar y operar la cadena de suministro de tal manera que el costo total se minimice y el nivel de servicio total se mantenga. Recientemente se busca también minimizar el impacto al medio ambiente, así como alinear la propuesta de valor al cliente² con la estrategia operativa y de la cadena de suministro [56]. El diseño de la cadena de suministro debe lograr que el proceso de suministro y el de demanda coincidan lo más posible [57]³. Sin embargo, el diseño y la administración de la cadena de suministro conlleva diversas dificultades con objetivos que están en conflicto, como por ejemplo el costo y el nivel de servicio (véase la figura 2.2), por lo que la solución óptima debe contemplar un enfoque sistémico.

La cadena de suministro se define como *una red de procesos y puntos de almacenamiento orientada a la entrega de bienes y servicios a los clientes* [43]. Los elementos básicos de cualquier red son sus procesos y los puntos de almacenamiento, los cuales varían en tamaño y complejidad, dependiendo de la configuración del sistema. El sistema más simple compuesto de un solo proceso y un solo punto de almacenamiento es una **estación** de trabajo.

²Por ejemplo; innovación, diversidad de productos a elegir, precio y/o experiencia.

³El proceso de suministro incluye la producción, transportación, reparación y/o alguna otra actividad que incremente el inventario, mientras que el proceso de la demanda describe varias actividades que utilizan o subtraen el material del inventario. Cada uno de los dos procesos puede ser tan simple como enormemente complejo.

El siguiente nivel de complejidad es una **línea**, la cual es una secuencia de estaciones usadas para generar un producto o servicio. Finalmente, el nivel más complejo es una **red**, que involucra múltiples líneas produciendo múltiples productos y/o servicios (véase la figura 3.3).

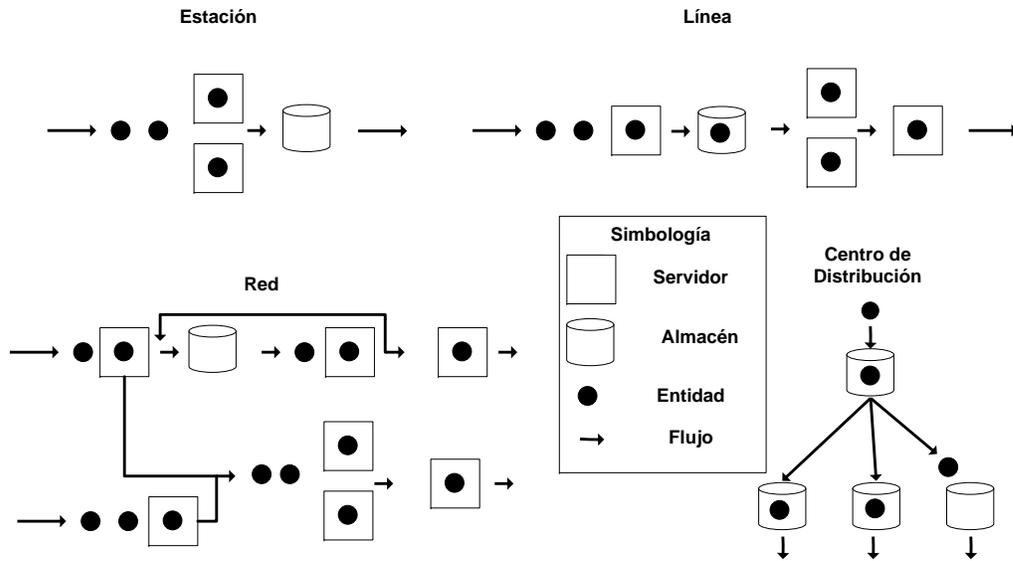


Figura 3.3: Ejemplo de configuraciones de cadenas de suministro.
Fuente: Elaboración propia basada en [43].

Un ejemplo de una configuración típica es aquella conformada por un centro de distribución que suministra material a diferentes almacenes, comúnmente llamada sistema de dos-niveles (véase la figura 3.3). Cuando las unidades que fluyen en la cadena de suministro se pueden reparar, es común tener una configuración con un centro de distribución, almacenes locales y centros de reparación (véase la figura 3.4).

Considerando la base teórica de la sección 3.1.1, la cadena de suministro que soporta el servicio de intercambio en avanzada (véase la definición 1.1) se define a continuación,

Definición 3.7 (Cadena de suministro de unidades reparables de dos niveles). *Una cadena de suministro de dos niveles con resuministro de unidades reparadas y un centro de distribución consiste en una gráfica dirigida $W = [V, J]$, donde los vértices del conjunto V corresponden a los eslabones de la cadena de suministro y los arcos del conjunto J al flujo de materiales dentro de dicha cadena de suministro, de tal manera que los vértices v_{-1} al*

v_{-k} corresponden a los centros de reparación, el v_1 al centro de distribución, del v_2 al v_m a los almacenes locales y del v_{m+1} al v_n a las localidades del cliente. Y $\Gamma^+(1) = \{-1, -2, \dots, -k\}$, $\Gamma^-(1) = \{2, 3, \dots, m\}$, $\Gamma^+(2) = \{m+1\}$, $\Gamma^+(3) = \{m+2, \dots, m+2\}$, ..., $\Gamma^+(m) = \{n\}$ y $\Gamma^-(1) = \{m+1, m+2, \dots, n\}$.

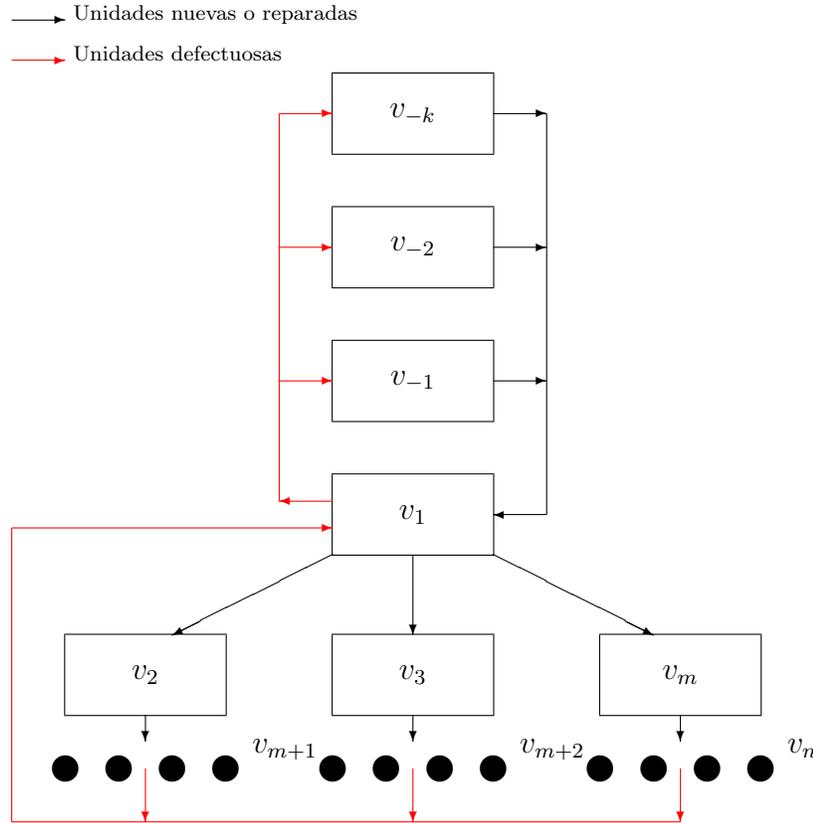


Figura 3.4: Cadena de suministro del servicio post-venta de refacciones.
Fuente: Elaboración propia.

Básicamente esta cadena de suministro está conformada por tres entidades (figura 3.4): el FOE, el cliente y los centros de reparación. El FOE está integrado por el centro de distribución v_1 y los almacenes locales v_i para $i = \{2, 3, \dots, m\}$. El cliente está integrado por sus localidades v_i para $i = \{m+1, m+2, \dots, n\}$. Y los centros de reparación por v_i para $i = \{-1, -2, \dots, -k\}$. En esta investigación doctoral se utiliza una cadena de suministro simplificada para la creación del modelo matemático en el Capítulo 5 (figura 1.4). Esta se define como sigue,

Definición 3.8 (Cadena de suministro de unidades reparables simplificada). *Esta es una gráfica dirigida $W = [V, J]$, donde los vértices del conjunto V corresponden a los eslabones de la cadena de suministro y los arcos del conjunto J al flujo de materiales dentro de dicha cadena de suministro, de tal manera que el vértice v_1 se refiere al almacén del FOE, v_2 al sitio del cliente y v_3 al centro de reparación. Y $\Gamma^+(1) = \{2\}$, $\Gamma^+(2) = \{1\}$, $\Gamma^+(3) = \{1\}$ y $\Gamma^+(1) = \{3\}$ y $\Gamma^+(3) = \{1\}$.*

El proceso que describe el servicio de intercambio de refacciones se define a continuación.

Definición 3.9 (Proceso del servicio de intercambio de refacciones en avanzada). *1) En el tiempo t_1 se registra en v_1 la demanda de una unidad, el proceso estocástico que describe la demanda se denota con $D(t)$; 2) en el tiempo t_2 se entrega en v_2 una unidad en funcionamiento, a este proceso estocástico lo denotamos con $C(t)$; 3) en el tiempo t_3 , se embarca una unidad defectuosa de v_2 , al proceso estocástico que describe este comportamiento lo denotamos con $ED(t)$; 4) en el tiempo t_4 la unidad defectuosa llega a v_1 , y su proceso estocástico lo denotamos con $RD(t)$; 5) en el tiempo t_5 la unidad defectuosa se embarca de v_1 para su reparación, y su proceso estocástico lo denotamos con $ER(t)$; 6) en el tiempo t_6 la unidad defectuosa llega v_3 , y su proceso estocástico lo denotamos con $RR(t)$; 7) en el tiempo t_7 la unidad ya reparada se embarca de v_3 , y su proceso estocástico lo denotamos con $UR(t)$; y finalmente, 8) en el tiempo t_8 la unidad reparada arriba a v_1 , y su proceso estocástico lo denotamos con $RI(t)$.*

La figura 3.5 muestra la definición 3.9 de manera esquemática.

3.3. Modelos de inventarios

Para muchas organizaciones, en cualquier sector de la economía, la inversión en inventarios es enorme y la administración de los mismos tiene un papel estratégico. Los modelos matemáticos para controlar los inventarios datan de la primera parte del siglo XX. La teoría de inventarios moderna comienza con la derivación de la fórmula Cantidad Económica de Pedido (CEP)⁴ en 1913 [58]. En las siguientes décadas fueron elaboradas diferentes variaciones al modelo, muchas publicadas en revistas populares, escritas por o para

⁴En inglés es Economic Order Quantity (EOQ).

3.3.1. Modelos de inventarios de refacciones

La política de inventarios $(S - 1, S)$ ⁶ fue inicialmente estudiada como una variante de la política de inventarios (s, S) . La política de inventarios $(S - 1, S)$ es considerada como óptima para modelar inventarios de refacciones con bajo movimiento y de valor económico muy alto (véase la sección 3.3.2).

Gallihier, Morse y Simond [70] utilizan una demanda Poisson y tiempos de abastecimiento exponencialmente distribuidos para crear el modelo e indican que no hay diferencia entre tiempos de abastecimientos constantes versus variable, siempre y cuando el promedio sea el mismo. Gross [71] presenta un modelo $(S - 1, S)$ para una sola localidad, en donde el tiempo de reabastecimiento depende del número de órdenes pendientes por arribar. La política óptima en un sistema en serie del modelo $(S - 1, S)$, es presentada en Clark y Scarf [72]. Ellos introdujeron el concepto de inventario por eslabón y probaron que cada eslabón basa sus decisiones de órdenes en función del nivel de inventario por eslabón.

En 1968, el trabajo de Sherbrooke [10], llamado METRIC ⁷, fue desarrollado por el autor durante su estancia en la RAND Corporation. Este modelo considera la política $(S - 1, S)$ para cada producto y para cada eslabón de la cadena de suministro y se vale del teorema de Palm⁸ para determinar la cantidad de inventario en el proceso de reparación. Graves [12] desarrolla un modelo considerando dos parámetros para describir a la demanda con una distribución Binomial Negativa. Más recientemente Svoronos y Zipkin [73] crean un modelo multi-eslabones de inventario donde cada demanda solicita una orden por separado. Aquí se demuestra que la variedad en los tiempos de reabastecimiento juegan una gran rol en el desempeño del sistema de inventarios. Una visión sobre toda la literatura relacionada con las refacciones se puede encontrar en [74] y [75].

Bajo un enfoque de sistemas dinámicos, el trabajo de Spengler y Schröter [76] presenta herramientas de información y de administración de refacciones en una cadena de suministro cerrada. El sistema considera la información que es relevante, de acuerdo a la estrategia de producto-recolección de la empresa.

⁶Esta política de inventarios se deriva de una más general de mínimos y máximos, denotada como (s, S) . En ella, el tamaño de lote se calcula como $Q = S - s$. Para $Q = 1$, la ecuación quedaría como $1 = S - s$. Por lo que el mínimo es $s = S - 1$ y el máximo es S .

⁷En inglés es: A Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control.

⁸Véase la sección 5.1 sobre el teorema.

3.3.2. Política de inventarios $(S-1, S)$

La política de inventarios $(S - 1, S)$ es comúnmente utilizada en los modelos de inventarios de refacciones en la literatura y ha probado que es óptima bajo diversas circunstancias [13]. En ella se considera que la demanda $\{D(t), t \geq 0 | D(0) = 0\}$ es un proceso Poisson con índice $\lambda (> 0)$. La política opera de la siguiente manera: cuando la posición del inventario (inventario disponible más las órdenes pendientes de recibir menos el backorder⁹) se reduce al nivel $S - 1$, entonces se solicita una orden para reestablecer la posición del inventario al nivel S (véase la figura 3.6).

Denótese:

λ	= tasa de fallas
L	= tiempo de reabastecimiento del stock
Q	= tamaño de lote
r	= punto de reorden
s	= nivel de inventario-base = $r + 1$
t	= variable del tiempo continuo, $t \geq 0$
$D(t)$	= demanda acumulada hasta el tiempo t

De acuerdo con Cox y Miller [77], se establece la siguiente propiedad:

Propiedad: Si $D(t, t + \Delta t)$ es la cantidad de demanda en el intervalo $(t, t + \Delta t]$, se supone que cuando $\Delta t \rightarrow 0$,

$$P \{D(t, t + \Delta t) = 0\} = 1 - \lambda \Delta t + o(\Delta t) \quad (3.7)$$

$$P \{D(t, t + \Delta t) = 1\} = \lambda \Delta t + o(\Delta t) \quad (3.8)$$

$$P \{D(t, t + \Delta t) > 1\} = o(\Delta t) \quad (3.9)$$

donde $o(\Delta t)$ denota una función que tiende a cero más rápido que Δt ; por lo tanto, la probabilidad de que se tenga demanda en el intervalo de tiempo Δt es aproximadamente $\lambda(\Delta t)$ y la probabilidad de que exista más de una demanda es insignificante, independientemente de lo que suceda en otros intervalos. Esto implica que $D(t)$ tenga una distribución Poisson con media λt ,

⁹Este término, que viene del inglés, significa pendiente y es utilizado en la teoría de inventarios para referirse a aquella demanda que no es atendida desde el almacén en donde debería de estar, por no tener disponibilidad de inventario en ese momento.

$$P\{D(t) = d\} = \frac{(\lambda t)^d e^{-\lambda t}}{d!}, \quad d \geq 0 \quad (3.10)$$

Esto significa que $D(t, u]$ tiene una distribución Poisson con media $\lambda(u - t)$, lo cual depende únicamente de la longitud del intervalo $(t, u]$, y no de cuándo suceda. En este caso, lo que interesa conocer es la demanda que ocurre durante el intervalo de tiempo que transcurre desde que se solicita una orden hasta que ésta se entrega. Por ende, el valor esperado de la demanda durante el tiempo de entrega es $E[D(t)] = \lambda L$ cuando $t = L$.

Las variables que describen la evolución del sistema de inventarios en el tiempo, para $t \geq 0$, son:

- $I(t)$ = inventario disponible
- $B(t)$ = pedidos faltantes o backorder
- $IN(t)$ = inventario neto = $I(t) - B(t)$
- $A(t)$ = indicador de que el inventario quede vacío = $\mathbf{1}\{IN(t) \leq 0\}$
- $IO(t)$ = inventario en orden de pedido
- $PI(t)$ = posición del inventario = $IN(t) + IO(t)$

en donde la variable indicadora $A(t)$ toma el valor de 1 cuando $IN(t) \leq 0$, y 0 de otra manera. También se observa que $IN(t)$ determina el inventario disponible y el backorder, esto es, $I(t) = [IN(t)]^+$ y $B(t) = [IN(t)]^-$.

El valor esperado de las variables antes mencionadas es

- \bar{I} = promedio de inventario disponible
- $\bar{I} = \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T I(t) dt \right\}$
- \bar{A} = fracción de demanda en backorder
- $\bar{A} = \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T A(t) dt \right\}$
- \bar{B} = promedio de backorder
- $\bar{B} = \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T B(t) dt \right\}$
- \overline{FO} = promedio de la frecuencia de ordenar
- $\bar{\omega}$ = nivel de servicio = $1 - \bar{A}$

De acuerdo con Zipkin [57] y Grimmett y Stirzaker [78], estos criterios se pueden calcular como $\bar{I} = E[I]$, $\bar{A} = E[A]$, $\bar{B} = E[B]$ y $\overline{FO} = \lambda$, para un proceso estocástico estacionario. Para poder describir el comportamiento del

inventario neto, se requiere conocer la posición del inventario en equilibrio y la demanda durante el tiempo de entrega D .

El objetivo es mantener la posición del inventario PI a un valor constante s : Si el sistema comienza con $PI(0^-) \leq s$, entonces se ordena inmediatamente la diferencia, de tal manera que $PI(0) = s$. Si $PI(0^-) \geq s$, no se ordena nada hasta que la demanda reduzca $PI(t)$ hasta s . Una vez que $PI(t)$ alcanza el valor de s , este se mantiene ahí hasta que s vuelva a disminuir (ver figura 3.6).

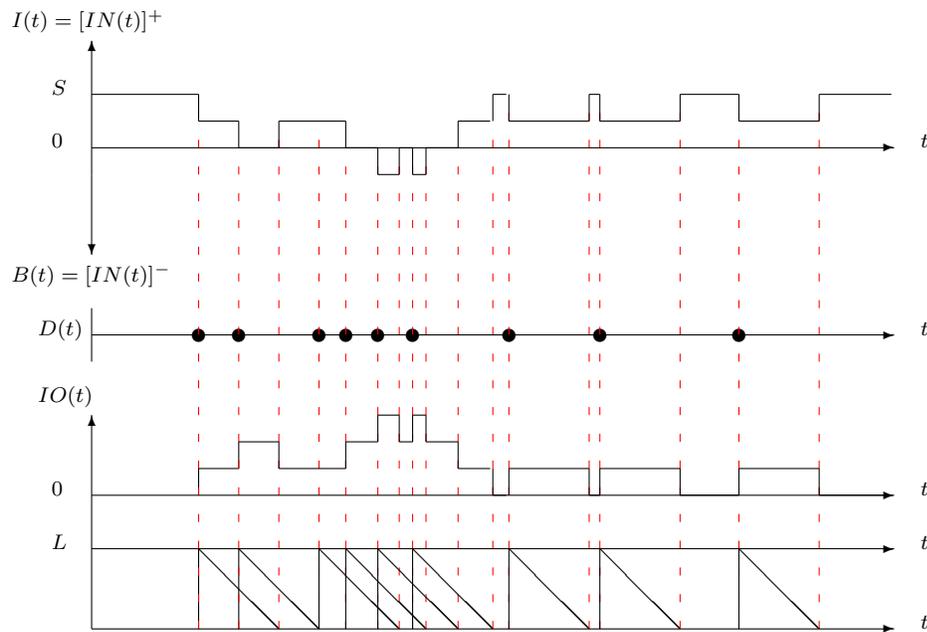


Figura 3.6: Modelo de inventarios (S-1,S).

Fuente: Elaboración propia basada en [57].

Análisis

Supóngase por ahora que $s \geq 0$ y que $IN(0) = I(0) = IP(0^-) = s$. Por lo tanto, las órdenes coinciden con la demanda y cada orden permanecerá pendiente por el tiempo L . Por ende, $IO(t)$ no depende de la elección de s y las órdenes incluidas en $IO(t)$ son aquellas que se solicitaron en el intervalo $(t - L, t]$, y estas órdenes corresponden a la demanda en el mismo intervalo. Esto se puede observar en la figura 3.6, por lo que,

$$IO(t) = D(t - L, t] \quad (3.11)$$

y, por consiguiente, este tiene una distribución Poisson con media λL . Por definición, $PI(t)$ es

$$PI(t) = IN(t) + IO(t), \quad (3.12)$$

pero $PI(t)$ es la constante s e $IO(t)$ es la demanda, por lo que

$$IN(t + L) = s - D(t - L, t] \quad (3.13)$$

Ahora se pueden calcular las medidas de desempeño del sistema. Sea g la función de probabilidad de masa de D durante el tiempo de entrega L , es decir, $P\{D = s\}$, G la distribución acumulada, es decir, $P\{D \leq s\}$, G^0 su distribución acumulada complementaria, es decir, $P\{D > s\}$, y G^1 la función de pérdida, es decir, $E[[D - s]^+]$, entonces se tiene lo siguiente:

$$\bar{A} = P\{IN \leq 0\} = P\{D \geq 0\} = G^0(s - 1) \quad (3.14)$$

$$\bar{B} = E[[IN]^-] = E[[D - s]^+] = G^1(s) \quad (3.15)$$

$$\bar{I} = E[[IN]^+] = E[IN + [IN]^-] = s - \lambda L + \bar{B} \quad (3.16)$$

De acuerdo con Tijms [79], $g(s)$ se puede calcular recursivamente como

$$g(0) = e^{-\lambda L} \quad (3.17)$$

$$g(s) = \left(\frac{\lambda L}{s}\right) g(s - 1) \quad (3.18)$$

Para calcular G no existe una forma cerrada, por lo que se debe de calcular de manera directa¹⁰. De acuerdo con Zipkin [57], se tiene

$$\bar{A} = G^0(s - 1) = 1 - \sum_{j < s} g(j) \quad (3.19)$$

$$\bar{B} = G^1(s) = \lambda L - \sum_{j < s} G^0(j) \quad (3.20)$$

La ecuación 3.20 es una función no incremental y convexa¹¹ en s para valores de D no negativos (véase [57]).

¹⁰Esta forma de cálculo no se debe de utilizar para valores de s muy largos, véase [80].

¹¹La convexidad de la función $\bar{B} = G^1(s)$, definida en el intervalo $S = (a, b)$, se cumple con la siguiente desigualdad $G^1(\alpha s_1 + (1 - \alpha)s_2) \leq \alpha G^1(s_1) + (1 - \alpha)G^1(s_2)$ [81, 57].

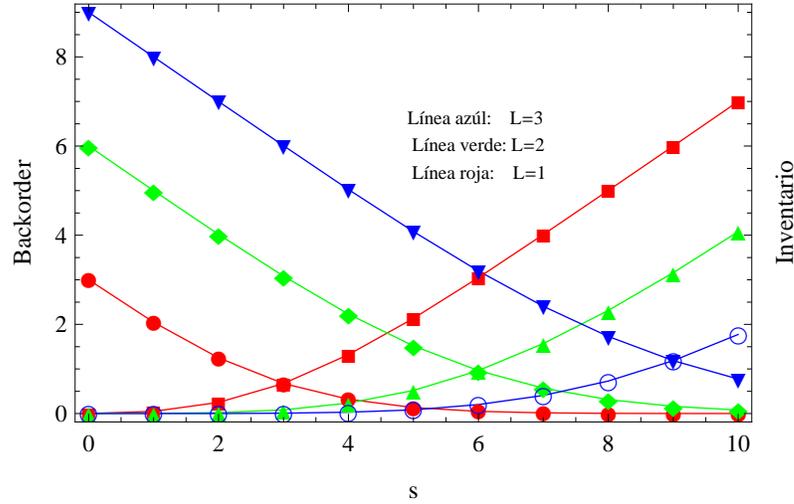


Figura 3.7: Comportamiento de \bar{B} e \bar{I} para diferentes valores de L .
Fuente: Elaboración propia.

Comportamiento del sistema de inventarios

El desempeño del sistema depende sólo de los parámetros λ y L a través del producto λL , que es la media de la demanda que se genera durante el tiempo de entrega L . Ahora bien, \bar{B} es decreciente y convexo conforme a s , \bar{I} aumenta y es convexo¹² conforme a s , y \bar{A} es decreciente conforme a s , sin embargo este no es convexo. En la figura 3.7 se muestra el comportamiento de \bar{B} e \bar{I} para $\lambda = 3$ y L igual a 1, 2 y 3.

En la figura 3.7 se observa cómo se mueven las curvas hacia la derecha conforme L incrementa, por lo que también se incrementa el valor de s para seguir manteniendo el mismo nivel de servicio. Otra manera de evaluar el impacto de L en el desempeño del sistema es utilizando la fórmula de Little [82] y medir el tiempo promedio que esperan los clientes en backorder \overline{BE} y el tiempo promedio que está en inventario una refacción \overline{IE} , esto es,

$$\overline{BE} = \frac{\bar{B}}{\lambda} \tag{3.21}$$

$$\overline{IE} = \frac{\bar{I}}{\lambda} \tag{3.22}$$

¹²Para el valor esperado de \bar{I} aplica la misma fórmula de la nota anterior.

3.4. Análisis de la dinámica de inventarios

Una abstracción más simplificada del flujo de los inventarios, a través de la cadena de suministro de la figura 3.4, es la que se muestra en la figura 1.4. Esta incluye básicamente tres eslabones que interactúan en la cadena de suministro: (i) el prestador del servicio de refacciones en avanzada (FOE), (ii) el cliente y (iii) el centro de reparación. De acuerdo con la figura 1.4, el punto número uno indica que al cliente le falló una tarjeta electrónica y éste solicita un remplazo al proveedor (FOE) para entregarse en un tiempo estipulado por contrato, el punto número dos es la recolección de la tarjeta defectuosa, en el punto tres la tarjeta defectuosa es enviada a reparar y en el punto cuatro la tarjeta retorna al FOE ya reparada. Con este último punto se completa el ciclo del flujo del inventario a través de la cadena de suministro. En este flujo existe un principio de conservación: lo que entra en cualquiera de los eslabones del sistema es lo mismo que sale, de tal manera que la cantidad que está fluyendo en el tiempo a través de la cadena de suministro es constante.

3.4.1. Representación gráfica de la dinámica de inventarios

Considérese al sistema de la figura 1.4 como un sistema de colas en donde los servidores son los elementos o eslabones de la cadena de suministro y el inventario son los objetos que fluyen a través de ella. Considérese que en el tiempo $t = 0$ el sistema comienza a fluir, sin que exista alguna cola de trabajo o servicio pendiente en algún eslabón. Y que el tiempo es una variable continua. De acuerdo con la figura 1.4, en el proceso número uno se demanda una refacción i para $i = 1, 2, 3 \dots n$ del inventario del eslabón v_1 en el tiempo t_1^i y llega al eslabón v_2 en el tiempo t_2^i . La refacción se entrega en condiciones de funcionamiento¹³. El paso dos es el retorno de la refacción i en condición defectuosa del eslabón v_2 en el tiempo t_3^i y ésta llega al eslabón v_1 en el tiempo t_4^i . En el paso tres el eslabón v_1 envía a reparar la refacción i en el tiempo t_5^i y llega al eslabón v_3 en el tiempo t_6^i . Finalmente, el eslabón v_3 retorna en el tiempo t_7^i la refacción i ya reparada al eslabón v_1 , la cual llega a este en el tiempo t_8^i .

Nótese que

¹³La refacción puede estar en condiciones de funcionamiento, ya sea porque es nueva o porque ya fue reparada con anterioridad.

$$0 \leq t_1^i \leq t_2^i \leq t_3^i \leq t_4^i \leq t_5^i \leq t_6^i \leq t_7^i \leq t_8^i \quad (3.23)$$

y esta secuencia se va a seguir cada vez que se demande una refacción i . Por otro lado, se puede observar que también se cumple

$$0 \leq t_1^1 \leq t_1^2 \leq t_1^3 \dots \quad (3.24)$$

Esto se puede representar de manera gráfica en una recta como lo que se presenta en la figura 3.8.

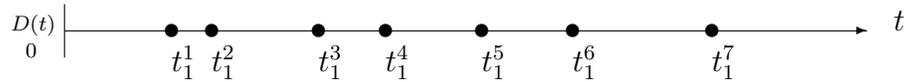


Figura 3.8: Representación de la demanda de refacciones.
Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, como se graficó la demanda de refacciones de la figura 3.8, se pueden graficar los siguientes tiempos que corresponden al paso de cada refacción i a lo largo de la cadena de suministro. Sin embargo, si los tiempos que experimenta cada refacción t_n^i , para $n = 1, 2, \dots, 8$, son distintos, entonces es posible que ya no se cumpla la igualdad indicada anteriormente en la ecuación 3.24.

Otra manera más conveniente de representar toda la cadena de suministro es a través de gráficas de datos acumulados al tiempo t ¹⁴. La demanda acumulada al tiempo t en el eslabón v_1 se denota por $D(t)$, las unidades acumuladas entregadas al tiempo t en el eslabón v_2 se denota por $C(t)$. Las refacciones defectuosas entregadas acumuladas al tiempo t por el eslabón v_2 se denotan por $ED(t)$. La cantidad de unidades retornadas defectuosas acumuladas al tiempo t que arriban al eslabón v_1 se denota por $RD(t)$. El volumen de unidades enviadas a reparar acumuladas al tiempo t por el eslabón v_1 se denota como $ER(t)$ y su recepción en el eslabón v_3 por $RR(t)$. Las unidades acumuladas reparadas al tiempo t que envía el eslabón v_3 se denotan por $UR(t)$ y las que recibe el eslabón v_1 , ya reparadas, se denotan por $RI(t)$ (véase figura 3.9).

¹⁴Daganzo [83] [84] utilizó esta herramienta para analizar la dinámica y estabilidad de las cadenas de suministro, basándose en parte en el trabajo desarrollado por Newell [85].

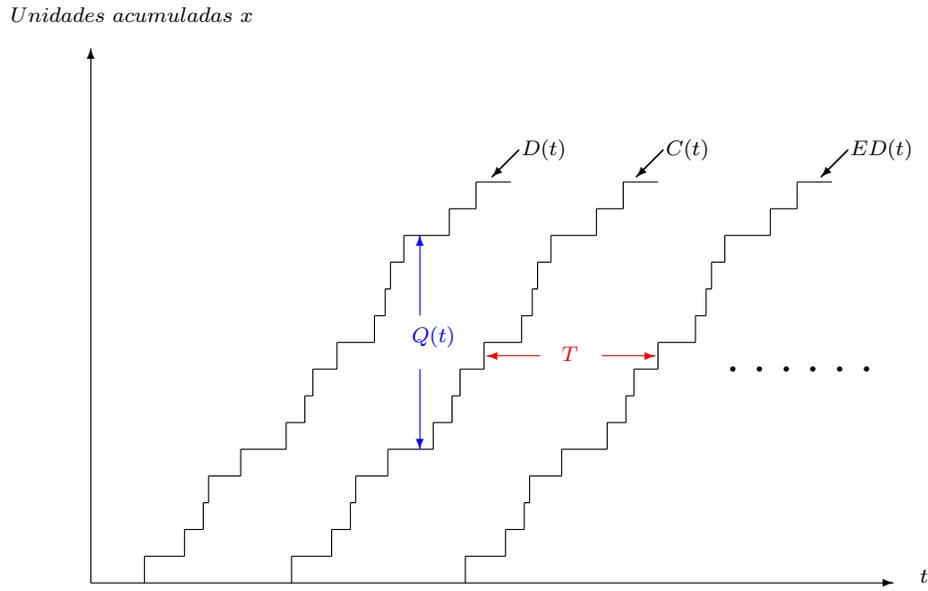


Figura 3.9: Representación gráfica de los datos acumulados de la demanda, recolección de unidades defectuosas y reparación.
 Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.9 la distancia vertical entre dos curvas en cualquier tiempo t representa la cantidad de unidades que ingresaron en un proceso y que aún no salen de él; por ejemplo, entre la curva $D(t)$ y $C(t)$ esto representaría la cantidad de unidades demandadas por el cliente y que aún no han sido entregadas a él en el tiempo t . En general, esto se representaría de la siguiente manera:

$$Q_{kl}(t) = Curva_k(t) - Curva_l(t) \geq 0 \quad (3.25)$$

para $k > l$, donde $k = 1, 2, 3, \dots, n - 1$ y $l = 2, 3, 4, \dots, n$. Ahora bien, la distancia horizontal entre dos curvas k y l corresponde al tiempo T_i que se lleva la unidad i desde que entra al proceso de la $Curva_k(t)$ y llega a la $Curva_l(t)$, para $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

3.4.2. Efecto látigo en cadenas de suministro

Ejecutivos de Procter & Gamble (P&G) examinaron cómo es el comportamiento que tienen las órdenes en la cadena de suministro de los pañales que fabrican. En el estudio encuentran que, a pesar de que la demanda de los pañales es constante durante todo el año, la variabilidad en las órdenes de suministro en la cadena de suministro se va incrementando conforme se avanza en ella. P&G llamó a este fenómeno: “**efecto látigo**” [86]. En la literatura, Forrester [87] es el primero en identificar este efecto y sus posibles causas. Sterman [88] reporta evidencias del efecto látigo en el “Juego de distribución de cerveza”. El experimento involucra cuatro eslabones y administradores de una cadena de suministro, los cuales toman decisiones de inventarios sin consultar a los otros miembros de la cadena de suministro, tomando en cuenta sólo las órdenes de los eslabones vecinos como única fuente de información. Sterman [88] interpreta este fenómeno como una consecuencia de la falta de percepción de los administradores de la cadena de suministro sobre los otros eslabones de la misma. Este fenómeno ha sido estudiado también desde el punto de vista de otras disciplinas como: la economía (Caplin [89]) y la teoría del tráfico [83, 90, 91, 92] por la similitud de las cadenas de suministro con las avenidas en donde circulan automóviles y también porque en la teoría del tráfico el efecto de “parar y avanzar”¹⁵ tiene mucha similitud con el efecto látigo; así como por la teoría del control [93, 94, 95] utilizando como métrica del efecto látigo funciones de transferencia.

Las causas que provocan este fenómeno se han enlistado en algunos trabajos de investigación [86, 96, 97, 94]. Algunas de estas causas son: (i) pronósticos de demanda, (ii) órdenes de suministro por lotes, (iii) fluctuaciones en los precios, (iv) la fábrica raciona su producto a los clientes y éstos crean órdenes mayores a la demanda, (v) tiempos largos de suministro y demanda autocorrelacionada, (vi) políticas de reabastecimiento, etc.

El efecto látigo no puede ser eliminado [92]; sin embargo, se han hecho algunas sugerencias para mitigar dicho efecto. Una de éstas consiste en centralizar la información de la demanda, es decir, proveer la información de la demanda de los clientes a cada eslabón de la cadena de suministro. Otras maneras de mitigar el impacto son: (i) disminuyendo la variabilidad inherente al proceso de demanda de los clientes, esto considera mejoras en los pronósti-

¹⁵Véase un ejemplo del efecto: **parar y avanzar** en un simulador desarrollado por Martin Treiber de la Technische Universität Dresden en el portal <http://www.traffic-simulation.de/>.

cos de demanda, reducción del tamaño de lote de las órdenes a través de menores costos de abastecimiento, etc.; (ii) reduciendo los tiempos de suministro; (iii) haciendo socios estratégicos, esto puede cambiar la manera en la que se comparte la información en la cadena de suministro, también el uso de socios logísticos puede ayudar a reducir los costos de transportación, de tal manera que no sea necesario llenar un camión completo para poder hacer el envío, sino que el socio logístico agregue lo de diferentes clientes; (iv) teniendo una estrategia de precios estables [98, 44, 43].

Adicional a lo indicado en el párrafo anterior, Helbing [91] sugiere que, para reducir el efecto látigo en la cadena de suministro, se puede considerar el inventario de otros eslabones hacia atrás, o incluso el del cliente de la cadena de suministro, para adaptarse a las variaciones en la demanda. Esto es conocido como: la “estrategia de jalar”¹⁶. Por el contrario, en la “estrategia de empujar”¹⁷ el material hacia adelante en la cadena de suministro desestabiliza el sistema.

Una manera de medir el efecto látigo es cuantificando el incremento en la variabilidad de las órdenes que ocurre en cada eslabón de la cadena de suministro conforme se avance en ella. Esto es importante para verificar cuál es la relación entre las técnicas de pronósticos, el tiempo de entrega y el incremento en la variabilidad [99].

3.4.3. Análisis fractal

Un fractal puede ser visto como un objeto o fenómeno en donde su estructura persiste en diferentes escalas, desde lo macroscópico a lo microscópico. No existe una definición universal de qué es exactamente un fractal, pero existen dos puntos centrales: primero es que éstos son considerados como conjuntos cuya dimensión de Hausdorff es estrictamente mayor que su dimen-

¹⁶Las cadenas de suministro que utilizan la “estrategia de jalar”son administradas en función de la demanda de los clientes, en lugar de utilizar el pronóstico de los clientes. Bajo este sistema se reduce el inventario con los distribuidores, la variabilidad en todo el sistema, en los costos y los tiempos de entrega. Sin embargo, estos son difíciles de implementar cuando los tiempos de abastecimiento son muy largos y no se puede reaccionar apropiadamente a la demanda. Además, no se pueden aprovechar las ventajas de una economía de escala por la manufactura o transportación [44].

¹⁷En esta estrategia la administración de la cadena de suministro se basa en pronósticos a largo plazo [44].

sión topológica¹⁸, y segundo que éstos son objetos que son aproximadamente o estadísticamente auto-similares [101].

Mandelbrot [38, 102] utiliza el término auto-similar para referirse a aquellos fractales que son invariantes bajo transformaciones de similitud, es decir, que el factor de escala que transforma al objeto fractal es similar al original, sólo que más grande o más pequeño. Sin embargo, diferentes objetos fractales en la naturaleza o series de tiempo no tienen el comportamiento de los fractales auto-similares, ya que estos presentan diferentes transformaciones con diferentes escalas y longitudes. A estos fractales Mandelbrot los denominó auto-afines.

Otra forma de ver a los fractales auto-afines es de la siguiente manera: considérese un conjunto finito F en el d -espacio Euclideo. La posición de cada punto en F se describe por el vector $X = (x_1, x_2, \dots, x_d)$. Una transformación afín de los radios de escalamiento reales $r_i (0 < r_i < 1, i = 1, 2, \dots, d)$, toma cada elemento de F de la posición X dentro de un elemento del conjunto $r(F)$ con posición $R = (r_1x_1, r_2x_2, \dots, r_dx_d)$. El conjunto F es auto-afín si éste es la unión de distintos subconjuntos N congruentes con $r(F)$. El conjunto F es estadísticamente auto-afín si sus subconjuntos son estadísticamente congruentes con $r(F)$ [103].

Definición 3.10 (Proceso auto-afín). *La definición estándar de auto-afinidad indica que un proceso de tiempo continuo $Y = \{Y(t), t \geq 0\}$ es auto-afín si la probabilidad de distribución de $\{Y(t)\}$ tiene la misma distribución de probabilidad que $\{a^H Y(at)\}$ para $a > 0$.*

El parámetro H toma valores entre 0 y 1, y es conocido como el parámetro de auto-afinidad o exponente de Hurst. Este parámetro mide la persistencia de la correlación en los datos [27]:

- Cuando $0 < H < 1/2$, el proceso muestra correlación de antipersistencia¹⁹.

¹⁸En la dimensión topológica D_T , un espacio es n -dimensional si cualesquiera dos puntos en él pueden separarse quitando un subconjunto $(n - 1)$ -dimensional, y si para ello no siempre es suficiente quitar un subconjunto de dimensión menor. Esto conduce siempre a un valor entero [100]. La dimensión de Hausdorff D , no tiene que ser necesariamente un entero, sino también puede ser fraccionaria [38].

¹⁹La antipersistencia se refiere a la tendencia a regresar constantemente al lugar de procedencia y, por lo tanto, estar por debajo del promedio de los datos [39].

- Cuando $1/2 < H < 1$, el proceso muestra una correlación de persistencia²⁰. Entre mayor sea el valor de H , mayor es la correlación de persistencia. En este caso se tiene que la auto-correlación es $\sum_h \rho(h) = \infty$. Es por esta propiedad, que las series de tiempo tienen dependencia a largo plazo.
- Cuando $H = 1/2$, se dice que la serie de tiempo no tiene memoria.

3.4.4. Estimación del parámetro de Hurst

De manera general, estimar la memoria a largo plazo de una serie de tiempo que refleje el comportamiento de un sistema complejo a través del parámetro H es una tarea difícil [27]. En esta investigación se utilizan los siguientes métodos para estimar H : análisis de rango reescalado (R/S) y el algoritmo de visibilidad gráfica. Se decidió utilizar el método (R/S) ya que este es el primer método para analizar el comportamiento de la memoria a largo plazo de las series de tiempo y en mucha literatura este es utilizado; el método del algoritmo de visibilidad gráfica permite estudiar también la memoria a largo plazo en las series de tiempo, dando consistencia a los resultados encontrados a través del método (R/S), y permite utilizar las series de tiempo a través de una gráfica, y por ende, utilizar las herramientas matemáticas de la teoría de redes. Tanto para el método (R/S), como para el algoritmo de visibilidad gráfica, se desarrolló una macro en Microsoft Excel© para procesar la información, misma que lleva tiempo, y que de alguna manera es una limitación para el desarrollo de esta investigación. Sin embargo es recomendable utilizar un método adicional para revisar la consistencia del valor obtenido de H , como por ejemplo, la gráfica de Varianza-Tiempo, el método del periodograma, el estimador α de una distribución de Ley de Potencia, etc., los cuales se pueden consultar en [27, 104, 105].

Análisis de rango reescalado (R/S)

Dado un conjunto de observaciones $\{X_k, k = 1, 2, \dots, n\}$, con media muestral $\bar{X}(n)$ y varianza muestral $S^2(n)$, el estadístico R/S está dado por

²⁰La persistencia se refiere al hecho de mantener la misma tendencia del comportamiento de la serie de tiempo y es muy probable que esta se mantenga por arriba del promedio de los datos [39].

$$\frac{R(n)}{S(n)} = \frac{1}{S(n)} [\max(0, W_1, W_2, \dots, W_n) - \min(0, W_1, W_2, \dots, W_n)], \quad (3.26)$$

donde

$$W_k = \sum_{i=1}^k [X_i - \bar{X}(n)] \quad (3.27)$$

y el factor $S(n)$ es introducido con propósitos de normalización. Por lo tanto, $R(n)/S(n)$ caracteriza esencialmente el rango del proceso W_k . Lo que se espera es que [38],

$$E \left[\frac{R(n)}{S(n)} \right] \propto n^H, \quad n \rightarrow \infty. \quad (3.28)$$

Entonces, el valor de H se puede obtener a través de una regresión lineal sobre una muestra de un horizonte de tiempo

$$\log \left(E \left[\frac{R(n)}{S(n)} \right] \right) = \log(c) + H \log(n) \quad (3.29)$$

donde $\log(c)$ es una constante que determina el punto en el cual la línea de la ecuación 3.29 cruza el eje $\log(E [R(n)/S(n)])$.

Algoritmo de visibilidad gráfica

El algoritmo de visibilidad gráfica es un nuevo método para estimar el exponente H al convertir el movimiento Browniano fraccional (mBf) en una red de libre-escalamiento²¹, de acuerdo con el siguiente criterio [106, 107]: dos puntos arbitrarios de una serie de tiempo (t_a, y_a) y (t_b, y_b) tienen visibilidad y, por consecuencia se convierten en dos nodos conectados en una gráfica determinada, si cualquier otro punto (t_c, y_c) , en donde $t_a < t_c < t_b$ cumple con

$$y_c < y_a + (y_b - y_a) \frac{t_c - t_a}{t_b - t_a} \quad (3.30)$$

²¹De la misma manera, al aplicar este algoritmo series de tiempo periódicas se convierten en gráficas regulares, y series de tiempo aleatorias en gráficas aleatorias [106].

donde t se refiere al tiempo e y al valor que toma este en el tiempo t . Con el propósito de ilustrar el algoritmo, la figura 3.10 presenta un ejemplo para una serie de tiempo dada.

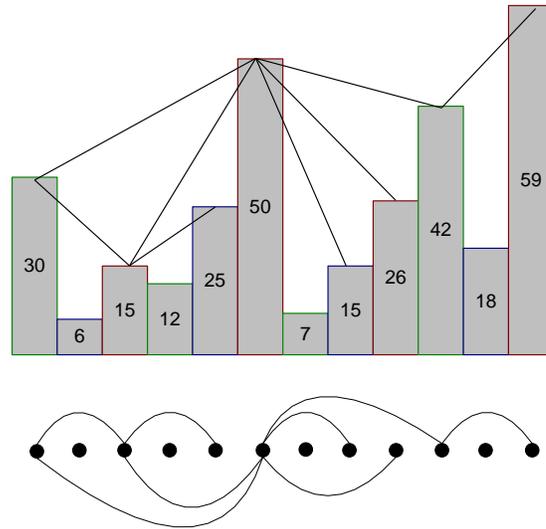


Figura 3.10: Ejemplo del algoritmo de visibilidad gráfica.
Fuente: Elaboración propia basada en [106, 107].

Lacasa et al. [106] mostró que el grado de la distribución de nodos en la gráfica $P(k)$, derivado de un mBf genérico sigue una ley de potencia, esto es, $P(k) \sim k^{-\gamma}$, donde el grado de un nodo k es el número de nodos adyacentes a él. La relación lineal entre el exponente γ de la distribución de los grados, conforme a la ley de potencia de la gráfica de visibilidad, y el exponente de Hurst H de la serie mBf se describe como [106],

$$\gamma(H) = 3 - 2H \quad (3.31)$$

Para estimar el exponente γ , se grafica el logaritmo del grado del vértice k versus el logaritmo del número de vértices de grado k : m_k . La curva resultante debe aproximarse a una línea recta, y los puntos deben satisfacer la ecuación²².

$$\log(m_k) \approx a - \gamma \log(k) \quad (3.32)$$

²²Véase [108] para calcular el exponente γ a través de otras técnicas.

La posibilidad de convertir una serie de tiempo en una gráfica permite que se utilicen las herramientas matemáticas del estudio de redes complejas (véase la sección 3.1) para entender cómo emerge la variabilidad en las colas de los procesos de la cadena de suministro. Los resultados de esto se observa en el Capítulo 4.

4 Análisis y caracterización de cadenas de suministro de refacciones

Para construir el modelo de inventarios, el presente capítulo aplica a datos reales parte de los conocimientos teóricos descritos en el Capítulo 3. Básicamente el desarrollo de este capítulo se centra en tres análisis para caracterizar el sistema: i) estadístico, ii) fractal y iii) con herramientas de redes complejas. Al final del presente capítulo, se concluyen los resultados de los análisis mencionados, que fundamentan y justifican el desarrollo del modelo de inventarios en el Capítulo 5.

4.1. Análisis estadístico de series de tiempo

Para el análisis estadístico se tuvo visibilidad de datos, únicamente de cuatro de ocho pasos del proceso del servicio de intercambio de refacciones en avanzada definido en 3.9. Estos son el de demanda $D(t)$, el de refacciones defectuosas que entrega el cliente al FOE $ED(t)$, el de unidades enviadas a reparar $ER(t)$ y el de unidades reparadas que llegan al FOE $RI(t)$. Con estas cuatro series de tiempo se cierra el ciclo del proceso (las que no están son pasos intermedios) y hace factible su estudio. La serie de tiempo de la demanda incluye un año de información por 4217 unidades que contiene 548 códigos (o números de parte) distintos. Desafortunadamente, no todas las unidades fueron recolectadas como defectuosas con el cliente, ni tampoco no todas éstas habían sido reparadas aún. Por tal motivo, se consideraron para este análisis sólo 3617 unidades que completaron el ciclo completo descrito en la definición 3.9.

Las figuras 4.1 y 4.2 muestran las series de tiempo de cada uno de los

procesos definidos anteriormente en la cadena de suministro, esto es: (a) demanda, (b) unidades defectuosas entregadas al cliente pendientes de recolectar, (c) unidades enviadas a reparar y (d) unidades ingresadas al FOE que llegaron de su reparación. La demanda de las 3617 unidades transcurrieron en un periodo de 365 días. El proceso de recolectar las unidades defectuosas $ED(t)$ y el de salida a reparación $ER(t)$ transcurrieron en un periodo de 434 días, y el de unidades que retornan de reparación al FOE $RI(t)$ se tomó 464 días. A pesar de que la cantidad de unidades procesadas en cada serie de tiempo es constante, el número de días que tomó cada proceso fue incrementando conforme éste avanza en la cadena de suministro.

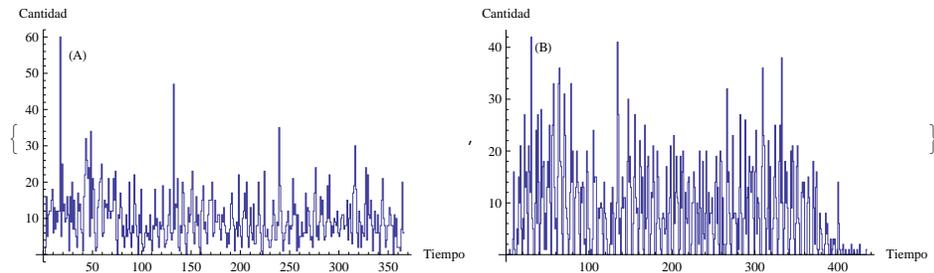


Figura 4.1: Series de tiempo de: (a) demanda y (b) de unidades defectuosas pendientes de recolectar con el cliente.

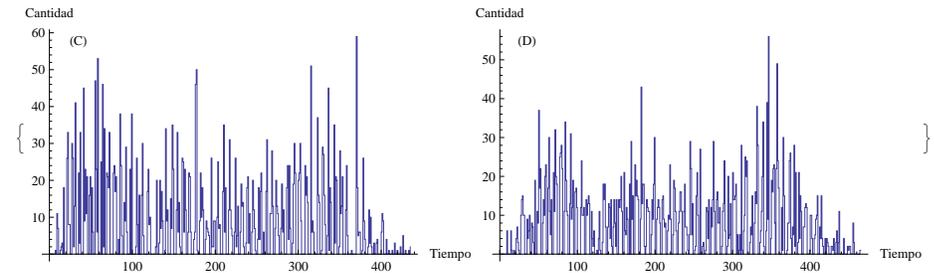


Figura 4.2: Series de tiempo de: (c) unidades enviadas a reparación y (d) unidades que retornan de reparación al FOE.

La tabla 4.1 indica el cálculo estadístico de las series de tiempo. Estas estadísticas muestran el incremento en la variabilidad entre ED y D , y entre ER y ED , lo que confirma la presencia del efecto látigo.

Al aplicar la ecuación 3.25 en las cuatro series de tiempo, se obtienen las series de tiempo de las colas de la cadena de suministro (véase la figura 4.3).

	D	ED	ER	RI
Promedio	9.9095	8.3341	8.3341	7.7952
Desv. Est.	7.0877	8.5929	11.468	9.1287
Varianza	50.23	73.83	131.51	83.3338

Tabla 4.1: Estadísticas de las series de tiempo.

Además, para verificar el impacto que tiene el tiempo de suministro en el aumento en cantidad y variabilidad de las colas generadas en la cadena de suministro, se generan de la serie de tiempo de la demanda, diferentes series de tiempo, considerando los siguientes ciclos completos del proceso: 1, 7, 14, 30, 60 y 90 días (véase la figura 4.4).

La tabla 4.2 muestra el análisis estadístico de las series de tiempo de cada cola. La cola que corresponde al proceso de unidades en reparación $RI(t)$, es el de mayor cantidad y variabilidad. Posteriormente está el proceso de unidades defectuosas pendientes de recolectar con el cliente $ED(t)$. Finalmente, se tiene el proceso de unidades defectuosas recolectadas que están pendientes de enviar a reparación $ER(t)$. En cuanto al impacto del tiempo, del ciclo completo del servicio de intercambio de refacciones en avanzada, en la tabla se puede identificar que el coeficiente de variación (CV) tiene la menor dispersión cuando $L = 1$. Sin embargo, esta dispersión se incrementa rápidamente, conforme el tiempo del ciclo completo es mayor.

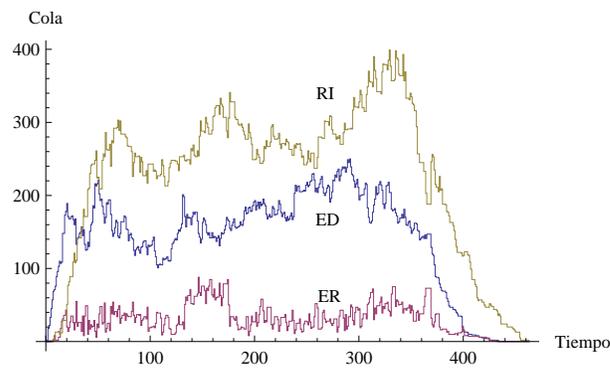


Figura 4.3: Colas de unidades en la cadena de suministro.

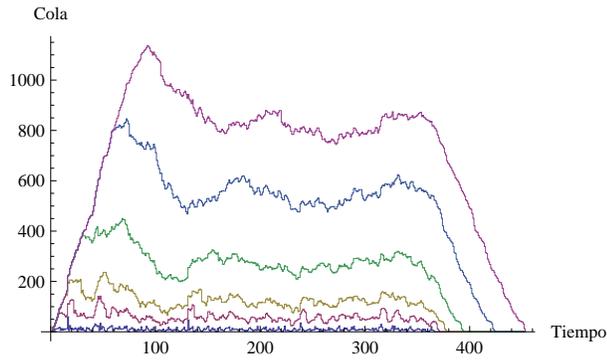


Figura 4.4: Colas de unidades en la cadena de suministro para diferentes tiempos de entrega.

	Promedio	Desv. Est.	Varianza	CV
ED_{cola}	147.70	60.91	3710.57	0.41
ER_{cola}	32.48	19.49	379.94	0.60
RI_{cola}	223.42	105.03	11032.17	0.47
$L=1_{cola}$	9.90	7.08	50.23	0.71
$L=7_{cola}$	58.65	20.61	425.14	0.35
$L=14_{cola}$	124.72	37.12	1378.40	0.29
$L=30_{cola}$	266.90	81.89	6707.14	0.30
$L=60_{cola}$	504.49	178.05	31704.03	0.35
$L=90_{cola}$	710.62	273.52	74817.45	0.38

Tabla 4.2: Cálculos estadísticos a las series de tiempo de las colas de unidades en la cadena de suministro.

4.2. Análisis fractal de series de tiempo

Realizando los cálculos descritos en las secciones 3.4.4 y 3.4.4 para medir el exponente de Hurst H , se observa en la tabla 4.3 los valores obtenidos. Para ambos métodos, el R/S y el del algoritmo de visibilidad gráfica, se muestra consistencia ya que en ambos casos el valor de H es mayor a $1/2$. Por lo tanto, las series de tiempo muestran correlación de persistencia, esto es, dependencia a largo plazo.

	H (R/S)	H (Alg. Visib. Grá.)
ED_{cola}	1.00	0.85
ER_{cola}	0.89	0.84
RI_{cola}	0.95	0.96
$L=1_{cola}$	0.74	0.78
$L=7_{cola}$	0.81	0.81
$L=14_{cola}$	0.89	0.88
$L=30_{cola}$	0.94	0.90
$L=60_{cola}$	0.89	0.96
$L=90_{cola}$	0.90	0.91

Tabla 4.3: Exponente de Hurst de las colas.

4.3. Análisis de redes complejas en series de tiempo

Cada una de las series de tiempo de las colas se convierte en una gráfica al aplicar el algoritmo de visibilidad gráfica (sección 3.4.4), y a partir de esto se aplican las fórmulas escritas en la sección 3.1.2 -correspondientes a las teoría de redes complejas- para caracterizar la emergencia de la variabilidad en las colas de la cadena de suministro. Las redes se pueden observar en las figuras A.1 - A.9. Todos los cálculos fueron ejecutados con la herramienta de software Network Workbench (NWB) [109].

Todas las redes formadas son dispersas, ya que sus valores de densidad cumplen con $Densidad \ll 1$ (véase la tabla 4.4) y ésta es una de las características de las redes complejas. Para identificar si las redes experimentan el fenómeno de mundo pequeño, se construyeron redes aleatorias con el mismo

número de nodos y tomando en cuenta que la probabilidad de que dos nodos estén conectados $p = \bar{k}/N$ (véase [36]). Estos dos datos se ingresaron a la herramienta NWB [109] para obtener las redes aleatorias. Debido a que en todos los casos $\bar{C}_{datos} \gg \bar{C}_{GA}$ y el camino más corto promedio de los datos es comparable con el de la red aleatoria $\bar{l}/\bar{l}_{GA} \sim 1$ (véanse las tablas 4.4 y 4.5), se concluye que todas las redes son mudos pequeños [51].

Los valores de γ , mostrado en las tablas 4.4 y 4.5, confirman que la distribución del grado de los nodos se ajusta por una ley de potencia. Debido a que en todos los casos el valor de γ está entre $1 < \gamma < 2$, se confirma que la variabilidad de estas emerge por el modelo de duplicación parcial descrito en la sección 3.1.2.

	Cola ED	Cola ER	Cola RI
n	433	431	458
Arcos	1795	1183	2220
Nodos aislados	27	31	33
Densidad	0.0191	0.0127	0.0212
Coefficiente de clúster promedio (datos)	0.4875	0.5484	0.5261
Coefficiente de clúster promedio (gráfica aleatoria)	0.0202	0.0138	0.0202
Camino más costo promedio (datos)	4.3325	4.0373	4.9235
Camino más costo promedio (gráfica aleatoria)	3.1567	3.8783	2.9662
γ	1.2854	1.3069	1.0703
p	0.5479	0.5465	0.5623

Tabla 4.4: Análisis de redes complejas sobre las series de tiempo de las colas.

4.4. Conclusiones

Es la sección 4.1 se demuestra la presencia del efecto látigo en la cadena de suministro en estudio. El modelo de inventarios en la literatura -el cual considera a la demanda como un proceso Poisson (véase la sección 3.3.2)- no considera la posibilidad de que la varianza incremente en la cadena de suministro, ya que, por definición, la distribución de Poisson tiene su valor de la media y desviación estándar igual. Respecto a la variabilidad que experimentan las colas de la cadena de suministro, se hace evidente que esta es menor cuando el tiempo ciclo es menor también.

	L=1	L=7	L=14	L=30	L=60	L=90
n	365	370	377	393	423	453
Arcos	838	1265	1442	2026	2390	2467
Nodos aislados	40	26	29	25	26	26
Densidad	0.0126	0.0185	0.0203	0.0263	0.0267	0.0241
Coefficiente de clúster promedio (datos)	0.5695	0.4675	0.4898	0.4742	0.4258	0.4518
Coefficiente de clúster promedio (gráfica aleatoria)	0.0177	0.0219	0.0238	0.0266	0.0253	0.0227
Camino más costo promedio (datos)	3.7439	4.0429	3.7606	4.7307	4.0064	2.9688
Camino más costo promedio (gráfica aleatoria)	4.1832	3.3913	3.2262	2.8181	2.7629	2.8300
γ	1.4251	1.3627	1.2309	1.1883	1.0673	1.1720
p	0.5385	0.5427	0.5516	0.5544	0.5625	0.5555

Tabla 4.5: Análisis de redes con diferentes tiempos de ciclo.

En la sección 4.2 se muestra que las series de tiempo presentan comportamiento persistente o, dicho de otra manera, dependencia a largo plazo, ya que el valor del exponente de Hurst es mayor a $1/2$. Nuevamente, el modelo de inventarios existente en la literatura -demanda Poisson- considera que no existe dependencia a largo plazo, sino que más bien los valores de demanda son independientes.

Finalmente, al convertir las series de tiempo en gráficas utilizando el algoritmo de visibilidad gráfica (véase la sección 4.3), las redes resultantes mostraron el fenómeno de mundo pequeño y propiedad de ley de potencia en la distribución del grado de sus nodos $P(k) \sim k^{-\gamma}$ con un valor de $1 < \gamma < 2$. Este resultado sugiere que la variabilidad en las colas de la cadena de suministro emerge por el modelo de duplicación parcial (véase en la sección 3.1.2). Esto es, que en la literatura existente sobre el efecto látigo, en este trabajo se está proponiendo una explicación alternativa de la emergencia del efecto látigo en una cadena de suministro (véase en la sección 3.4.2 las causas ya estudiadas).

En conclusión, la variabilidad de las colas de la cadena de suministro se incrementa cuando el valor de H y γ están cercanos a 1, como resultado del incremento en el tiempo ciclo. Entonces, el tiempo ciclo es un factor importante para mitigar la variabilidad en el sistema.

Como ya se mencionó, en la literatura el modelo de inventarios considera que las colas se generan de acuerdo a $M/G/\infty$, donde M representa la demanda Poisson, G una distribución general para los tiempo ciclo, e ∞ representa un número ilimitado de servidores [68]. De acuerdo con el teore-

ma de Palm [110], la cantidad total de unidades en el sistema $M/G/\infty$ se distribuye de manera Poisson. Sin embargo, en el análisis realizado en este capítulo se demuestra que el sistema se comporta más acorde a una distribución de colas pesadas. El capítulo siguiente toma esto en consideración para la construcción del modelo de inventarios.

5 Modelo dinámico de la cadena de suministro de refacciones

En el capítulo 4 se caracterizó la cadena de suministro a través del cálculo del exponente de escalamiento de una distribución de ley de potencia $p(x)$, tal que,

$$p(x) \approx |x|^{-(1+\gamma)} \quad (5.1)$$

en donde los valores obtenidos estuvieron dentro del rango $1 < \gamma < 2$. La suma de variables independientes e idénticamente distribuidas de un proceso estocástico $S_n = \sum_{i=1}^n x_i$ caracterizado por la ecuación 5.1 converge hacia un proceso estocástico Levy estable con índice γ cuando n tiende a infinito [111].

Para el desarrollo del modelo se considera a la variable aleatoria de la demanda de refacciones como una variable discreta estable, ya que esta provee una mejor aproximación al comportamiento de la variable versus una consideración de variable continua [112, 113, 114, 115].

5.1. Construcción del modelo dinámico

De acuerdo con Steutel y van Harn [116, 117], una variable aleatoria discreta estable D se describe a través de su función generadora de probabilidad (fgp) como,

$$P(z) = E [z^D] = \exp(-\lambda(1-z)^\gamma), \quad z \in [0, 1], \quad (5.2)$$

donde $0 < \gamma \leq 1$ y $\lambda > 0$. Cuando el valor del exponente $\gamma = 1$, entonces la distribución resultante es Poisson. Cuando el valor del exponente $\gamma < 1$, entonces [116, 117],

$$E[D] = \infty \quad (5.3)$$

y por lo tanto no existe ningún momento para la ecuación 5.2. De manera canónica la función de probabilidad de masa de la ecuación 5.2, se puede representar como [118],

$$(s+1)P(D=s+1) = \lambda \sum_{m=0}^s P(D=s-m)(m+1)(-1)^m \binom{\gamma}{m+1} \quad (5.4)$$

para $s = 0, 1, 2, \dots$ y $P(D=0) = e^{-\lambda}$. Denótese,

λ	= tasa de fallas (Proceso Poisson)
λ^γ	= tasa de fallas (Proceso discreto estable)
L	= tiempo de reabastecimiento del stock
Q	= tamaño de lote
r	= punto de reorden
s	= nivel de inventario-base = $r + 1$
t	= variable del tiempo continuo, $t \geq 0$
$D(t)$	= demanda acumulada hasta el tiempo t (Proceso Poisson)
$D^\gamma(t)$	= demanda acumulada hasta el tiempo t (Proceso discreto estable)
γ	= exponente de estabilidad de D
ω	= nivel de servicio

De acuerdo con Orsingher y Polito [119], la ecuación similar de 5.2 de la función generadora de probabilidad para un proceso discreto estable¹ es,

$$P_\gamma(z, t) = E[z^{D^\gamma(t)}] = \exp(-\lambda^\gamma t(1-z)^\gamma), \quad z \in [0, 1], \quad (5.5)$$

Cuando $\gamma = 1$, la ecuación 5.5 corresponde a un proceso Poisson. Similar a 5.4, la distribución de probabilidad de la variable del proceso discreto estable es,

$$(s+1)P_\gamma(D^\gamma(t) = s+1) = \lambda^\gamma t \sum_{m=0}^s P_\gamma(D^\gamma(t) = s-m)(m+1)(-1)^m \binom{\gamma}{m+1} \quad (5.6)$$

¹Que coincide con un proceso Poisson espacio-fraccional [119].

para $s = 0, 1, 2, \dots$, $P_\gamma(D^\gamma(t) = 0) = e^{-\lambda^\gamma t}$ y $\{D^\gamma(t), t \geq 0 | D^\gamma(0) = 0\}$.

Una vez que ya se tiene definido la distribución de masa del proceso de la demanda durante el tiempo de entrega L , se construye el modelo establecido en el objetivo general definido en la sección 1.2, el cual utiliza algunas consideraciones establecidas en la sección 3.3.2 para el modelo de inventarios $(S - 1, S)$.

Para calcular las medidas de desempeño del sistema. Sea g_s la función de probabilidad de masa de D durante el tiempo de entrega L , es decir, $P_\gamma\{D = s\}$, G_s la distribución acumulada, es decir, $P_\gamma\{D \leq s\}$, G_s^0 su distribución acumulada complementaria, es decir, $P_\gamma\{D > s\}$, y G_s^1 la función de pérdida, es decir, $E[(D - s)^+]$ [57]. Entonces se tiene que g_s se calcula recursivamente de acuerdo a la ecuación 5.6 y,

$$G_s = \sum_{y \leq s} g_s(y) \quad (5.7)$$

$$G_s^0 = 1 - G_s \quad (5.8)$$

$$G_s^1 = E[D] - \sum_{0 \leq y < s} G_y^0 \quad s \geq 0 \quad (5.9)$$

$$\omega = 1 - G_s^0 \quad (5.10)$$

Dado que en la ecuación 5.3 se indica $E[D] = \infty$, entonces G_s^1 es también infinito, y por consiguiente no se puede calcular el nivel de backorder de la ecuación 3.15, ni el inventario disponible de la ecuación 3.16.

5.2. Generación de escenarios de la cadena de suministro

Para la generación de escenarios con el modelo descrito en la sección 5.1, se compara el modelo de inventarios tradicional con distribución Poisson para la demanda versus el modelo que considera una distribución discreta estable. Los valores que se consideran para λ son 0.5, 1 y 2, y para el exponente de escalamiento γ son 0.1, 0.5 y 0.9. Y L igual a 0.5 y 1. El valor de $\gamma = 1$ no se considera ya que este corresponde a una distribución Poisson. Los resultados se observan en las tablas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6, así como en las figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6.

S	ω para DE $\gamma = 0,1$	ω para DE $\gamma = 0,5$	ω para DE $\gamma = 0,9$	ω para Poisson
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.62	0.70	0.76	0.77
2	0.65	0.82	0.94	0.97
3	0.67	0.86	0.98	0.99
4	0.68	0.89	0.98	0.99
5	0.68	0.90	0.99	0.99
6	0.69	0.91	0.99	1.00
7	0.70	0.92	0.99	1.00
8	0.70	0.92	0.99	1.00
9	0.70	0.93	0.99	1.00
10	0.71	0.93	0.99	1.00

Tabla 5.1: Comparación del nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 0,5$ y $\lambda = 0,5$.

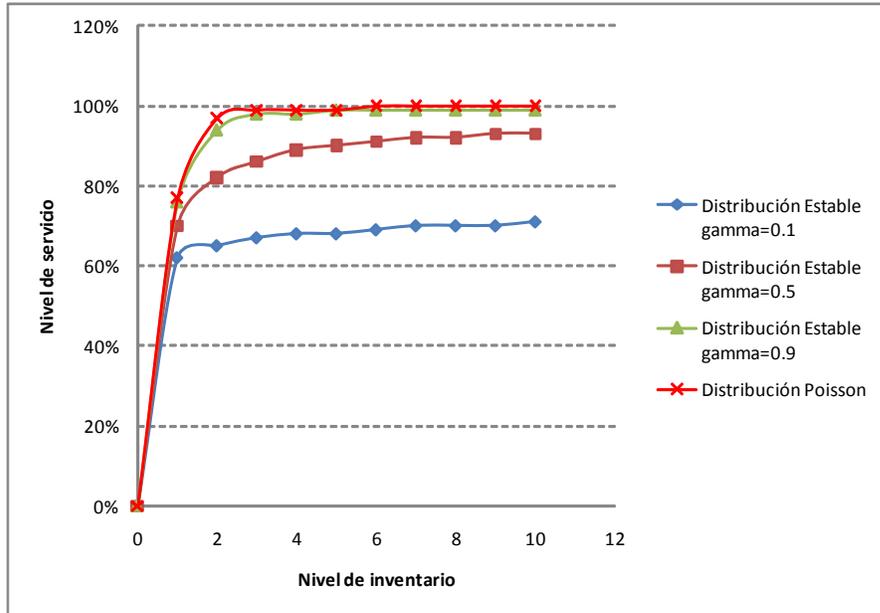


Figura 5.1: Gráfica que compara el nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 0,5$ y $\lambda = 0,5$.

S	ω para DE $\gamma = 0,1$	ω para DE $\gamma = 0,5$	ω para DE $\gamma = 0,9$	ω para Poisson
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.60	0.60	0.60	0.60
2	0.63	0.75	0.87	0.90
3	0.65	0.81	0.95	0.98
4	0.66	0.84	0.97	0.99
5	0.66	0.86	0.98	0.99
6	0.67	0.87	0.98	0.99
7	0.67	0.88	0.98	0.99
8	0.68	0.89	0.99	1.00
9	0.68	0.90	0.99	1.00
10	0.68	0.90	0.99	1.00

Tabla 5.2: Comparación del nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 0,5$ y $\lambda = 1$.

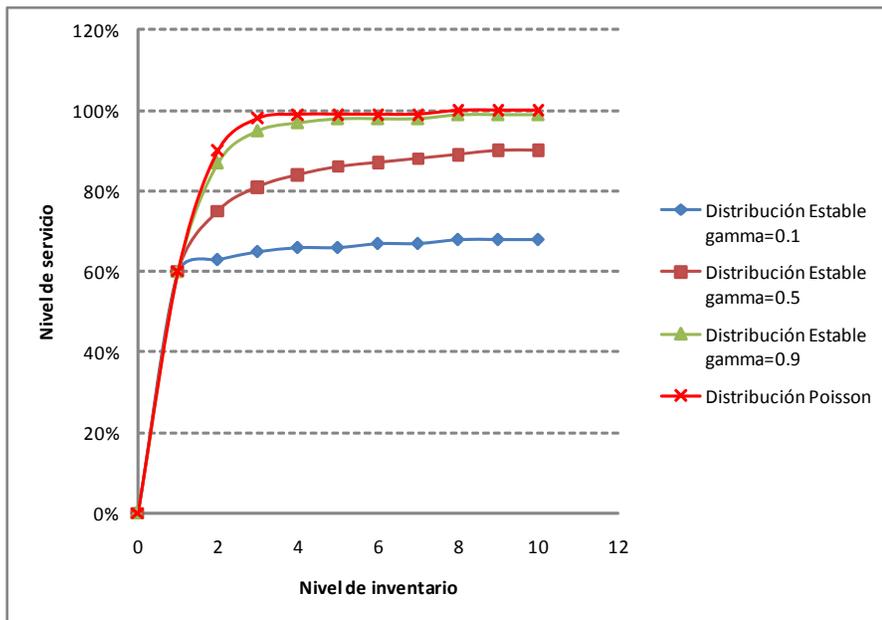


Figura 5.2: Gráfica que compara el nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 0,5$ y $\lambda = 1$.

S	ω para DE $\gamma = 0,1$	ω para DE $\gamma = 0,5$	ω para DE $\gamma = 0,9$	ω para Poisson
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.58	0.49	0.39	0.36
2	0.61	0.66	0.72	0.73
3	0.63	0.74	0.87	0.91
4	0.63	0.77	0.94	0.98
5	0.64	0.80	0.96	0.99
6	0.64	0.82	0.97	0.99
7	0.64	0.83	0.98	0.99
8	0.65	0.84	0.98	0.99
9	0.65	0.85	0.98	0.99
10	0.65	0.86	0.98	1.00

Tabla 5.3: Comparación del nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 0,5$ y $\lambda = 2$.

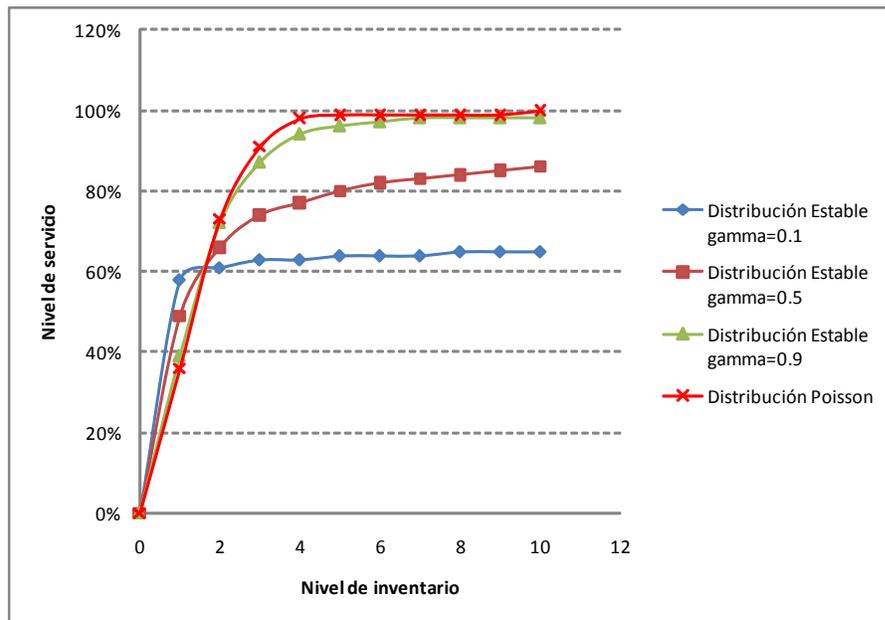


Figura 5.3: Gráfica que compara el nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 0,5$ y $\lambda = 2$.

S	ω para DE $\gamma = 0,1$	ω para DE $\gamma = 0,5$	ω para DE $\gamma = 0,9$	ω para Poisson
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.39	0.49	0.58	0.60
2	0.43	0.66	0.86	0.90
3	0.44	0.74	0.94	0.98
4	0.46	0.78	0.97	0.99
5	0.47	0.81	0.97	0.99
6	0.48	0.83	0.98	0.99
7	0.49	0.84	0.98	0.99
8	0.50	0.85	0.98	1.00
9	0.51	0.86	0.98	1.00
10	0.51	0.87	0.98	1.00

Tabla 5.4: Comparación del nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 1$ y $\lambda = 0,5$.

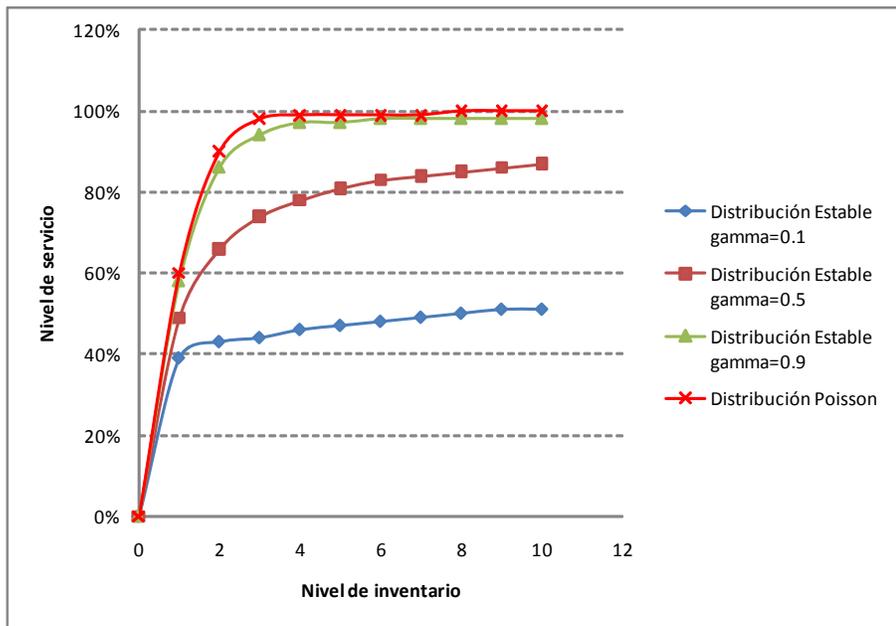


Figura 5.4: Gráfica que compara el nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 1$ y $\lambda = 0,5$.

S	ω para DE $\gamma = 0,1$	ω para DE $\gamma = 0,5$	ω para DE $\gamma = 0,9$	ω para Poisson
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.36	0.36	0.36	0.36
2	0.40	0.55	0.69	0.73
3	0.42	0.64	0.86	0.91
4	0.43	0.69	0.93	0.98
5	0.44	0.73	0.95	0.99
6	0.45	0.75	0.96	0.99
7	0.45	0.77	0.97	0.99
8	0.46	0.79	0.97	0.99
9	0.46	0.80	0.98	0.99
10	0.47	0.81	0.98	1.00

Tabla 5.5: Comparación del nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 1$ y $\lambda = 1$.

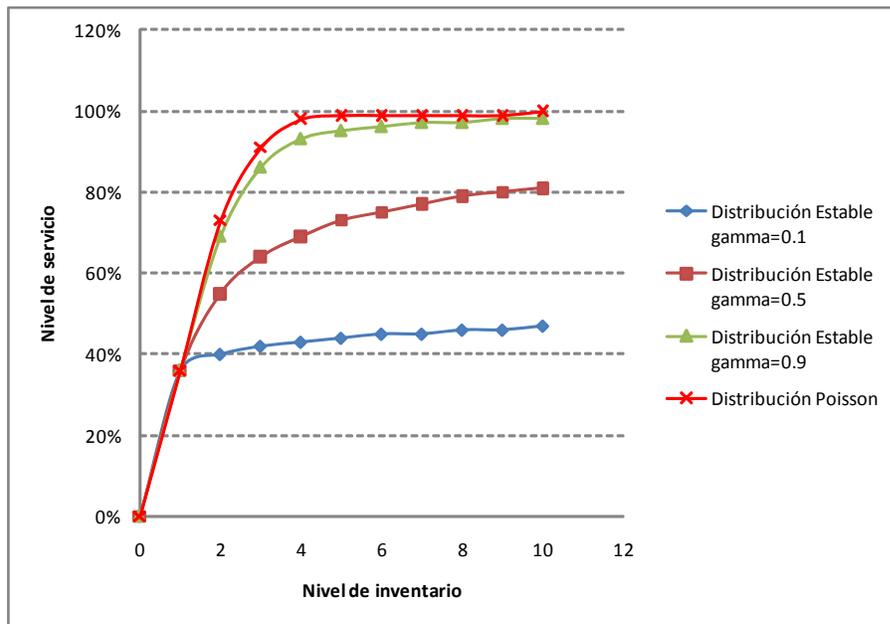


Figura 5.5: Gráfica que compara el nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 1$ y $\lambda = 1$.

S	ω para DE $\gamma = 0,1$	ω para DE $\gamma = 0,5$	ω para DE $\gamma = 0,9$	ω para Poisson
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.34	0.14	0.14	0.13
2	0.37	0.27	0.38	0.40
3	0.39	0.37	0.61	0.67
4	0.40	0.45	0.77	0.85
5	0.40	0.50	0.86	0.94
6	0.41	0.54	0.91	0.98
7	0.41	0.57	0.93	0.99
8	0.41	0.60	0.95	0.99
9	0.41	0.62	0.95	0.99
10	0.42	0.64	0.96	0.99

Tabla 5.6: Comparación del nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 1$ y $\lambda = 2$.

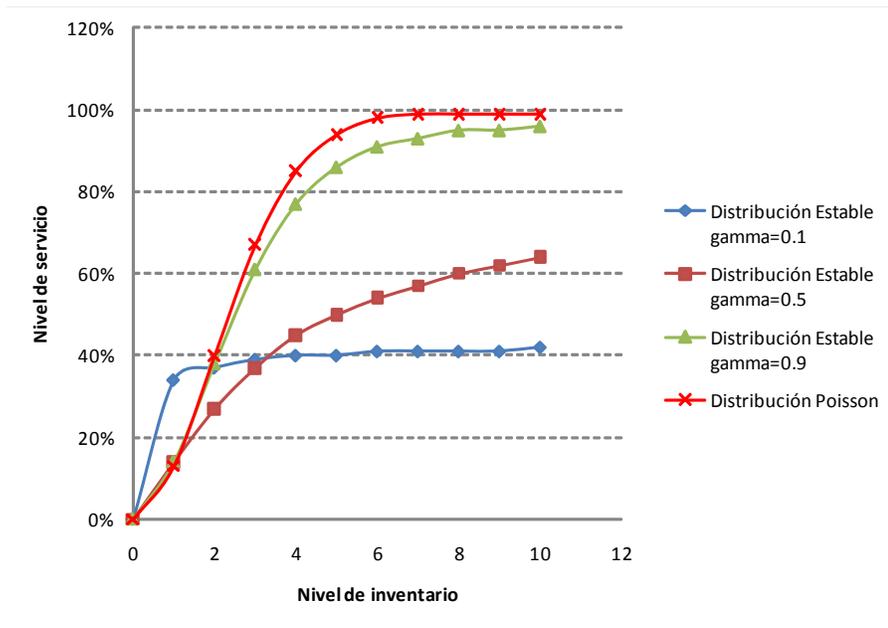


Figura 5.6: Gráfica que compara el nivel de servicio para $s = 0, 1, \dots, 10$, calculado de acuerdo a la demanda discreta estable versus Poisson para $L = 1$ y $\lambda = 2$.

5.3. Discusión de resultados

En la literatura los modelos de refacciones consideran que la demanda o fallas de las tarjetas se modele a través de un proceso Poisson.

El modelo de inventarios presentado en este Capítulo incorpora un parámetro que permite que la variable discreta sea de colas pesadas. Específicamente la variable aleatoria es una discreta estable, la cual incluye a la Poisson cuando su exponente de estabilidad es de $\gamma = 1$.

De los escenarios generados en la sección 5.2, se observa que el nivel de servicio requiere cada vez una mayor cantidad de inventario para el proceso discreto estable versus el proceso Poisson conforme γ está más cerca del valor cero, esto es, que la cola de la distribución es más prolongada, y también se observa este comportamiento cuando incrementa el valor de λ y/o de L .

Conclusiones

El presente trabajo de investigación estudia (i) el sistema que involucra el servicio post-venta de refacciones a una red de Telecomunicaciones y (ii) presenta un modelo de inventarios para las refacciones. El sistema del servicio post-venta de refacciones se describe a través del Modelo de de Sistemas Viables de Beer [7]. Utilizando dicha metodología, se describen las jerarquías e interacciones del sistema y se define el subsistema que involucra el análisis y caracterización de la cadena de suministro de las refacciones en el capítulo 4 y la creación del modelo de inventarios en el capítulo 5.

Para el análisis y caracterización del sistema en estudio, se utilizaron técnicas de fractales y de redes complejas para análisis de las series de tiempo. De este estudio se comprobó que las series de tiempo contemplan memoria a largo plazo y que conforme se avanza en la cadena de suministro la varianza en las series de tiempo aumenta conforme el tiempo de abastecimiento es mayor, esto es, que la cadena de suministro experimenta el efecto látigo. Estos resultados son fundamentales para la creación del modelo de inventarios en el capítulo 5, ya que en la literatura, el modelo de la demanda contemplaba que esta es un proceso Poisson, pero los resultados para los datos analizados mostraron que la demanda se ajusta a una distribución de colas pesadas.

Basado en los resultados anteriores, en el capítulo 5 se construye el modelo de inventarios utilizando una variable aleatoria discreta estable para modelar la demanda, y así construir el modelo completo. Del análisis numérico del modelo versus el modelo con una demanda Poisson, se observó que el nivel de servicio considerando la variable discreta estable requiere mayores cantidades de stock para todos los casos en donde el nivel de stock fue fijado en 10 unidades. Esto es debido a que la distribución de probabilidad de la variable discreta estable converge más lentamente a 1 que una variable Poisson.

Trabajos futuros

Durante el desarrollo de este trabajo de investigación se observó la posibilidad de profundizar en diversos temas:

- Utilizar otras metodologías para el cálculo del exponente de Hurst y hacer ms robustas las conclusiones presentadas en la sección 4.2.
- Desarrollar un modelo de inventarios que optimice los costos considerando a la demanda como discreta estable.
- Desarrollar un modelo de inventarios utilizando un proceso Poisson fraccional, el cuál es una generalización del proceso Poisson, esto es, que lo incluye cuando su exponente de escalamiento $\gamma = 1$ [119, 120].
- Elaborar un artículo del modelo de inventarios considerando una demanda discreta estable y/o Poisson fraccional, para publicarse en revista de investigación de operaciones.

Referencias bibliográficas

- [1] Robin O. Roundy and Gennady Samorodnitsky. Optimal and near-optimal (s,S) inventory policies for levy demand processes. *RAIRO Operations Research*, 35:37–70, 2001.
- [2] F. Kuhlmann and A. Alonso. *Información y Telecomunicaciones*. Fondo de Cultura Económica, La ciencia para todos 149, 3ra edition, 2003.
- [3] Miguel A. Luna. Competencia en telecomunicaciones. *Ejecutivos de Finanzas*, pages 12–16, Marzo 2008.
- [4] Angelina Mejía. Periódico El Universal, 14 de Marzo 2007.
- [5] Angelina Mejía. Periódico El Universal, 7 de Febrero 2007.
- [6] Dan O’Shea. *Managed Services Have Net Effect*. Primedia Insight, Enero 2006.
- [7] Stafford Beer. The viable system model: its provenance, development, methodology and pathology. In Raúl Espejo and Roger Harnden, editors, *The Viable System Model, Interpretations and Applications of Stafford Beer’s VSM*, chapter 1. John Wiley & Sons, 1989.
- [8] Yaneer Bar-Yam. *Making things work, solving complex problems in a complex world*. NECSI Knowledge Press, 2004.
- [9] Nino Boccara. *Modeling Complex Systems*. Springer, NY, 2004.
- [10] C.C. Sherbrooke. Metric: A multi-echelon technique for recoverable item control. *Operations Research*, 23:122–141, 1968.

- [11] C.C. Sherbrooke. *Optimal Inventory, Modeling of Systems. Multi-Echelon Techniques*. Kluwer Academic Publishers, segunda edition, 2004.
- [12] Stephen C. Graves. A multi-echelon inventory model for a repairable item with one for one replenishment. *Management Science*, 31:1247–1256, 1985.
- [13] John A. Muckstadt. *Analysis and Algorithms for Service Parts Supply Chains*. Springer, 2005.
- [14] E. Julio Muños Martínez. El método experimental. In Gerardo Hernández and Luis Mauricio Rodríguez, editors, *Filosofía de la experiencia y ciencia experimental*, chapter 1. Fondo de Cultura Económica, 2003.
- [15] Ruy Pérez Tamayo. *Existe el método científico?* Fondo de Cultura Económica, 2007.
- [16] Samir Okasha. *Philosophy of Science, A very short introduction*. Oxford, 2002.
- [17] E. T. Jaynes. *Probability theory, The logic of science*. Cambridge University Press, 2003.
- [18] Rosaura Ruiz and Francisco J. Ayala. *El método en las ciencias. Epistemología y darwinismo*. Fondo de Cultura Económica, 2004.
- [19] Russell L. Ackoff. A note on Systems Science. *Interfaces*, 2(4):40–41, 1972.
- [20] Albert-László Barabási. *Linked, How everything is connected to everything else and what it means for business, science, and everyday life*. Plume, 2003.
- [21] Mario Bunge. *Emergencia y convergencia, Novedad cualitativa y unidad del conocimiento*. Editorial Gedisa, 2003.
- [22] Len Troncale. Revisited: The future of general systems research: Updates on obstacles, potentials, case studies. *Systems Research and Behavioral Science*, 26:553–561, 2009.

- [23] Ludwig von Bertalanffy. *Teoría general de los sistemas*. Fondo de Cultura Económica, México, 2006.
- [24] Vitaly Dubrovsky. Toward system principles: General system theory and the alternative approach. *Systems Research and Behavioral Science*, 21:109–122, 2004.
- [25] Peter Checkland. Soft systems methodology: a thirty year retrospective. *Systems Research and Behavioral Science*, 17:11–58, 2000.
- [26] Richard Foote. Mathematics and complex systems. *Science*, 318:410–412, Octubre 2007.
- [27] Jianbo Gao, Yinhe Cao, Wen-Wen Tung, and Jing Hu. *Multiscale analysis of complex time series*. Wiley, 2007.
- [28] Rolando García. *Sistemas complejos. Conceptos, métodos y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Editorial Gedisa, 2008.
- [29] Yan Zexian. A new approach to studying complex systems. *Systems Research and Behavioral Science*, 24:403–416, 2007.
- [30] John D. Sterman. *Business Dynamics, System Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill, EUA, 2000.
- [31] Yaneer Bar-Yam. *Dynamics of complex systems*. Westview Press, 1997.
- [32] Ilya Prigogine. *Las leyes del caos*. Crítica, 2004.
- [33] Hermann Haken. *Information and self-organization. A macroscopic approach to complex systems*. Springer, 2006.
- [34] John H. Holland. *El orden oculto, de como la adaptación crea la complejidad*. Fondo de Cultura Económica, 2004.
- [35] Chao Tang and Per Bak. Critical exponents and scaling relations for self-organized critical phenomena. *Physical Review Letters*, 60(23):2347–2350, 1988.
- [36] Mark Newman, Albert-László Barabási, and Duncan J. Watts. *The Structure and Dynamics of Networks*. Princeton University Press, 2006.

- [37] Duncan J. Watts. *Small Worlds, The dynamics of networks between order and randomness*. Princeton University Press, 1999.
- [38] Benoît Mandelbrot. *La geometría fractal de la naturaleza*. Tusquets, 2003.
- [39] Alexander Balankin. Fractal behavior of complex systems. *Científica*, 7(3):109–128, 2003.
- [40] W.R. Ashby. *An introduction to cybernetics*. Chapman and Hall, 1957.
- [41] Stafford Beer. *Brain of the firm*. The Penguin Press, 1972.
- [42] P. Kinloch, H. Francis, M. Francis, and M. Taylor. Supporting crime detection and operational planning with soft systems methodology and viable systems model. *Systems Research and Behavioral Science*, 26:3–14, 2009.
- [43] Wallace J. Hopp. *Supply Chain Science*. McGraw-Hill, NY, 2008.
- [44] D. Simchi-Levi, P. Kaminsky, and E. Simchi-Levi. *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies and Case Studies*. McGraw-Hill, NY, 2003.
- [45] K. L. Hartley. Defining effective service level agreements for network operation and maintenance. *Bell Labs Technical Journal*, 9(4):139–143, 2005.
- [46] Béla Bollobás. *Modern Graph Theory*. Springer, 1998.
- [47] Sergey N. Dorogovtsev. *Lectures on Complex Networks*. Oxford University Press, 2010.
- [48] María del Carmen Hernández A. *Introducción a la teoría de redes*. Sociedad Matemática Mexicana, 1997.
- [49] F. Chung and L. Lu. *Complex Graphs and Networks*. American Mathematical Society, 2006.
- [50] F. Chung. Graph theory in the information age. *Notices of the AMS*, 57(6):726–732, 2010.

- [51] D. Watts and S. Strogatz. Collective dynamics of small world networks. *Nature*, 393.
- [52] A. Barrat, M. Barthélemy, and A. Vespignani. *Dynamical processes on complex networks*. Cambridge University Press, 2008.
- [53] A.L. Barabási and R. Albert. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286.
- [54] S. Dorogovtsev, J. Mendes, and A. Smukhin. Structure of growing networks with preferential linking. *Phys. Rev. Lett.*, 85(21):4632–4633, 2000.
- [55] F. Chung, L. Lu, T.G. Dewey, and D.J. Galas. Duplication models for biological networks. *J. Comput. Biol.*, 10(5):677–687, 2003.
- [56] David Simchi-Levi. *Operations Rules*. The MIT Press, 2010.
- [57] Paul Zipkin. *Foundations of inventory management*. McGraw-Hill, 2000.
- [58] Ford Harris. How many parts to make at once. *Factory, The Magazine of Management*, 10(152):135–136, 1913.
- [59] D. Erlenkotter. An early classic misplaced: Ford W. Harris economic order quantity model of 1915. *Management Science*, 35:898–900, 1989.
- [60] D. Erlenkotter. Ford Whitman Harris and the economic order quantity model. *Operations Research*, 38:937–946, 1990.
- [61] R. Raymond. *Quantity and Economic in Manufacture*. McGraw-Hill, New York, 1931.
- [62] K. Arrow, T. Harris, and J. Marschak. Optimal inventory policy. *Econometrica*, 19:250–272, 1951.
- [63] A. Dvoretzky, J. Kiefer, and J. Wolfowitz. The inventory problem. *Econometrica*, 20:187–222, 1952.
- [64] K. Arrow, S. Karlin, and H. Scarf. *Studies in the mathematical theory of inventory and production*. Stanford University Press, 1958.

- [65] G. Hadley and T.M. Whitin. *Analysis of inventory system*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1963.
- [66] E. Porteus. Stochastic inventory theory. In D. Heyman and M. Sobel, editors, *Stochastic Models, Handbook in OR&MS*, chapter 12. Elsevier (North-Holland), Amsterdam, 1990.
- [67] Hau L. Lee and Steven Nahmias. Single-product, single-location models. In Steven Graves et al, editor, *Handbook in OR&MS*, volume 4, chapter 1. Elsevier Science, 1993.
- [68] Sven Axsäter. *Inventory control*. Springer, NY, segunda edition, 2006.
- [69] John A. Muckstadt and Amar Sapra. *Principles of Inventory Management, When you are down to four order more*. Springer, 2010.
- [70] H.P. Galliher, Philip M. Morse, and M. Simond. Dynamics of two classes of continuous-review inventory systems. *Operation Research*, 7:362–384.
- [71] Donald Gross and Carl M. Harris. On one-for-one-ordering inventory policies with state-dependent leadtimes. *Operation Research*, 19:735–760, 1971.
- [72] A. Clark and H. Scarf. Optimal policies for a multi-echelon inventory problem. *Management Science*, 6(4):475–490, 1960.
- [73] Antony Svoronos and Paul Zipkin. Evaluation of one-for-one replenishment policies for multiechelon inventory systems. *Management Science*, 37:68–83.
- [74] W.J. Kennedy, J. Wayne Patterson, and Lawrence D. Fredendall. An overview of recent literature on spare parts inventories. *International Journal of Production Economics*, 76:201–215.
- [75] S. Nahmias. Managing repairable item inventory systems: A review. In L. B. Schwarz, editor, *Multi-Level Production/Inventory Control Systems: Theory and Practice*, pages 253–277. North Holland Amsterdam.
- [76] Thomas Spengler and Marcus Schröter. Strategic management of spare parts in closed-loop supply chains - A system dynamics approach. *Interfaces*, 33(6):7–17, 2003.

- [77] D.R. Cox and H.D. Miller. *The theory of stochastic processes*. Chapman and Hall, 1972.
- [78] G. Grimmett and D. Stirzaker. *Probability and random processes*. Oxford, 2001.
- [79] Henk C. Tijms. *Stochastic models, an algorithmic approach*. John Wiley & Sons, 1994.
- [80] R. Knüsel and S Iacono. Computation of the chi-square and poisson distribution. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computation*, 7:1022–1036, 1986.
- [81] R. Tyrrel Rockafellar. *Convex analysis*. Princeton University Press, NY, 1970.
- [82] John Little. A proof for the queuing formula: $L = \lambda W$. *Operation Research*, 9:383–387, 1961.
- [83] Carlos F. Daganzo. A theory of supply chains. In *Lecture notes in economics and mathematical systems*, number 526. Springer, 2003.
- [84] Carlos F. Daganzo. On the stability of supply chains. *Operations Research*, 52(6):909–921, Noviembre-Diciembre 2004.
- [85] G. F. Newell. *Applications of queueing theory*. Chapman Hall, Londres, 1971.
- [86] H. Lee, V. Padmanabhan, and S. Whang. The bullwhip effect in supply chains. *Sloan Management Review*, pages 93–102, Spring 1997.
- [87] J. Forrester. Industrial dynamics: A major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review*, 36:37–66, 1958.
- [88] J. D. Sterman. Modeling managerial behavior: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. *Management Science*, 35(3):321–339, 1989.
- [89] A. Caplin. The variability of aggregate demand with (s,S) inventory policies. *Econometrica*, 53:1395–1409, 1985.

- [90] Dirk Helbing. Modeling supply networks and business cycles as unstable transport phenomena. *New Journal of Physics*, 5, 2003.
- [91] Dirk Helbing. Modeling and optimization of production processes: Lessons from traffic dynamics. In G. Radons and R. Neugebauer, editors, *Nonlinear Dynamics of Production Systems*. Wiley-VCH, 2004.
- [92] D. Helbing and S. Lämmer. Supply and production networks: From the bullwhip effect to business cycles. http://www.unifr.ch/econophysics/paper/show/w/helbing/c/Papers/page/4/id/sfi_0412033, 2004. Econophysics Forum.
- [93] J. Dejonckheere, S. Disney, M. Lambrecht, and D. Towill. Transfer function analysis of forecasting induced bullwhip in supply chains. *International Journal of Production Economics*, 78:133–144, 2002.
- [94] M. Jakšič and B. Rusjan. The effect of replenishment policies on the bullwhip effect, a transfer function approach. *European Journal of Operational Research*, 184:946–961, 2008.
- [95] S. Disney. Supply chain aperiodicity, bullwhip and stability analysis with Jury’s inners. *IMA Journal of Management Mathematics*, 19:101–116, 2008.
- [96] X Zhang. The impact of forecasting methods on the bullwhip effect. *International Journal of Production Economics*, 88:15–27, 2004.
- [97] K. Gilbert. An ARIMA supply chain model. *Management Science*, 51(2):305–310, Febrero 2006.
- [98] H. Lee, V. Padmanabhan, and S. Whang. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. *Management Science*, 43(4):413–427, 2002.
- [99] F. Chen, Z. Drezner, J. Ryan, and D. Simchi-Levi. Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain; the impact of forecasting, lead times, and information. *Management Science*, 46(3):436–443, Marzo 2000.
- [100] Richard Courant and Herbert Robbins. *Que son las matemáticas*. Fondo de Cultura Económica, 2002.

- [101] David Mumford, Caroline Series, and David Wright. *Indra's Pearls, The vision of Felix Klein*. Cambridge University Press, 2002.
- [102] Benoît Mandelbrot. *Gaussian self-affinity and fractals*. Springer, 2002.
- [103] Alexander Balankin. Physics of fracture and mechanics of self-affine cracks. *Engineering Fracture Mechanics*, 57(2/3):135–203, 1997.
- [104] Enric Monte, Josep Roca, and Lluís Vilardell. On the self-similar distribution of the emergency ward arrivals time series. *Fractals*, 10(4):413–427, 2002.
- [105] J. Beran. *Statistics for Long-Memory Processes*. Chapman and Hall, 1994.
- [106] L. Lacasa, B. Luque, J. Luque, and J. Nuño. The visibility graph: A new method for estimating the hurst exponent of fractional brownian motion. *Europhys. Lett.*, 86:30001, 2009.
- [107] L. Lacasa, B. Luque, F. Ballesteros, J. Luque, and J. Nuño. From time series to complex networks: The visibility graph. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 105(13):4972–4975, 2008.
- [108] A. Clauset, C.R. Shalizi, and M.E.J. Newman. Power-law distribution in empirical data. *SIAM Review*, 51(4):661–703, 2009.
- [109] Network Workbench Tool NWB Team. <http://nwb.slis.indiana.edu>, Indiana University, Northeastern University, and University of Michigan 2006.
- [110] C. Palm. Analysis of the erlang traffic formulae for busy-signal arrangements. *Ericsson Technics*, 4:39–58, 1938.
- [111] B. V. Gnedenko and A. N. Kolmogorov. *Limit distributions for sums of independent random variables*. Addison-Wesley, 1954.
- [112] M. E. J. Newman. Power laws, pareto distributions and zipf's law. *Contemporary Physics*, 46:323–351, 2005.
- [113] W. H. Lee, K. I. Hopcraft, and E. Jakeman. Continuous and discrete stable processes. *Physical Review E*, 77:011109, 2008.

- [114] K. I. Hopcraft, E. Jakeman, and J. O. Matthews. Discrete scale-free distributions and associated limit theorems. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 37:L635–L642, 2004.
- [115] M. Marcheselli, A. Baccini, and L. Barabesi. Parameter estimation for the discrete stable family. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 37:815–830, 2008.
- [116] F. W. Steutel and K. van Harn. Discrete analogues of self-decomposability and stability. *The Annals of Probability*, 7(5):893–899, 1979.
- [117] Fred W. Steutel and Klaas van Harn. *Infinite divisibility of probability distributions on the real line*. Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [118] Gerd Christoph and Karina Schreiber. Discrete stable random variables. *Statistics & Probability Letters*, 37:243–247, 1998.
- [119] Enzo Orsingher and Federico Polito. The space-fractional poisson process. arXiv:1107.2874v1, 2011.
- [120] Nick Laskin. Fractional poisson process. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 8:201–213, 2003.

Anexo A

Gráficas de redes

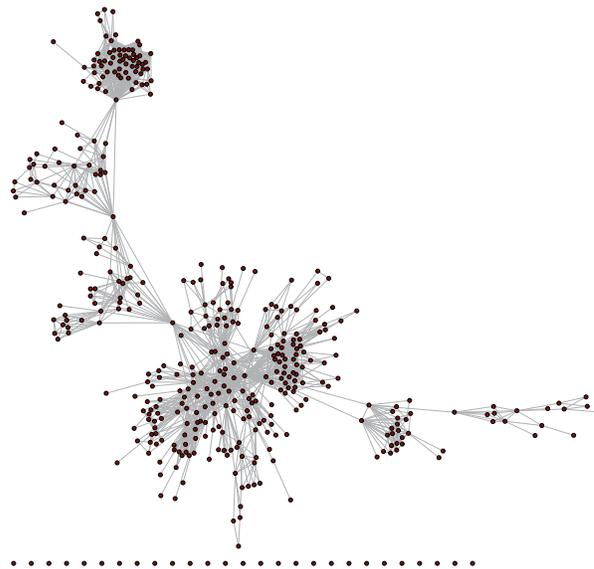


Figura A.1: Red correspondiente a la cola del proceso $ED(t)$.

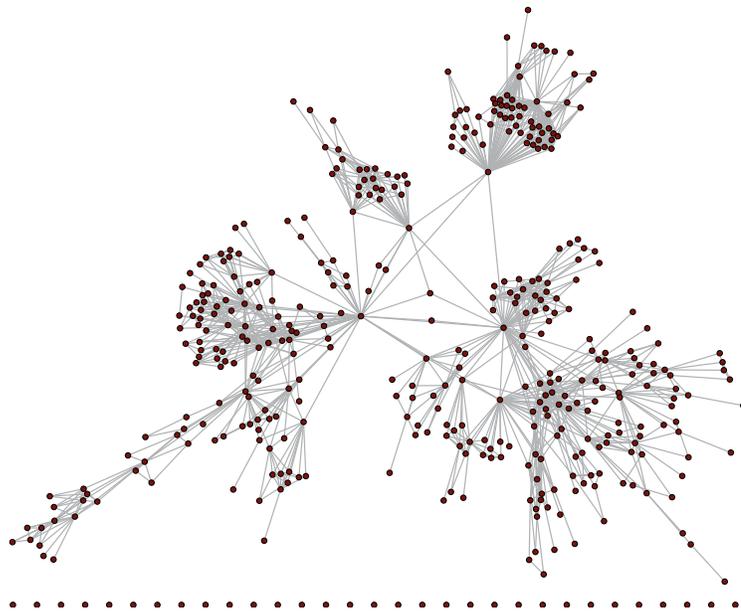


Figura A.2: Red correspondiente a la cola del proceso $ER(t)$.

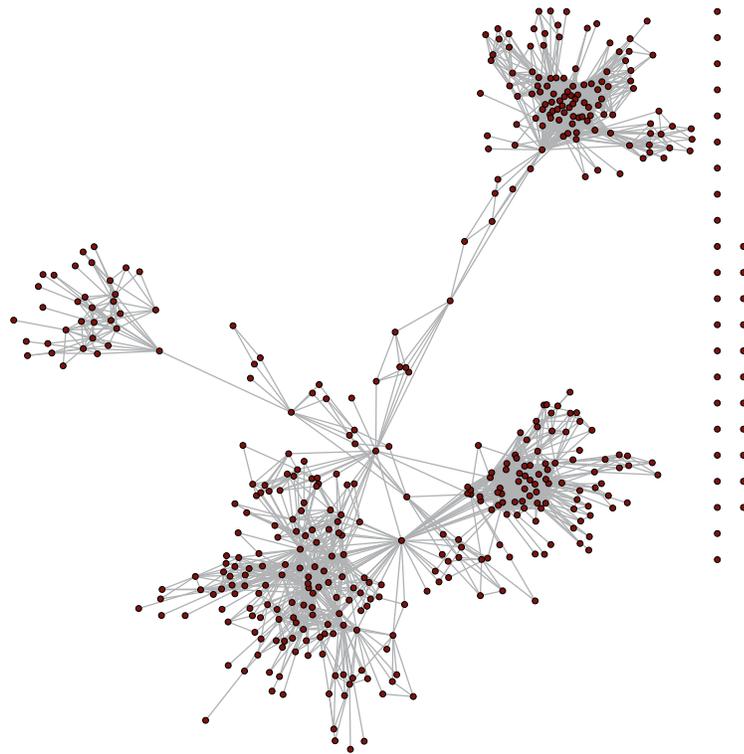


Figura A.3: Red correspondiente a la cola del proceso $RI(t)$.

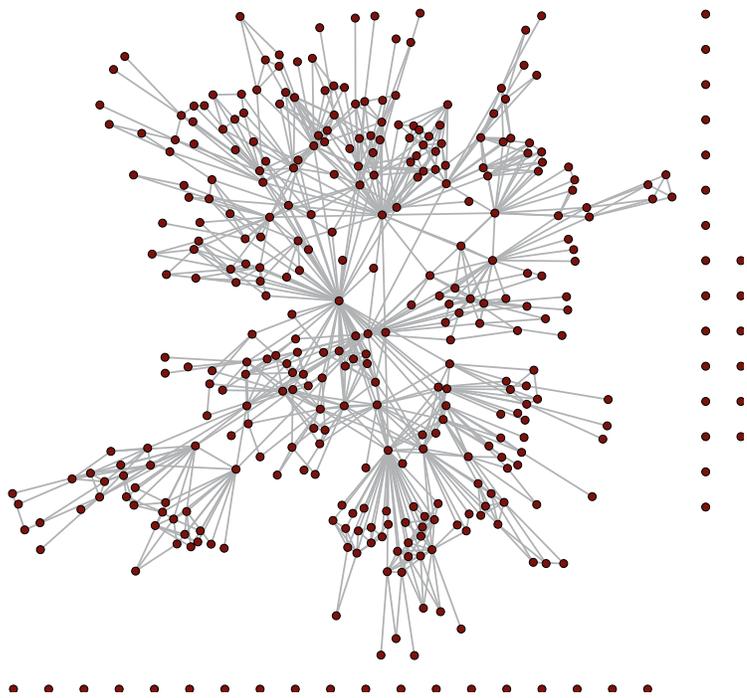


Figura A.4: Red correspondiente a la cola cuando $L = 1$.

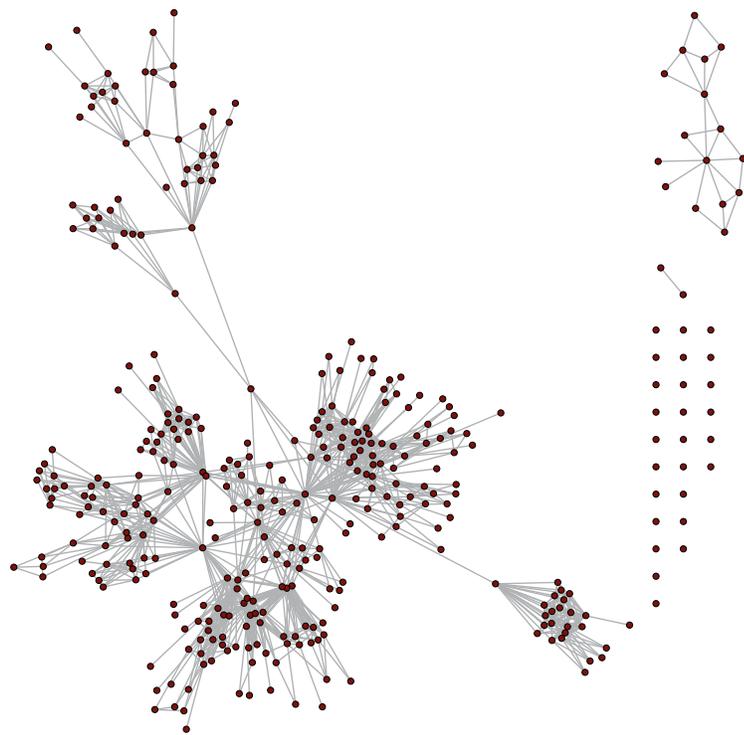


Figura A.5: Red correspondiente a la cola cuando $L = 7$.

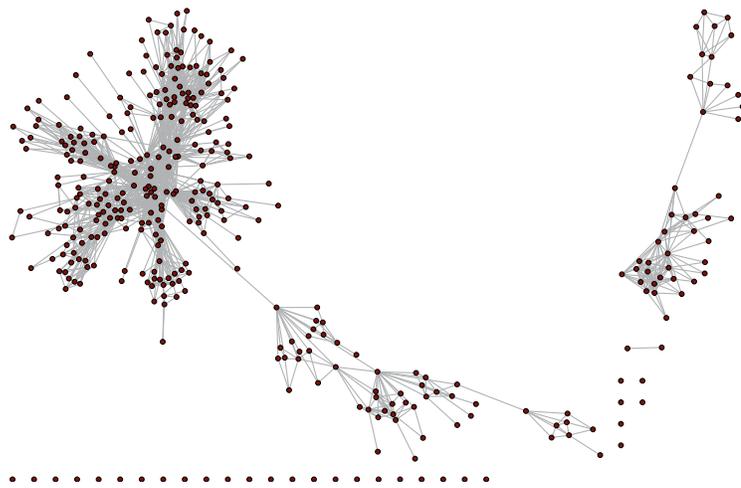


Figura A.6: Red correspondiente a la cola cuando $L = 14$.

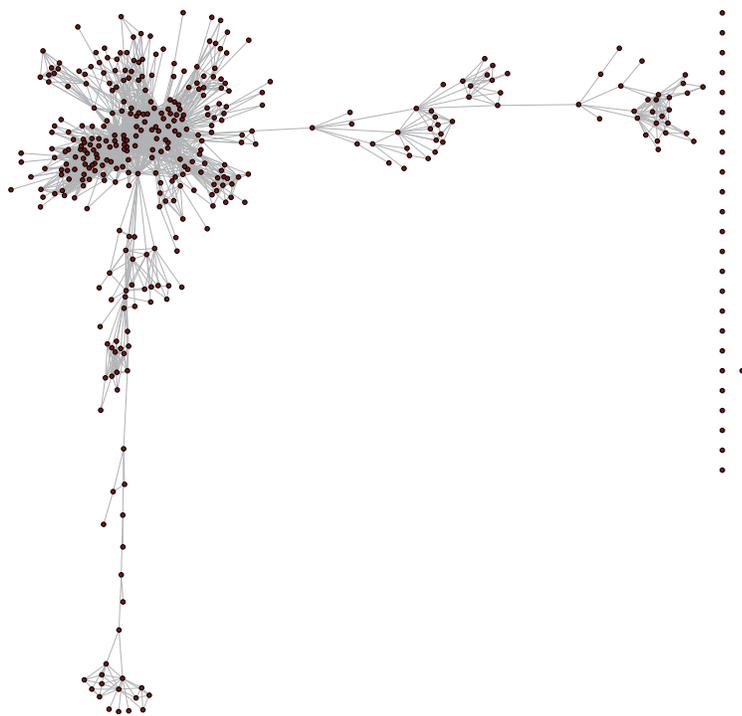


Figura A.7: Red correspondiente a la cola cuando $L = 30$.

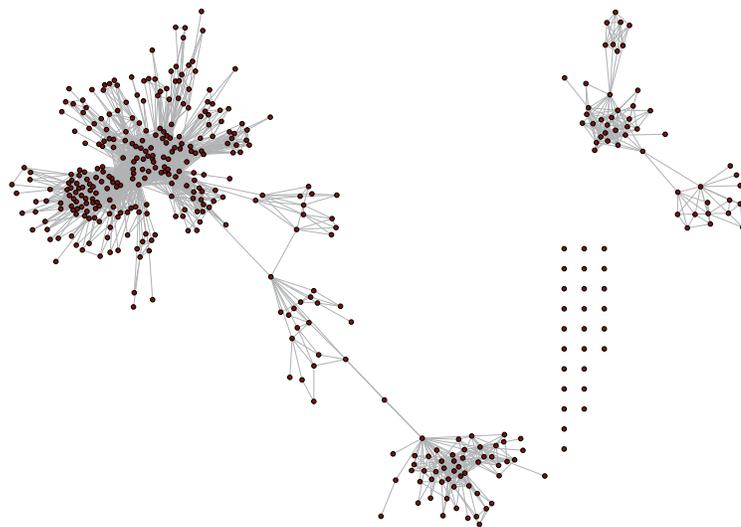


Figura A.8: Red correspondiente a la cola cuando $L = 60$.



Figura A.9: Red correspondiente a la cola cuando $L = 90$.

Anexo B

Glosario de Términos

- *Backorder* - término que viene del inglés y que significa pendiente. Es utilizado en la teoría de inventarios para referirse a aquella demanda que no es atendida desde el almacén en donde debería de estar, por no tener disponibilidad de inventario en el momento en el que esta surge, y que será atendida, una vez que se cuente con el inventario disponible en el almacén.
- *Cadena de suministro* - red de procesos y puntos de almacenamiento orientada a la entrega de bienes y servicios a los clientes.
- *Ciencia de Sistemas* - la Ciencia de Sistemas está aún en formación. Su desarrollo se distingue a través de las siguientes generaciones: la 1^a se desarrolla entre 1890 hasta 1950 en campos de la ingeniería y la milicia; la 2^a constituye el estudio de la Teoría General de Sistemas (TGS) desarrollada por Bertalanffy en 1950, quien formuló y derivó aquellos principios que eran válidos para los sistemas en general; la 3^a pertenece al estudio de los sistemas complejos; la 4^a corresponde al movimiento de la ciencia de sistemas naturales; y la 5^a se fundamenta en los problemas de los sistemas del sistema. El enfoque de la Ciencia de Sistemas es una alternativa tanto respecto al individualismo como al colectivismo.
- *Complejidad* - carácter de un sistema que presenta los aspectos siguientes: (i) Estar compuesto por una gran variedad de componentes o elementos dotados de funciones especializadas, (ii) Tener estos elementos organizados en niveles jerárquicos y/o anidados, y (iii) presentar interacciones no lineales entre elementos.

- *Demanda* - proceso por medio del cual se substraer material de algún inventario.
- *Distribución de colas pesadas* - es aquella cuya cola de la distribución decae siguiendo una ley de potencia.
- *Efecto látigo* - tendencia a incrementar la variación en las órdenes de suministro de cada eslabón de una cadena de suministro conforme se avanza en ella.
- *Exponente de escalamiento* - es el exponente de una ley de potencia.
- *Fractal* - objeto que presenta una estructura del mismo tipo, a diferentes escalas de observación. Se dice que el fractal presenta la propiedad de auto-similitud o auto-afinidad.
- *Inventario* - el inventario es el conjunto de mercancías o artículos que tiene la empresa para comercializar con aquellos, permitiendo la compra y venta o la fabricación primero antes de venderlos, en un periodo económico determinados.
- *Ley de potencia* - es una distribución de la forma $p(x) = Cx^\gamma$, donde C es una constante y γ es el exponente de escalamiento.
- *Modelo* - es un modo de pensar y entender el mundo y un modo de como resolver problemas.
- *Modelo de inventarios* - es aquel que involucra las variables importantes de una cadena de suministro para optimizar y/o hacer eficiente dicha cadena.
- *Nodo* - este corresponde al vértice de una red y puede estar o no conectado con otros nodos.
- *Nodo concentrador* - es aquel al cual se conectan muchos nodos de la red.
- *Proceso estocástico* - es un modelo matemático que describe la evolución de un fenómeno aleatorio a través del tiempo.
- *Proceso Poisson* - es un proceso estocástico de tiempo continuo que consiste en contar eventos raros que ocurren a lo largo del tiempo.

- *Pronóstico* - es el proceso de estimación en situaciones de incertidumbre. El término predicción es similar, pero más general, y generalmente se refiere a la estimación de series temporales o datos instantáneos.
- *Red* - conjunto de pares de vértices y arcos
- *Red compleja* - es aquella red que contiene las siguientes propiedades: fenómeno del mundo pequeño, el grado de la red se ajusta a una ley de potencia, el tamaño de la red es muy grande y la densidad de esta es $\ll 1$.
- *Refacción* - pieza para sustituir a otra igual.
- *Serie de tiempo* - llamemos serie de tiempo \bar{f} a un conjunto ordenado de valores $\bar{f} = \{f_i\}$, donde los valores de f_i están asociados biunívocamente a puntos consecutivos y equiespaciados $t_j = j\Delta t$ de la variable del dominio t . El valor de t asociado con cada valor f_j siempre crece conforme aumenta j , nunca decrece o permanece constante.
- *Servicio post-venta* - servicio que garantiza asistencia, mantenimiento o reparación de lo comprado a un vendedor o fabricante durante un plazo determinado.
- *Sistema* - Conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto. Un sistema concreto se constituye de una composición, un entorno, una estructura y un mecanismo.
- *Sistema Complejo* - son aquellos sistemas que tienen en común las siguientes características: (i) son inherentemente complicados o intrincados; (ii) raramente son completamente determinísticos, los datos pueden ser medidos sólo en términos probabilísticos; (iii) los sistemas tienen comportamientos emergentes; y (iv) los modelos matemáticos del sistema son usualmente complejos y contienen comportamientos no-lineales o caóticos.
- *Teoría de colas* - la Teoría de Colas es una formulación matemática para la optimización de sistemas en que interactúan dos procesos normalmente aleatorios: un proceso de “llegada de clientes” y un proceso de “servicio a los clientes”, en los que existen fenómenos de “acumulación de clientes en espera del servicio”, y donde existen reglas definidas (prioridades) para la “prestación del servicio”.

- *Variabilidad* - Cualidad de variable. Medida de la incertidumbre de una medición. Magnitud que puede tener un valor cualquiera de los comprendidos en un conjunto.
- *Variable continua* - es aquella que toma valores de números reales.
- *Variable discreta* - es aquella que toma valores de números enteros.

Anexo C

Publicaciones

- **Mauricio Flores**, Oswaldo Morales, Ricardo Tejeida, Isaías Badillo y Juan de la Cruz Mejía. The emergence of after-sales spare parts supply chain variability in a Telecom firm - A complex system approach, *Fractals*, artículo aceptado en 2011 y por aparecer en la revista. Núm. DOI 10.1142/S0218348X11005488.

WSPC Journals Online - Windows Internet Explorer
 http://www.worldscinet.com/fractals/99/accepted.shtml

Archivo Edición Ver Favoritos Herramientas Ayuda

Google Buscar Más >> Acceder

WSPC Journals Online

World Scientific Journals
 Connecting Great Minds

Home | Contact Us | Join Our Mailing List | New Journals | Browse Journals | Journal Prices | For Authors | Advanced Search | SHARE

HOME > JOURNALS BY SUBJECT > NONLINEAR SCIENCE > Fractals

Fractals
 Complex Geometry, Patterns, and Scaling in Nature and Society

Just Accepted | Current Issue | 2011 | 2010 | 2009 | All Volumes (1993-2011)

About FRACTALS: Just Accepted

Articles in this "Just Accepted" section are provisional PDF files and correspond to the articles as they appeared upon acceptance. The fully formatted PDF version will be available at a later date. Please cite the article using its DOI no.

Recurrent two-dimensional sequences generated by homomorphisms of finite abelian groups with periodic initial conditions
 Mihai Prunescu
 DOI No: 10.1142/S0218348X1100552X
 Accepted 2011-05-19
 Full Text (PDF, 683KB)

Remote-sensing Expert Classification of Land Use/Land Cover Types Using Fractal Dimensions over a Subtropical Hilly Region in China
 Ji Zhu, Hanfang Chu, Ziyu Lin and Xiaozhou Li
 DOI No: 10.1142/S0218348X11005452
 Accepted 2011-05-18
 Full Text (PDF, 1431KB)

EFFECT OF LINEAR AND NONLINEAR FILTERS ON MULTIFRACTAL DETRENDED CROSS-CORRELATION ANALYSIS

Print ISSN: 0218-348X
 Online ISSN: 1793-0543

RSS Feed
 Add Me on New Issues
 Recommend to Library

About FRACTALS

- Aims & Scope
- Editorial Board
- Contact FRACTALS
- Sample Issue
- Abstracting/Indexing
- Online Gateways

Internet | Modo protegido: activado

WSPC Journals Online - Windows Internet Explorer
 http://www.worldscinet.com/fractals/99/accepted.shtml

Archivo Edición Ver Favoritos Herramientas Ayuda

Google Buscar Más >> Acceder

WSPC Journals Online

Online Submission
 Call for Papers
 Author Rights

RELATED JOURNALS

- International Journal of Bifurcation (IJBIC)
- Advances in Complex Systems (ACS)

RELATED BOOKS

- Analysis And Control Of Nonlinear Systems With Stationary Sets
- Handbook On Biological Networks

RELATED LINKS

- Life Sciences Books
- Nonlinear Science Books
- Mathematics Journals

ON MINKOWSKI MEASURABILITY
 F. MENDIVIL and J. C. SAUNDERS
 DOI No: 10.1142/S0218348X11005506
 Accepted 2011-04-04
 Full Text (PDF, 782KB)

Fractal Dimension of the *Drosophila* Circadian Clock
 Hassan M Fathallah-Shaykh
 DOI No: 10.1142/S0218348X11005476
 Accepted 2011-04-04
 Full Text (PDF, 291KB)

THE EMERGENCE OF AFTER-SALES SPARE PARTS SUPPLY CHAIN VARIABILITY IN A TELECOM FIRM - A COMPLEX SYSTEM APPROACH
 Mauricio Flores-Cadena, Osvaldo Morales-Matamoros, Ricardo Tejada-Padilla, Isaias Badillo-Piña and Juan de la Cruz Mejía-Téllez
 DOI No: 10.1142/S0218348X11005488
 Accepted 2011-03-07
 Full Text (PDF, 2523KB)

Flow over fractals: drag forces and near wakes
 Pyung Suk Kang, Duane Dennis and Charles Meneveau
 DOI No: 10.1142/S0218348X1100549X
 Accepted 2011-02-23
 Full Text (PDF, 1359KB)

Imperial College Press | Global Publishing | Asia-Pacific Biotech News | Innovation Magazine | Asia Pacific Mathematics Newsletter
 Labcreations Co | Meeting Matters | National Academies Press

crossref World Scientific is a Member of CrossRef

Copyright © 2011 World Scientific Publishing Co. All rights reserved.

Internet | Modo protegido: activado

THE EMERGENCE OF AFTER-SALES SPARE PARTS SUPPLY CHAIN VARIABILITY IN A TELECOM FIRM - A COMPLEX SYSTEM APPROACH

Mauricio Flores-Cadena*, Oswaldo Morales-Matamoros, Ricardo Tejeida-Padilla,
Isaías Badillo-Piña, Juan de la Cruz Mejía-Téllez
SEPI-ESIME, Instituto Politécnico Nacional
U.P. Adolfo López Mateos, Zacatenco, México D.F. 07738
*fcmauricio@yahoo.com

August 11, 2011

Abstract

Telecommunication service providers, also called operators or carriers, must maintain 99.999% of their telecom network availability. To avoid or mitigate the effects of an outage in the network, carriers perform different activities to restore service. Spare parts management plays an important role in meeting the required service. Unfortunately, the closed-loop supply chain that supports the availability of spare parts experiences variability in its processes as a result of endogenous and exogenous variables that make matching the recovery process with the demand process difficult. Understanding the effect of the variables on the variability outcome and the emergence of the variability can help to guide the development of future mathematical models for the management of spare parts. In this article, a complex system approach to analyze the variability behavior is presented.

Keywords: telecom; spare parts; closed-loop supply chain; complex systems; fractals; complex networks.

1 INTRODUCTION

The basis of our social and economic lives and our lifestyles are increasingly dependent on new, state-of-the-art information and communication technology services. To provide these services, telecommunications service providers (carriers) have powerful backbone networks capable of carrying terabytes of traffic data, with up to 99.999% reliability. To achieve this percentage, the carriers must eliminate the impacts of out-

ages in the network by deploying the unused capacity in the network to compensate for failed elements. However, in the operation of the network, outages occur for different reasons, including congestive degradation, software quality, network design, and hardware fault.

As a result of competitive pressures and market demands for efficient services, carriers use Telecom Equipment Manufacturers (TEMs) after-sales services to minimize operational and capital expenditures, and the impacts of outages in

Anexo D

Congresos

- ISSS 2008. *After-Sales Service Parts Supply Chain System in OEM Telecommunication Firms*. University of Wisconsin. Madison, WI, Estados Unidos.
- 5^o Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas 2008. *After-Sales Spare Parts Service in Telecom Firms-A Complex System Profile*. IPN.
- ISSS 2009. *In Search of a Viable System Model for After-Sales Spare Parts Service in Telecom Firms*. The University of Queensland. Brisbane, Australia.
- XI Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas 2009. *Efecto látigo en cadenas de suministro de unidades reparables*. IPN.
- ISSS 2010. *Analyzing the bullwhip effect in after-sales spare parts supply chains in telecom firms, a complex system approach*. Wilfrid Laurier University. Waterloo, ON, Canada.
- Memories of the 24th European Conference on Operational Research EURO XXIV. *Bullwhip effect emergence into an after-sales spare part service supply chain in Telecom firms - A complex system approach*, University of Lisbon, Portugal, 2010.



Program
and
Abstracts

ISSS 2008

"SYSTEMS THAT MAKE A DIFFERENCE"
University of Wisconsin - Madison, WI, USA

JULY 13-18, 2008

perceived goals at his/her own pace. The ISSS Morning RoundTable corresponds to the goals of systemic renewal and the TPO model.

Keywords: General systems theory; social system theory; systemic school renewal

917 (1012)

AFTER-SALES SERVICE PARTS SUPPLY CHAIN SYSTEM IN OEM TELECOMMUNICATION FIRMS

Oswaldo Morales-Matamoros, Mauricio Flores-Cadena, Ricardo Tejeida-Padilla, Ixchel Lina-Reyes

Instituto Politecnico Nacional, México

omoralesm@ipn.mx, fcmauricio@yahoo.com, rtejidap@ipn.mx, sadness966@hotmail.com

After-sales service is an important source of revenue and predictions for OEM (Original Equipment Manufacturer) Telecommunication firms. A good performance of the after-sale service provides a competitive advantage for the OEM firm against their competitors.

However, the design and management of the after-sales service is a challenge for many reasons, e.g. obviously the OEM can't produce services in advance of demand, the only thing they can do is just make predictions about products failures. In the other hand, the supply process is also a source of variability, then the match of demand and supply process is another problem.

In order to tackle and mitigate this kind of problems this paper shows how to build the systems of the after-sales service supply chain, going from strategic to operational issues. From business plan, master production plan for spare parts and labor, safety inventories in consignment to customers, etc. Also we emphasize the information technology and coordination that need to exist within the different echelons into the supply chain, so this can be viewed as a whole system.

Keywords: Service Parts, Supply Chain, Production Systems.

919

SOCIAL IMPLICATIONS OF A PARTIAL PRIVATIZATION OF THE MEXICAN PETROLEUM INDUSTRY

Elvira Avalos-Villarreal

Bosque de la Yuriria 28, La Herradura, CP 53920, Huixquilucan, eavalosv@ipn.mx

Instituto Politécnico Nacional, México

Privatization is a process, which has had a great diffusion in the last decades. Many companies that were administrated originally by one state have been transferred to private owners. Now there is a certain experience from the obtained results and it is possible to integrate them in a systemic evaluation of the social and economic effects generated by the application of this process.

The obtained impact from the application of the privatization on the developing countries compared with the emerging countries has been different given that the developed countries have more robust economies and the emerging ones have many social and economic problems, which avoid to surpass the negative effects of the involved administrative changes.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



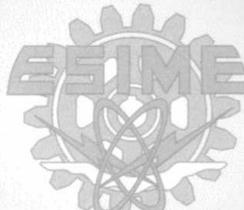
**5º CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA
ELECTROMECAÁNICA Y DE SISTEMAS**

OTORGA EL PRESENTE

DIPLOMA

A:

MAURICIO FLORES CADENA



POR SU PARTICIPACIÓN CON LA PONENCIA

***"After-Sales Spare Parts Service in Telecom Firms - A
Complex System Profile"***

México, D.F., 10 al 14 de noviembre de 2008

DR. JAIME ROBLES GARCIA
Jefe de la Sección de Estudios de Posgrado
e Investigación de la ESIME

M. EN C. JESÚS REYES GARCÍA
Director de la ESIME Unidad Zacatenco



Program & Abstracts

Making Liveable, Sustainable
Systems Unremarkable

53rd Meeting of
The International Society
for the Systems Sciences
July 12-17, 2009

The University of Queensland
Brisbane, Australia
Hosted by
The School of Integrative Systems
and ANZSYS

Timothy FH Allen
President

Rural Futures: a Social-Ecological Systems Perspective on New Zealand Farming Futures <i>Wedderburn, Mary; Bosch, Ockie J H; Burton, Rob; Campbell, J F; Dynes, H; Kingi, T.; Maani, K.; Mackay, A.; Manhire, J.; McDermott, A.; Snow, V.</i>	2009-1142
Achieving a Sustainable Health System - a Conceptual Framework for Holistic Decision Making <i>Ngana, Jean-Paul</i>	2009-1144 (1291)
Design Theory for Collaborative Technologies: Electronic Discourse in Group Decision <i>Sheffield, James</i>	2009-1145 (1234)
System Thinking Approach as a Tool for Sustainable Tourism Development <i>Mai, Thanh</i>	2009-1146
Systems Thinking in the Forestry Value Chain - a Case Study of the New Zealand Emissions Trading Scheme <i>Adams, Tom; Cavana, Robert Y.</i>	2009-1147 (1220)
Toward the Living Systems Analysis of Two Korean Relations <i>Sim, Youn-soo</i>	2009-1149 (1235)
An Evolutionary National Telecommunication System Through Knowledge Management <i>Avalos, Elvira</i>	2009-1151 (1240)
Systemic Regional Development - a Systems Thinking Approach <i>Faggian, Robert; Sposito, Victor</i>	2009-1152 (1283)
The Decline of Astrology: a Symbol of Man's Disconnection With Nature, Self and the Cosmos <i>Peric, Zhejiana</i>	2009-1153 (1165)
Data, Information, Knowledge: a Semiotic-System's View for Database Design <i>Low, David</i>	2009-1154 (1257)
Towards a Feminist-Systems Theory - An Overview of Method, Emerging Results and Implications for Practice. <i>Stephens, Anne</i>	2009-1155 (1164)
Turning Leadership Outside In: Boundary Spanners' Internal Boundary Work <i>MacGillivray, Alice</i>	2009-1160 (1243)
Systemic Evaluation of Community Environmental Management Programmes <i>Footo, Jeff; Ahuriri-Driscoll, Annabel; Hepi, Maria</i>	2009-1163 (1237)
Sustainable Development Requires An Integrating Discipline to Address Its Unique Problems - Design Thinking <i>Dos Santos Martins, Rui Helder</i>	2009-1167 (1156)
Balancing Individualism and Collectivism: User Centric Policy Design to Enhance Evolutionary Development and to Address Complex Needs <i>McIntyre-Mills, Janet J.</i>	2009-1169 (1255)
Regional Governance in Rural Australia: An Emergent Phenomenon of the Quest for Liveability and Sustainability? <i>Bellamy, Jennifer</i>	2009-1170 (1289)
In Search of a Viable System Model for After-Sales Spare Parts Service in Telecom Firms <i>Tejeida-Padilla, Ricardo</i>	2009-1173 (1214)



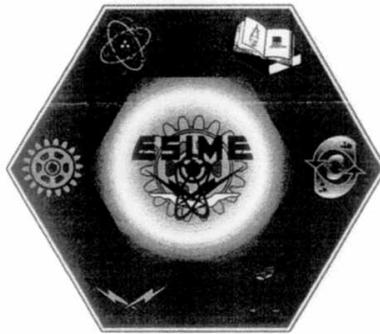
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**XI CONGRESO NACIONAL
DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA Y DE SISTEMAS
del 09 - 13 de noviembre de 2009**

Otorga el presente

DIPLOMA



A

FLORES CADENA MAURICIO

POR SU PARTICIPACIÓN CON LA PONENCIA
EFECTO LÁTIGO EN CADENAS DE SUMINISTRO DE UNIDADES
REPARABLES

DR. JAIME ROBLES GARCÍA
Jefe de la Sección de Estudios de
Posgrado e Investigación de la ESIME

M. EN C. JESÚS REYES GARCÍA
Director de la ESIME Unidad Zacatenco



Program
and
Abstracts

ISSS 2010

**GOVERNANCE FOR A
RESILIENT PLANET**

*Wilfrid Laurier University
Waterloo, ON, Canada*

JULY 17-23, 2010

1398

ANALYZING THE BULLWHIP EFFECT IN AFTER-SALES SPARE PARTS SUPPLY CHAINS IN TELECOM FIRMS, A COMPLEX SYSTEM APPROACH.

¹Ricardo Tejeida-Padilla, ²Mauricio Flores-Cadena, ³Oswaldo Morales-Matamoros

^{1,2,3}Instituto Politécnico Nacional, México

rtejidap@ipn.mx, fcmauricio@yahoo.com, omoralesm@ipn.mx

Complex system science is a new field into the interdisciplinary disciplines. Different phenomena have been studied under this approach. In this paper, we analyzed the bullwhip effect in an after-sales spare part closed loop supply chain in telecom firms. The system is analyzed using tools of fractal analysis.

Keywords: complex systems, bullwhip effect, supply chains, telecom industry

1403

VIABLE SYSTEMS MODEL AND QUALITY OF HOSPITALITY SERVICES

Abraham Briones-Juarez¹, Ricardo Tejeida-Padilla², Isaías Badillo-Piña³, Oswaldo Morales-Matamoros⁴

^{1,2,3,4}Instituto Politécnico Nacional, México

abrahambiones2003@yahoo.com.mx, rtejidap@ipn.mx, ibadillo@ipn.mx, omoralesm@ipn.mx

This paper discusses the design of a model for service quality in hospitality concepts and proposals using the Viable System Model (VSM) of S. Beer. The object of study is a human activity system whose complexity must be addressed through systemic methods. The study identifies the elements to be considered for a system design approach (with emphasis on quality of service) through the establishment of internal and external environments that integrate it. Through the analysis it is determined that the hotels can function as viable systems, ie may be able to absorb the complexity through the generation of internal tools to manage it.

Keywords: Viable Systems Model, hospitality, quality service

1407

RESILIENCE, A NECESSARY PROPERTY FOR THE HOUSING PROBLEM OF USHUAIA: THE INHERENT FACTOR FOR THE GOVERNANCE

Ricardo Andres Frias, Tariana Maia Gessaga

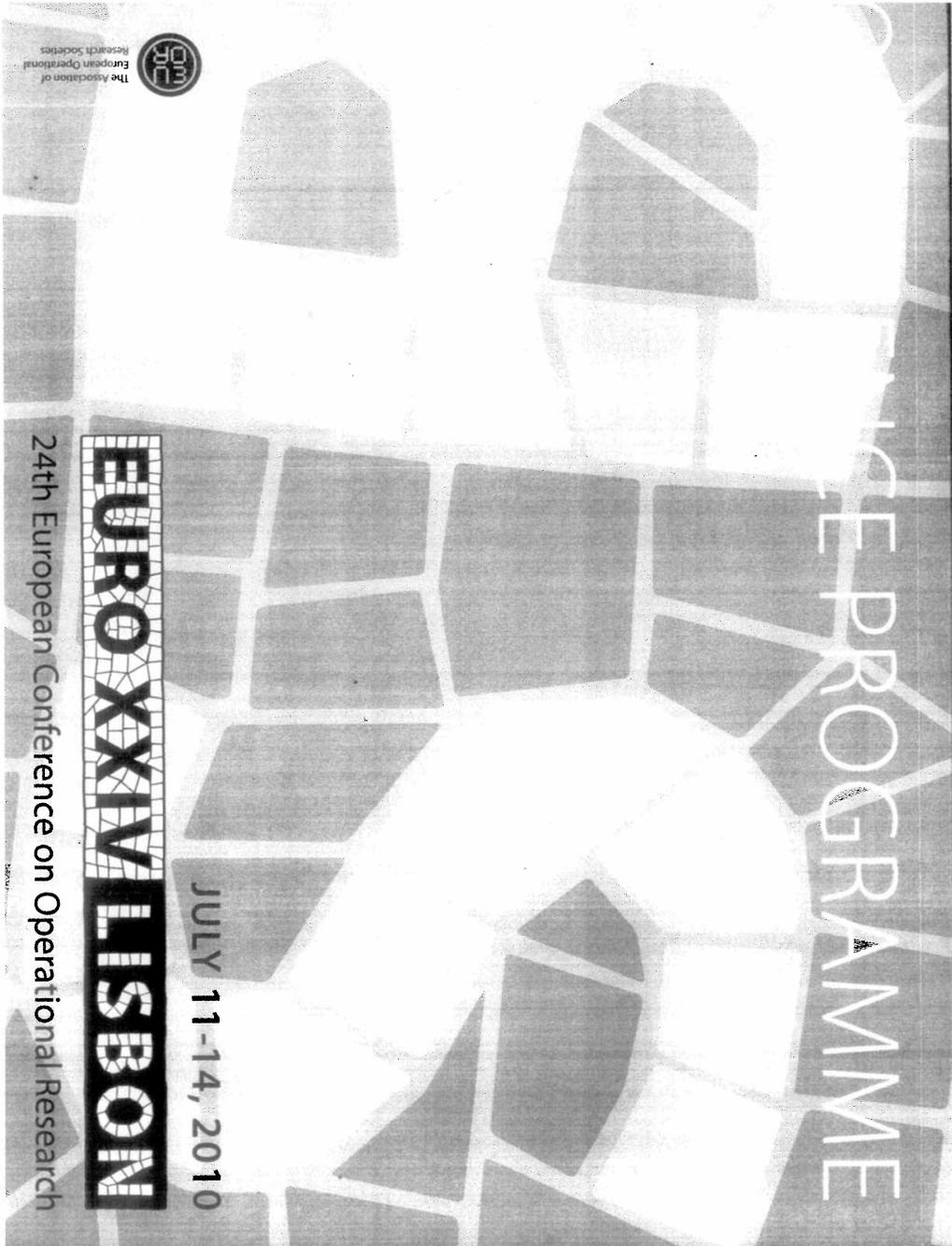
161 J. Fadul St. (9410) Ushuaia – Patagonia – Argentina

CESDES - Facultad de Ciencias Económicas - Universidad Nacional de la Patagonia

megazero@infovia.com.ar; tarianamaia@yahoo.com.ar

The city of Ushuaia, located in Tierra del Fuego (Argentina), and other urban conglomerates in Latin America, are undergoing into a crisis in urban areas, where the housing problem is shown as the witness and most obvious symptom of the crisis. The explosive population growth that has experienced Ushuaia from the '70s to these days has triggered various crises of urban and social type. Among the housing problems that have been generated we can stress the strong friction between different sectors of the people, neighbours with unsolvable housing problem that intrude state land. On the other hand there are neighbours who are opposed to these intrusions, but there are government sectors that sympathize with the intruders, so there are no government actions to prevent such activities and a significant number of laws are violated. All these factors generate the frame of a strained social situation in the city.

The native forest deforestation, pollution of freshwater rivers, the precarious living conditions of some people, the lack of systemic and coordinated politics driving by government agencies, the intransigence of some neighbours and the culture of citizens in general, result in a social crisis from which no one knows the outcome.



2 - Gray Markets and All Units Discounts

Mengze Shi, rotman school of management, university of toronto, 105 st george street, m5s 3e6, toronto, ontario, Canada, mshi@rotman.utoronto.ca

Gray market is the unauthorized channel of distribution for a supplier's authentic products. This paper studies the gray market caused by a reseller responding to the supplier's all-unit quantity discount offerings. We perform closed form analysis of the reseller's dynamic optimal lot-size decisions in response to supplier policies. A novel feature of our solution is the precisely expressed relationship between holding costs and the supply of goods to the gray market. We also identify conditions under which a profit maximizing supplier is more likely to accommodate the gray market.

3 - Effective replenishment policies for the multi-item dynamic lot-sizing problem with inventory limited

Jose M Gutierrez, Estadística, Investigación Operativa y Computación, Universidad de La Laguna, Facultad de Matemáticas, Av. Astrofísico Fco. Sánchez s/n., 38271, La Laguna, Tenerife, Spain, jingrrez@ull.es, Marcos Colebrook, Beatriz Abdul-Jalbar, Joaquín Sicilia

We address the dynamic lot-sizing problem considering multiple items and storage capacity. Despite we can easily characterize a subset of optimal solutions just extending the properties of the single-item case, these results are not helpful to design an efficient algorithm. Accordingly, heuristics are appropriate approaches to obtain near-optimal solutions for this NP-hard problem. Thus, we propose a heuristic procedure based on the smoothing technique, which is tested on a large set of randomly generated instances.

4 - Some lot-sizing models with perishable items

Wilco van den Heuvel, Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam, Burg. Oudlaan 50, P.O. Box 1738, 3000DR, Rotterdam, Netherlands, wvandenheuvel@esc.eur.nl, Mehmet Onal, Edwin Romeijn

We consider a lot sizing model with perishable items. We assume that items deteriorate completely after a deterministic lifetime and can not be sold thereafter. Furthermore, the order in which items are distributed to the customer depends on the customer preference and the way items are exposed to the customer by the store manager. In this way items may be consumed in four different manners: (i) Last-Expired, First-Out, (ii) First-Expired, First-Out, (iii) First-In, First-Out, or (iv) Last-In, First-Out. We consider the complexity and propose algorithms for the different models.

WB-39

Wednesday, 10:40 - 12:00

6.2.45

Scheduling and Pricing

Stream: Scheduling under Resource Constraints

Invited session

Chair: *Wieslaw Kubiak*, Faculty of Business Administration, Memorial University, Prince Philip Drive, A1B 3X5, St. John's, NL, Canada, wkubiak@mun.ca

Dynamic resource scheduling

Joanna Jozefowska, Institute of Computing Science, Poznań University of Technology, Piotrowo 2, 60-965, Poznań, Wielkopolska, Poland, jjozefowska@cs.put.poznan.pl, Lukasz Jozefowski, *Wieslaw Kubiak*

A scheduling problem is considered where multiple users with various importance compete for a scarce resource and the resource allocation should guarantee appropriate service rate objectives for the users. We consider so called dynamic environment in which the parameters describing instances of the problem may change in an unpredictable way. The problem occurs within a broad spectrum of systems, including databases, mediabased applications, and networks. In this paper a scheduling algorithm based on the divisor methods of approximation is presented for solving the problem.

2 - An overview on shop scheduling with minimum time lags

Djamel Rebaine, Informatique et mathématique, Université du Québec à Chicoutimi, 555, boul. de l'Université, G7H 2B1, Chicoutimi, Québec, Canada

We consider the two-machine shop problems with unit-time operations and minimum time lags. The goal is to seek a schedule with a minimum makespan. In this talk we give an overview for the flow shop, open shop, single machine with coupled operations, and generalizations with parallel machines. We start with preliminary results. Then, for each of the mentioned models, we present results on well solvable cases and worst-case analysis.

3 - Makespan Minimization of Multi-Slot Just-In-Time Scheduling on Single and Parallel Machines

Dariusz Dereniowski, Algorithms and System Modeling, Gdańsk University of Technology, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233, Gdańsk, Poland, deren@eti.pg.gda.pl, *Wieslaw Kubiak*

In this talk we address the problem of minimizing the number of slots and makespan of multi-slot just-in-time schedules. We are interested in the latter (more general) optimization criterion. Several algorithmic results are presented, including efficient optimal algorithms for the single machine problem and for a multiple machine case when the processing time of each job does not exceed its due date; and a polynomial-time approximation algorithm for a general case on parallel machines. An interesting application of this task scheduling model is a routing problem in a slotted ring network.

4 - Bullwhip effect emergence into an after-sales spare part service supply chain in Telecom firms - A complex system approach

Mauricio Flores, Systems, Instituto Politecnico Nacional, Petirrojo #9, Las Alamedas, 52970, Atizapan de Zaragoza, Estado de Mexico, Mexico, femauricio@yahoo.com, *Oswaldo Morales Matamoros*, *Ricardo Tejeida Padilla*, *Isaias Badillo Piña*

Telecom Equipment Manufacturers have a great opportunity to capture revenue and profit from telecommunications service providers by provide them after-sales spare part services of repairable units. The challenge is to match the supply process and demand process in order to support 99.999% of availability of the telecom network. Unfortunately these two processes cannot match perfectly, and the effect is the bullwhip effect. In order to cope with this problem, this paper studies the bullwhip effect emergence under a complex system approach.

WB-40

Wednesday, 10:40 - 12:00

6.2.52

Optimal Control and Design in Applications

Stream: Engineering Optimization

Invited session

Chair: *Volker Schulz*, University of Trier, 54296, Trier, Germany, Volker.Schulz@uni-trier.de

Chair: *Moritz Diehl*, ESAT, K. U. Leuven, Kasteelpark Arenberg 10, 3001, Leuven, Belgium, moritz.diehl@esat.kuleuven.be

1 - Aerodynamic Shape Optimization under Uncertainty

Claudia Schillings, University of Trier, Germany, claudia.schillings@uni-trier.de, *Volker Schulz*

A novel approach towards stochastic distributed uncertainties is discussed for the specific application of shape uncertainties in aerodynamic design. While the random field of uncertainties is approximated by a goal-oriented Karhunen-Loeve expansion, an adaptively refined sparse grid is used to discretize the resulting probability space. Algorithmic approaches based on multiple-setpoint ideas in combination with one-shot methods will be presented as well as numerical results.

2 - Large Scale Aerodynamic Shape Optimization

Stephan Schmidt, University of Trier, Universitätsring 15, FB IV - Mathematics, 54296, Trier, Germany, Stephan.Schmidt@uni-trier.de, *Volker Schulz*

Shape calculus techniques for aerodynamic shape optimization are presented that result in a shape derivative existing only on the surface of the aircraft. Thus, this adjoint based sensitivity can be computed very efficiently and a large deformation of the aircraft shape is possible using every CFD mesh node position as a design parameter. The resulting loss of regularity is treated by considering the shape Hessian, which is derived for Stokes and Navier-Stokes flows using operator symbols.

