

Un problema de distribución-inventario resuelto con simulación dinámica

Ana Elena Narro Ramírez*



RESUMEN

Actualmente, en nuestro país, las empresas afrontan grandes desafíos provenientes de una feroz competencia, no sólo interna, sino internacional, que opera con mejores condiciones que las nuestras. Es momento de aprovechar los avances científicos, tecnológicos y computacionales, como la simulación, para incidir en la administración de las organizaciones, reconocidas como sistemas complejos y dinámicos.

El gerente de una compañía maderera se plantea la posibilidad de disminuir los costos. Le preocupa la cantidad de láminas de triplay almacenadas y pretende gastar lo menos posible en su traslado de las plantas de producción a los locales de venta. Se construye una política de operación que conduce a la disminución de costos, trabajando en tres etapas encadenadas: *transporte*; *inventario en los almacenes*; y *distribución-inventario*, experimentando con un modelo de simulación que usa como valores iniciales las soluciones de los dos problemas anteriores. Los costos generados con este análisis son menores que los obtenidos sin controlar el sistema, en promedio en un 18.23%. Se aporta un método recursivo de solución.

* Universidad Autónoma Metropolitana (Unidad Xochimilco). anarro@correo.xoc.uam.mx

ABSTRACT

Today, in our country, enterprises face big challenges from a fierce competition, not only internal, also international, which operate with better conditions than ours. It is time to take advantages from scientific, technological and computing progresses like simulation, to be included by the management of organization, known as complex and dynamic systems. The operating manager for a wood enterprise, likes the possibility to abate costs. His concern about the amount of compressed board stored and pretends to spend as little as possible on the transportation from the processing plants to the sales shops. An operating policy is built towards the costs reduction, working on three linked steps: *transport*, assuming that there are no problems with existence; *warehouse inventory* where the estimated demand derives from the results of the transportation item; and the *distribution-inventory*, solved by drawing a simulation model which uses initial values, the results of the previous items. The model refers to using tools from Linear Programming, Inventory theory and Dynamic Simulation. The costs generated with this analysis are smaller to those obtained without control on the system, 18.23 % on average. A recurrent solving method is contributed.

Palabras clave: Control de inventarios, Simulación Dinámica, Distribución-Inventario, Apoyo en la Toma de Decisiones.
Key words: Inventory control, Dynamic Simulation, Distribution-Inventory, Support in Decision Taking

Antecedentes

Nunca antes los costos del fracaso han sido tan altos que hasta ha aparecido la necesidad de buscar un apoyo técnico para mejorar las posibilidades de éxito en las organizaciones. Es oportuno el apoyo de la ciencia, la tecnología y la computación, en particular la simulación, para ayudar a las organizaciones, consideradas como sistemas complejos en su toma de decisiones¹ (Navarro, 2002). “Un sistema complejo se caracteriza por la interdependencia de un número grande de elementos y una multiplicidad de percepciones”² (Wardfield, 2000:15).

Los problemas que es necesario prevenir y remediar en una empresa son numerosos y variados, entre ellos destaca, por presentarse en casi todo tipo de negocio, el de “Control de Inventarios”, que consiste en determinar la cantidad de material que es conveniente mantener en el almacén. Ésta no debe ser muy grande, pues se trata de una inversión improductiva que ocupa espacio y se deteriora tampoco debe ser insuficiente porque se puede traducir en pérdida tanto económica como de prestigio.

Establecer la cantidad aconsejable de cada artículo, cuando una empresa maneja muchos productos con demandas más o menos desconocidas, y costos diferentes, no es inmediato; la Teoría de Inventarios orienta sobre la mejor decisión³ (Hillier, 2010). Por otro lado, resulta sumamente costoso implementar decisiones equivocadas, pero es posible construir un modelo que represente a la

empresa con fidelidad confiable y ensayar con él las diferentes opciones para seleccionar la más conveniente⁴. Este proceso, que ahora es apoyado por la computadora es lo que se conoce como *Simulación*.

Planteamiento del problema

Se trabaja con una compañía ubicada en Paseo Tizoc s/n en Jiutepec, Morelos, que tiene más de 80 años de experiencia en el ramo maderero. A partir de 1995 diversificó su actividad, se dedica a la fabricación y comercialización de productos que van desde materia prima para la industria del mueble, hasta los más finos acabados residenciales. Cuenta con 2 plantas de producción y 3 locales de venta al público. Las láminas de triplay, son los artículos con más movimiento entre los productos que maneja esta empresa.

En vista de la difícil situación económica actual y la escasez de recursos, el gerente, José Ramírez Díaz, en entrevista, plantea la posibilidad de disminuir costos; le preocupa tener almacenadas y sin control adecuado, demasiadas láminas de triplay, pretende gastar lo menos posible en su traslado de las plantas de producción a los locales de venta, evitando viajes excesivos y no descuidar la satisfacción de la demanda; anticipando la competencia se propone mantener, al menos, el 95% de nivel de servicio al cliente. En la actualidad, no se lleva planeación alguna se resuelven, con urgencia, los problemas cuando se

¹ NAVARRO CID JOSÉ, “Las Organizaciones como Sistemas Abiertos Alejados del Equilibrio”, 2002, Universidad de Barcelona, ISBN B.5220-2002/84-475-2666-6, España, pp.115-230.

² WARDFIELD JOHN N. “Process Leadership in Organizations”, junio 2000, no.1, Serie Managing the Unmanageable”, ITESM Campus Monterrey, pp 12-37.

³ HILLIER FREDERICK & LIEBERMAN GERALD, “Investigación de Operaciones”, 2010, Ed. McGraw-Hill, 7° edición. pp 871-913.

⁴ GORDON GEOFFREY, “Simulación de Sistemas”, 2004, Ed. Diana, 2a Edición, pp 113-244

presentan, con los medios disponibles se toman decisiones basadas en la propia experiencia. La señorita Hortensia Fuentes, secretaria del Sr. Ramírez, entre sus tareas, registra las compras y ventas de los diversos productos que se manejan, esta colección de datos sirvió de punto de partida para realizar el análisis, aunque no estuvo disponible en su totalidad.

Este trabajo se inicia con una selección de artículos por controlar, se consideran solamente unos cuantos.

Productos seleccionados para el análisis

Por la limitación de tiempo y equipo humano para realizar el análisis y resolver el problema planteado, se seleccionan algunas de las láminas de triplay, se solicitan los datos correspondientes disponibles y con ellos se inicia el estudio.

Las láminas difieren en espesor, calidad y precio. Los precios, en agosto de 2008, varían dependiendo de la calidad de la madera, el precio de venta fluctúa entre \$67.00 y \$525.00 la lámina, la demanda varía de 68 400 a 115 500 láminas al mes.

Con respecto al transporte la empresa facilitó los siguientes datos:

En la literatura aparecen recomendaciones para acomodar un almacén desordenado⁵ (Tiwari, 2007); asimismo, se ha trabajado sobre la distribución de los

Tabla 1
Productos Seleccionados para el análisis, demanda diaria promedio y precio de venta

Productos Seleccionados	DEMANDA PROMEDIO (hojas/día)			
	Local 1	Local 2	Local 3	Precio venta \$/lámina
TIPO TRIPLAY				
AGLOMERADO	335	212	142	70
BARI	210	160	154	115
CAOBA	51	76	153	200
CAOBILLA	112	160	460	67
CEREZO	7	28	49	315
ENCINO				
BLANCO	43	67	98	240
ENCINO ROJO	10	51	63	300
JOCHA	76	170	105	150
MDF	47	240	165	117
NOGAL	100	130	190	230
OKOUME	6	19	31	525

Fuente: Calculados a partir de datos proporcionados por la empresa maderera.

Tabla2.
Costos de transporte.

CENTRO DE PRODUCCIÓN	COSTO TRANSPORTE \$/LÁMINA-VIAJE		
	LOCALES		
	1	2	3
1	.60	.50	.56
2	.65	.45	.54

Fuente: Datos proporcionados por la empresa maderera (estimación). productos⁶ (Taylor, 1996). (Kok et Al, 2005); se ha manejado la simulación en la solución de problemas de optimización⁷

⁵ TIWARI, V. & GARVIRNENI S.: "ASP, The art and Science of Practice: Recoupling Inventory Control Research and Practice: Guidelines for Achieving Synergy", marzo-abril, 2007, Interfaces, 37 (2):, pp 176-186

⁶ TAYLOR WILLIAM, "Production, Payroll, Inventory, Delivery ". 7Julio 1996., Industrial Engineering, vol.1, no, pp 36-39.KOK T., JANSSEN F.ET AL, "Phillips Electronics Synchronizes its Supply Chain to End the Bulwhip Effect", enero-febrero 2005, Interfaces, 35(1):, pp 37-48, TAYLOR WILLIAM, "Production, Payroll, Inventory, Delivery ". 7Julio 1996., Industrial Engineering, vol.1, no, pp 36-39.

⁷ FU, M.C., "Optimization for Simulation: Theory vs Practice", 2002,INFORMS Journal on Computing, 14, pp192-215. TEKIN, E., SABUNCUOGLU: "Simulation Optimization: A Comprehensive Review on Theory and Applications", noviembre, 2004, IIE Transactions, 36(11):, pp 1067-1081

(Fu, 2002), (Tekin, 2004); e incluso se han resuelto problemas de inventario usando simulación⁸ (Castro, 2009). También se ha manejado la modelación de sistemas complejos con dinámica de sistemas y lógica difusa⁹ (Bourguet y Soto, 2003, 51-59). Es interesante la tesis que establece “mientras mayor irregularidad e inestabilidad hay en una organización existe mayor oportunidad de innovar, la irregularidad y la inestabilidad se deben aprovechar y no eliminar” (Navarro, 2002: 118). En este trabajo se presenta un caso de distribución-inventario¹⁰ de un sistema multiproductos estocástico que se resuelve con simulación dinámica, se trata de un sistema complejo, pero sólo se consideran algunos aspectos, se maneja únicamente una pequeña parte de las variables involucradas y algunas de sus interrelaciones.

Metodología general

Se emplean tres etapas para recomendar una estrategia, tanto en el manejo del inventario, como en el traslado de la mercancía.

ETAPA 1: Se soluciona la distribución suponiendo abasto suficiente de láminas en las plantas. Esta solución sirve como guía para establecer la relación más conveniente entre plantas y locales.

ETAPA 2: Usando la correspondencia plantas-locales propuesta en la etapa 1 se determinan (mediante simulación) los parámetros recomendables para el

sistema de inventarios en cada planta, y para cada producto, suponiendo las demandas independientes.

ETAPA 3: Por último se propone un modelo de simulación que representa el sistema distribución-inventario de la maderera, con él se experimentan diferentes valores de los parámetros, tomando como punto de partida los resultados obtenidos en las etapas anteriores, tanto de distribución como de inventario, modificándolos hasta lograr bajar los costos “significativamente”.

Objetivo

Recomendar una política de distribución-inventario que disminuya manifiestamente los costos.

Hipótesis

Los costos correspondientes a la distribución-inventario de las láminas de triplay, con las recomendaciones emanadas del experimento de simulación son menores que los actuales.

ETAPA UNO. SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN SIMPLIFICADO

Para resolver este problema se usa el programa lineal de transporte:

⁸ CASTRO CARLOS & VÉLEZ MARIO, “Modelo de Revisión Periódica para Control de Inventario en Artículos con Demanda Estacional. Una Aproximación desde la Simulación, 2009, Sparc Europe Award, 69(137),.

⁹ BOURGET DIAZ RAFAEL & SOTO RODRÍGUEZ ROGELIO, “Modelación de Sistemas Complejos con Dinámica de Sistemas y Lógica Difusa”, 2003, Posgrado ITSM Monterrey, pp 51-59.

¹⁰ El término compuesto “Distribución-Inventario” se refiere a que se consideran dos problemáticas que coexisten:

- la correspondiente al control del inventario en las plantas de producción y
- la que se refiere al traslado de las láminas de triplay de las plantas de producción a los locales de venta.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 c_{ij} x_{ij} \\ \sum_{j=1}^3 x_{ij} &\leq y_i \text{ para } i = 1, 2 \\ \sum_{i=1}^2 x_{ij} &\geq d_j \text{ para } j = 1, 2, 3 \\ x_{ij} &\geq 0 \quad \forall \quad i, j \end{aligned}$$

donde c_{ij} son los costos de transportar cada lámina del centro de producción i al local de venta j , con $i = 1, 2$ y $j = 1, 2, 3$; x_{ij} es la cantidad de láminas enviadas del centro i al local j , y_i es la cantidad disponible en el centro i , d_j es la cantidad requerida en el local j .

Sustituyendo los datos proporcionados por la empresa este programa queda:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= .6x_{11} + .50x_{12} + .56x_{13} + .65x_{21} + .45x_{22} + .54x_{23} \\ x_{11} + x_{12} + x_{13} &\leq Q_{1k} \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} &\leq Q_{2k} \\ x_{11} + x_{21} &\geq d_{1k} \\ x_{12} + x_{22} &\geq d_{2k} \\ x_{13} + x_{23} &\geq d_{3k} \\ x_{ij} &\geq 0 \quad \forall \quad i = 1, 2, j = 1, 2, 3, \end{aligned}$$

k recorre los artículos que se analizan

Los programas correspondientes a la maderera se resuelven colocando como oferta la suma de las mayores demandas registradas y como demanda el mayor valor demandado para cada producto en cada local, para evitar el desabasto.

Tabla 3.

Solución de los problemas de transporte propuestos

MADERA	COSTO	X_{11}	x_{22}	x_{23}
AGLOMERADO	15093.9	14 100	8 190	5 460
BARI	1167.3	8 700	6 600	6 450
CAOBA	11250	2 250	3 000	6 000
CAOBILLA	17792.1	4 710	7 050	21 840
CEREZO	1867.5	450	1 050	2 250
ENCINO BLANCO	4964.4	2 100	2 940	4 410
ENCINO ROJO	2696.4	750	2 040	2 460
JOCHA	7038	3 000	6 600	4 200
MDF	9531	1 800	10 500	6 900
NOGAL	8662.5	330	4 950	8 250
OKOUME	1381.5	300	1 050	1 350

Fuente: Elaboración propia, soluciones obtenidas con el Paquete MATHEMATICA Versión 7.0.

A partir de estas soluciones se deduce que cuando se tiene existencia suficiente en los almacenes, lo más conveniente para minimizar el costo de transporte es surtir el local 1 a través del almacén 1, y los locales 2 y 3, por parte del almacén 2. Así, la solución al problema de transporte es de la forma: $x_{11} = d_1$, $x_{12} = x_{13} = x_{21} = 0$, $x_{22} = d_2$, $x_{23} = d_3$, con lo que se facilita la determinación de los parámetros convenientes del sistema de inventario.

ETAPA DOS. SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE INVENTARIO MULTI- PRODUCTOS ESTOCÁSTICO.

En los modelos en los que la demanda es conocida y constante, llamados “determinísticos”, es posible predecir con exactitud la cantidad de artículos en el almacén en el momento en el que se recibe una orden¹¹(Dell, 2006), en

¹¹ DELL AGNOLO MARCO ANTONIO, “Costos de Inventario. Planificación de Stocks y aprovisionamiento”, Enero, 2006., Jornal Dyna, Universidad de Colombia, pp 43-45,

el caso estocástico, la demanda durante el tiempo de entrega es una variable aleatoria que puede propiciar, cuando la demanda sea intensa, que al recibir el pedido y surtir las solicitudes pendientes, la existencia en el almacén quede prácticamente agotada. Si el tiempo de entrega se supone constante, la función de costo esperado es, (Love, 1989), (Gallego & Ozer, 2005) ¹²

$$E(CT(Q, r)) = K \frac{E(d)}{Q} + cE(d) + h \left(\int_{E(y_d)}^{Q-r} (Q-u) \phi(u) du + \int_0^r (r-u) \phi_L(u) du \right) + p \frac{E(d)}{Q} \int_r^{\infty} (u-r) \phi_L(u) du \quad (I)$$

donde $E(CT)$ es el costo esperado que se expresa como una función de dos variables: tamaño del lote (Q) y punto de reorden (r), el primer término del segundo miembro de la ecuación mide la inversión por ordenar durante un periodo, con el costo por ordenar (K) y el número de veces que se espera tener que ordenar en ese periodo ($E(d)/Q$); el segundo término es el costo por adquisición o producción (c) por satisfacer la demanda esperada ($E(d)$); el tercero se refiere al costo por mantenimiento de los artículos en el almacén (h) medido desde que se recibe la orden con el almacén vacío y demanda por satisfacer ($E(y_d)$, déficit esperado) hasta que se vacía nuevamente, considerando como punto de quiebre el momento de ordenar (r), \bar{F} y \bar{F}_L representan las distribuciones de probabilidad que describen los comportamientos de las demandas \bar{F} durante el periodo anterior a ordenar y (\bar{F}_L) en el transcurso del tiempo de entrega L , respectivamente, la última componente de esta

ecuación es la relativa al costo por escasez. Las integrales, áreas bajo la curva¹³, corresponden al número esperado de artículos en el almacén, o artículos solicitados y no entregados. Para aproximar los valores de los parámetros que minimizan esta función de costo se requiere encontrar la solución del programa no lineal

$$\begin{aligned} & \text{Min } E(CT(Q, r)) \\ & \text{s.a.} \\ & Q \geq 0, r \geq 0 \end{aligned}$$

En busca de la solución de este programa se recurre a las condiciones de KARUSH-KHUN-TUCKER¹⁴ (Bazará, 2003), obteniendo:

$$\begin{aligned} P(d_L \leq r) &= \frac{p \frac{E(d)}{Q} - h}{p \frac{E(d)}{Q} + h} \\ Q &= \sqrt{\frac{2(k + p y_d(r)) E(d)}{h}} \end{aligned}$$

El modelo del sistema de inventarios de la compañía maderera es de este tipo, esto es, estocástico con ventas pendientes. La estimación de los valores convenientes de los parámetros se hace utilizando la simulación, las expresiones anteriores se incluyen en el modelo de simulación como relaciones entre las variables.

Simulación de sistemas dinámicos

La estimación de los valores convenientes de los parámetros

¹² LOVE F. STEPHEN, "Inventory Control", 1989, McGraw-Hill International Book Company, México, pp. 56-100. GALLEGO G. & OZER O., "A New Algorithm and a New Heuristic for Serial Supply Systems", Operations Research Letters, 33(4), Julio 2005. pp 349-362

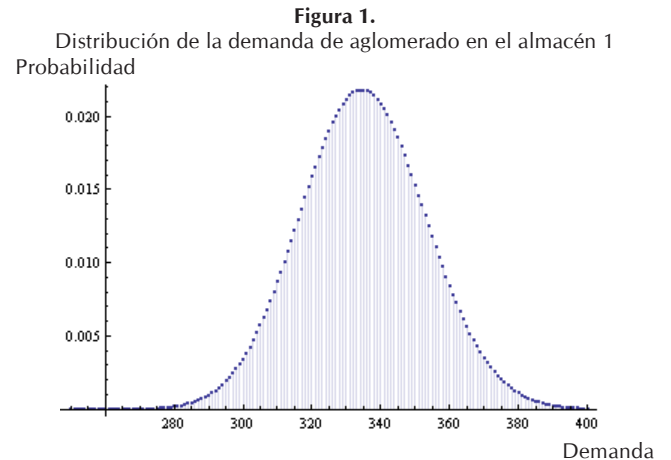
¹³ En el caso en el que las funciones de demanda son discretas, las integrales se convierten en sumas.

¹⁴ BAZARA S. MOKHTAR, SHERALI D. HANIF & SHETTY C.M., "Nonlinear Programming. Theory and Algorithms", John Wiley & Sons, New york, 2003, pp131-183.

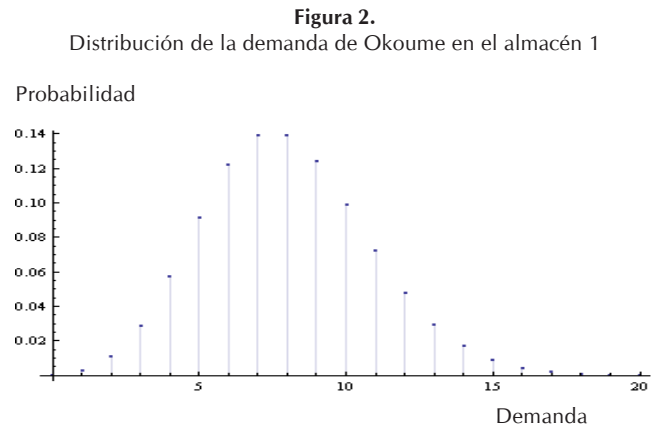
se realiza mediante la experimentación con un modelo de simulación que representa el sistema de inventario correspondiente a la maderera que se analiza. Este modelo se construye a partir de las relaciones lógicas y matemáticas que se descubren entre las componentes del sistema. Como se trata de determinar los valores de los parámetros del sistema de inventario se requiere conocer las funciones que describen las demandas.

En este caso, se cuenta con datos históricos correspondientes a las demandas de los diversos tipos de triplay. Las funciones de demanda deben ser discretas puesto que no es factible demandar fracciones de lámina, entonces la primera opción para hacer el ajuste son distribuciones de *Poisson*¹⁵. (Canavos, 2005) Sin embargo, la distribución *Poisson* se considera como el límite de una distribución *Binomial*, se aproxima a ella cuando el número n de ensayos es grande y la probabilidad p de éxito (o q de fracaso) se acerca a cero, condiciones que se satisfacen en los casos que nos ocupan. La relación entre las medias es para *Poisson* $\mu = np$ en la *Binomial*¹⁶ (Myers & Walpole, 2002). Además, por el teorema del límite central, si n es suficientemente grande, una variable *Binomial* tiene una distribución aproximadamente *Normal* con media y varianza np y npq , respectivamente, por lo que se pueden usar áreas bajo la curva *Normal* como aproximación adecuada de las probabilidades *Binomiales* y por consiguiente *Poisson*¹⁷ (Mendenhall, 2005). Así está justificado aproximar las distribuciones *Poisson* mediante distribuciones *Normales*, que por ser usadas con más frecuencia resultan manejables, incluso para el paquete de cómputo de simulación al que se recurre. Las demandas con menos ensayos se ajustan con errores menores a distribuciones *Triangulares*. Las

siguientes gráficas dan idea sobre la factibilidad de las aproximaciones.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos usando el paquete MATHEMATICA 7.0



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos usando el paquete MATHEMATICA 7.0

¹⁵ CANAVOS GEORGE, "Probabilidad y Estadística, Aplicaciones y Métodos", nov. 2005, Mc Graw-Hill, primera edición, pp 278-354.

¹⁶ MYERS H. RAYMOND & WALPOLE E. RONALD, "Probabilidad y Estadística para Ingenieros", 2002, Interamericana, México D.F., pp 97-102.

¹⁷ MENDENHALL WILLIAM, "Introducción a la Probabilidad y la Estadística", 2005, Internacional / iberoamérica, pp 210-226.

Tabla 4.

Distribuciones utilizadas para representar el comportamiento de las demandas

TIPO	d_1	d_2	D_3
AGLOMERADO	N(335, 60)	N(212, 31)	N(142, 21)
BARI	N(210, 40)	N(160, 30)	N(154, 31)
CAOBA	N(51, 13)	N(76, 13)	N(153, 29)
CAOBILLA	N(122, 28)	N(160, 38)	N(460, 130)
CEREZO	(0, 7, 15)	N(29, 3)	N(51, 12)
ENCINO BLANCO	N(43, 14)	N(67, 16)	N(98, 24)
ENCINO ROJO	(0, 10, 25)	N(51, 8)	N(63, 9)
JOCHA	N(76, 12)	N(170, 35)	N(105, 17)
MDF	N(47, 6)	N(240, 54)	N(165, 32)
NOGAL	N(100, 4)	N(130, 17)	N(190, 43)
OKOUME	(0, 6, 10)	N(23, 6)	N(31, 8)

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por la empresa y el paquete MATHEMATICA versión 7.0

Como se observa, las distribuciones son, en su mayoría, normales. Se usaron las pruebas de *Kolmogirov-Smirnov* y *Chi cuadrada* para medir la bondad de ajuste y no se encontró razón para rechazar la hipótesis de normalidad (triangularidad) en ninguno de los casos.

Las distribuciones *Normales* indicadas en la tabla anterior se utilizan para generar las demandas en el modelo de simulación. Los puntos de reorden se obtienen mediante la relación proporcionada por el modelo analítico y la ecuación de la distribución *Normal*:

$$F_r = P(d_L \leq r) = \frac{p \frac{r(d) - h}{Q} - \frac{h}{2}}{p \frac{r(d) - h}{Q} + \frac{h}{2}} = \int_0^r \frac{e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}} dx \Rightarrow$$

$$r = \sigma(2\text{Ln}(2\pi) + 2\text{Ln}(F_r)) + \mu$$

¹⁸ Para encontrar el punto de reorden r que satisface la relación se despejó del límite superior de la integral definida.

¹⁹ COSS BU RAÚL, "Análisis y Evaluación de Proyectos de Inversión", 2008, Ed. Limusa, Segunda Edición, 2ª, pp.75-128.

²⁰ Cálculo propio $F_r = P(d_L \leq r) = \frac{p \frac{r(d) - h}{Q} - \frac{h}{2}}{p \frac{r(d) - h}{Q} + \frac{h}{2}}$ es la probabilidad de que la demanda acumulada \leq que el punto de reorden r

²¹ Se consideran \$30.° para artículos nacionales y \$45.° para importados.

en el caso en el que la distribución de la demanda está dada por la *Normal* $N(\mu, \sigma)$ ¹⁸

De la misma manera, las distribuciones triangulares que aparecen en la tabla 5 sirven para generar las demandas d_i correspondientes, en el modelo de simulación¹⁹ (Coss Bu, 2008). Los puntos de reorden se calculan a partir de las relaciones²⁰:

$$\text{para } F_r < \frac{b-a}{c-a}, F_r = \frac{(x-a)^2}{(b-a)^2} \Rightarrow x = a + (b-a)\sqrt{F_r}$$

$$\text{para } F_r > \frac{b-a}{c-a}, F_r = \frac{(x-c)^2}{(c-b)^2} \Rightarrow x = c + (c-b)\sqrt{F_r}$$

Tabla 5.

Costos correspondientes al sistema de inventarios

ALMACÉN	COSTOS		
	K	H	P
1	500 \$/orden	10 \$/hojaxmes	30 (45) \$/hoja ²¹
2	550 \$/orden	12 \$/hojaxmes	30 (45) \$/hoja

Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por la empresa

Modelo de simulación

Definición del sistema:

- Componentes
 - o Entidades = clientes
 - o Eventos = Demanda, entrega de mercancía
 - o Variables: Demanda, Existencia, Déficit, Lote = Q, Punto de reorden r
 - o Parámetros: Costos: K (por ordenar), h (por mantener en almacén), p (por déficit).

- o Relaciones funcionales:
 - Existencia $y = \text{Max}(Q - d, 0)$
 - Déficit: cuando $y - d < 0$ es $d - y$, de otra manera es cero,
 - Costo = $(K + h \text{ Existencia} + p \text{ Déficit})$
 - Demanda = Distribución Normal (Triangular) para cada producto
 - Probabilidad acumulada

$$(d \leq \text{REORDEN}) = F_r = \frac{p \frac{d}{Q} - \frac{h}{2}}{p \frac{d}{Q} + \frac{h}{2}}$$

- REORDEN.
 - Para distribución $N(\mu, \sigma)$,
 $r = \sigma [2\text{Ln}(2\pi) + 2\text{Ln}(F_r)] + \mu$.²²
 - Para distribución triangular: Cuando²³ $F_r \leq$ aleatorio, $r = a + (b-a) \sqrt{F_r}$, de otra manera, $r = c + (c-b) \sqrt{F_r}$

Formulación del modelo: se describe su funcionamiento a partir del siguiente diagrama de flujo, en el que el punto de partida son los valores iniciales de los parámetros

Valores iniciales: Q (la experimentación inicia con el lote económico), Existencia $y = 0$, Déficit $y_d = 0$, $Mx =$ número días por simular (se corren 500)

- Datos: Se usan los registros de ventas de la empresa.
- Implementación del modelo en la computadora (traducción al lenguaje del paquete de simulación que se utiliza, STELLA versión 9.0.2)

Figura 3.
Diagrama de flujo del modelo de simulación Compañía Maderera (para cada artículo)

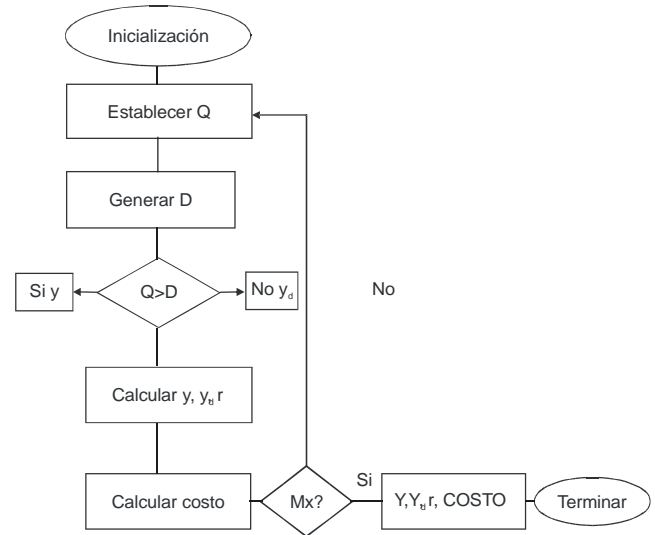
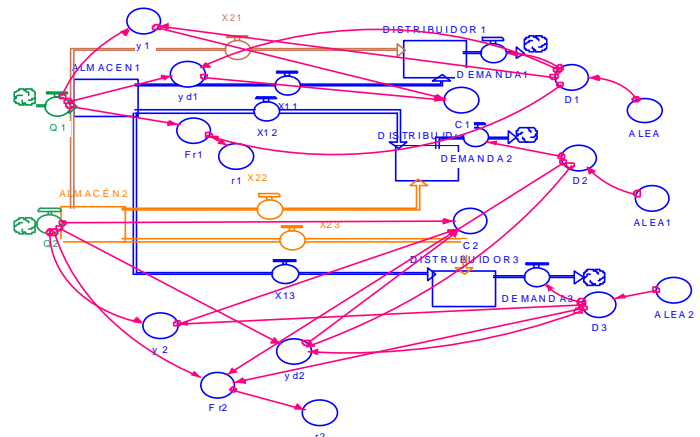


Figura 4.
Mapa del Modelo de Simulación que representa al Sistema Maderera (para cada artículo)



Fuente: diseño propio con paquete STELLA 9.0.2

²² Cálculo propio

²³ Cálculo propio

Tabla 6
Resultados obtenidos con el paquete STELLA 9.0.2 y la hoja de cálculo Excel 2007

MADERA	Q ₁	Q ₂	r ₁	r ₂	ds ²⁴	Intervalos de Confianza para costo	
						α = .05	α = .01
AGLOMERADO	370	410	95	388	38.48	(1626.8,1920.5)	(1577.4,1930.8)
BARI	120	160	200	130	32.075	(1632.7,1642.3)	(1627.2,1717.8)
CAOBA	170	70	107	41	9.7	(1557.2,1562.9)	(1535.05,1585.5)
CAOBILLA	140	360	53	15	26.49	(2192, 2330.2)	(2178.6, 2549.8)
CEREZO	10	70	10	40	6.82	(1258.4, 1262.9)	(1243.3, 1278.5)
ENCINO B	30	160	4	140	19.7	(1632.9, 1654.8)	(1587.1, 1690.4)
ENCINO R	10	114	4	74	7.73	(1561.9, 1576.21)	(1485.47, 1585.4)
JOCHA	60	275	45	168	11.56	(1528.8,1535.8)	(1501.8, 1562.8)
MDF	40	250	30	215	11.25	(1368.1, 1408.8)	(1357.4, 1410.6)
NOGAL	90	300	90	190	19.02	(1838.2, 1920.2)	(1792.3, 1966.1)
OKOUME	5	50	4	27	4.37	(1421.1, 1423.9)	(1410.6, 1434.9)

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS OBTENIDOS EN VALORES ESPERADOS

La siguiente tabla 6 contiene los resultados correspondientes a los valores esperados calculados con la hoja de cálculo Excel a partir de los resultados obtenidos con el paquete STELLA 9.0.2 en 500 corridas; se ensayaron varias combinaciones de los valores Q₁ y Q₂, cantidad de madera por ordenar en cada almacén para calcular los costos totales correspondientes y elegir el menor. En esta tabla aparecen los valores de los parámetros que corresponden al menor costo para cada tipo de madera incluido en el análisis, se experimentó aumentando o disminuyendo el tamaño del pedido, buscando bajar fundamentalmente el déficit, en vista de que su costo se estima bastante mayor que el costo de almacenamiento, y tomando en cuenta que la empresa desea mantener, al menos, el 95% de satisfacción al cliente.

Como los valores que toman las variables son independientes y las repeticiones (500) hacen que la muestra sea grande, aprovechando el Teorema del límite Central es posible determinar los intervalos de confianza, cuya amplitud es suficientemente pequeña. Se calculan para los niveles de significancia de .05 y de .01.

ETAPA TRES: SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DISTRIBUCIÓN-INVENTARIO

Primero se resolvió el problema de transporte. Esta solución facilitó el manejo del problema de inventario, ahora se retoma el problema completo, usando como valores iniciales, para la experimentación con el modelo de simulación, los valores de los parámetros obtenidos en las partes anteriores.

²⁴ Desviación estándar

MODELO DE SIMULACIÓN DISTRIBUCIÓN- INVENTARIO

La complejidad del modelo analítico de inventario estocástico impulsó el uso de la simulación para resolverlo. Al modelo ya utilizado se le añaden algunos elementos para completar el sistema. Los cambios son:

- o Eventos = Demanda, entrega de mercancía
- o Variables: Además de las ya establecidas:
 - x_{ij} = número de láminas enviadas de la planta i al local j con $i = 1, 2$ y $j = 1, 2, 3$.
- o Parámetros: Además de los incluidos:
 - c_{ij} (costo por transportar cada lámina de i a j)
- o Relaciones funcionales:
 - Costo = $(K + h \text{ Existencia} + p \text{ Déficit}) + c_{ij} X_{ij}$

En el nuevo diagrama de flujo los cambios son los siguientes:

Los valores iniciales para Q , y , y_d son los valores obtenidos

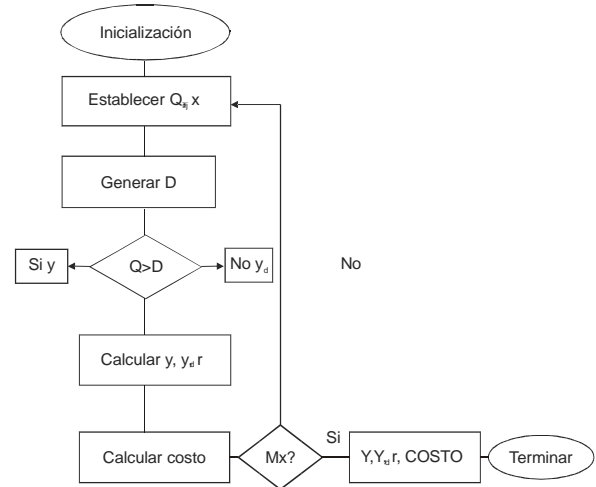
En el diagrama se incluye la asignación de los valores de los flujos x_{ij} , después de la asignación del valor Q_i

Las recomendaciones emanadas de este trabajo se enumeran a continuación.

POLÍTICA DE DISTRIBUCIÓN-INVENTARIO

1. Enviar de cada planta i a cada local j la cantidad de láminas x_{ij} , con $i = 1, 2$ y $j = 1, 2, 3$, mencionada en la tabla anterior para cada tipo de madera.
2. Resurtir las láminas de cada tipo de madera cuando el nivel de existencia alcance el punto de reorden r_i , con

Figura 5.
Diagrama de flujo del modelo de simulación Compañía Maderera (para cada artículo)



Fuente: Elaboración propia

$i = 1, 2$, indicado en la tabla 7.

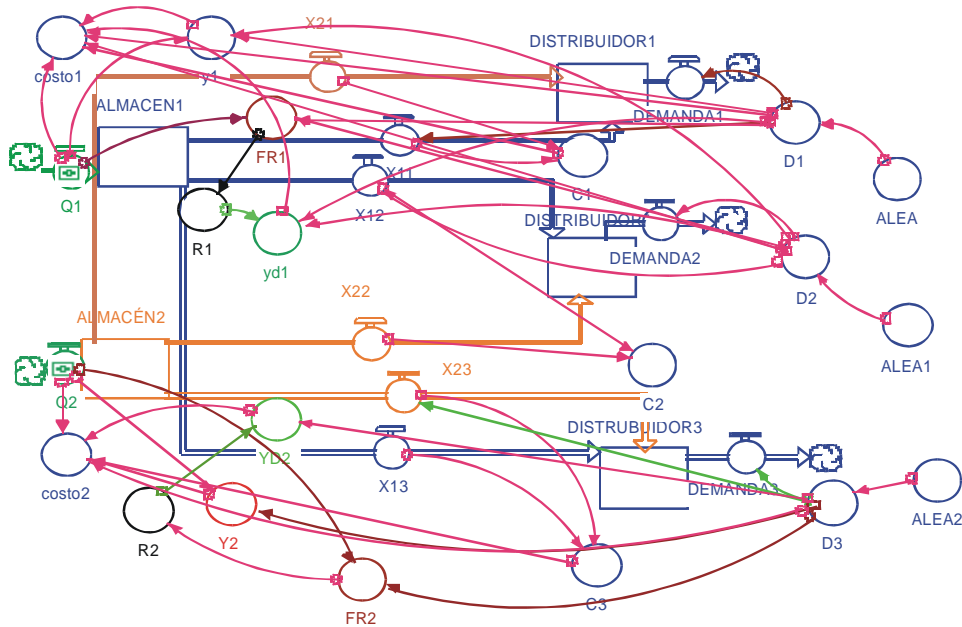
3. Solicitar la cantidad de láminas Q_i , con $i = 1, 2$, que se sugiere en la misma tabla.
4. Utilizar un nivel de seguridad igual al tamaño esperado de existencia en el almacén, para mantener el nivel deseado de atención al cliente.
5. El experimento se detiene cuando un cambio en uno de los parámetros conduce a un costo mayor que el obtenido en la corrida anterior.

Conclusiones

Los costos generados con la simulación son menores que los obtenidos sin controlar el sistema distribución-inventario, en promedio, en un 18.23%.

Sin duda el resultado de aplicar algún control en el

Figura 6
 Mapa del Modelo de Simulación que representa al Sistema Maderera (para cada artículo)



Fuente: Elaboración propia con STELLA 9.0.2

Resultados

Tabla 8.
 Resultados finales obtenidos con el paquete STELLA 9.0.2 y la hoja de cálculo Excel 2007.

MADERA	Q_1	Q_2	r_1	r_2	y_1	y_2	x_{11}	x_{13}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	COSTOS
AGLOMERADO	290	400	152	290	10	7	290	0	45	212	142	1653.83
BARI	300	210	200	130	31	73	210	99	0	160	55	1615.64
CAOBA	200	70	107	32	5	16	51	153	0	76	0	1507.47
CAOBILLA	580	160	181	53	15	21	110	460	0	160	0	2133.5
CEREZO	15	78	10	39	3	5	7	4	0	29	47	1204.77
ENCINO B	33	175	4	140	4	8	33	0	10	67	98	1648.22
ENCINO R	10	114	4	74	3	7	10	0	0	51	63	1567.05
JOCHA	63	288	45	168	3	10	66	0	7	171	105	1507.89
MDF	62	390	30	213	15	16	50	15	0	240	150	1396.03
NOGAL	97	323	85	187	3	19	97	0	3	130	190	1835.42
OKOUME	6	54	4	24	3	3	5	0	0	28	32	1353.2

Fuente: Elaboración Propia

inventario, simplemente el esfuerzo de llevar un registro correcto de su comportamiento y manejar el lote económico como tamaño de pedido, conduce a disminución de gasto, con mayor razón sucede cuando se sigue una política ensayada con un modelo de simulación construido con bases teóricas que conduce a los costos señalados en la tabla 7 con un nivel de confianza $\alpha = .05$.

Una gran ventaja de la simulación es ensayar

soluciones sin tener las consecuencias de un fracaso que se darían si se experimentara en el sistema real.

Se aporta el método de solución usado que consiste en particionar el problema complejo, en subproblemas relativamente fáciles de resolver, en los que la solución de uno facilita el manejo del siguiente, hasta llegar a la solución del problema completo, a un paso del nivel anterior.

Referencias

- BAZARA S. MOKHTAR, SHERALI D. HANIF & SHETTY C.M., "Nonlinear Programming. Theory and Algorithms", John Wiley & Sons, New york, 2003, pp131-183.
- BOURGET DIAZ RAFAEL & SOTO RODRÍGUEZ ROGELIO, "Modelación de Sistemas Complejos con Dinámica de Sistemas y Lógica Difusa", 2003, Posgrado ITSM Monterrey, pp 51-59.
- CANAVOS GEORGE, "Probabilidad y Estadística, Aplicaciones y Métodos", nov. 2005, Mc Graw-Hill, primera edición, pp 278-354.
- CASTRO CARLOS & VÉLEZ MARIO, "Modelo de Revisión Periódica para Control de Inventario en Artículos con Demanda Estacional. Una Aproximación desde la Simulación", 2009, Sparc Europe Award, 69(137),.
- COSS BU RAÚL, "Análisis y Evaluación de Proyectos de Inversión", 2008, Ed. Limusa, Segunda Edición, 2ª, pp.75-128 .
- DELL AGNOLO MARCO ANTONIO, "Costos de Inventario. Planificación de Stocks y aprovisionamiento", Enero, 2006., Jornal Dyna, Universidad de Colombia, pp 43-45,
- FU, M.C., "Optimization for Simulation: Theory vs Practice", 2002, INFORMS Journal on Computing, 14, pp192-215.
- GALLEGO G. & OZER O., " A New Algorithm and a New Heuristic for Serial Supply Systems", Operations Research Letters, 33(4), , Julio 2005. pp 349-362
- GORDON GEOFFREY, "Simulación de Sistemas", 2004, Ed. Diana, 2ª Edición, pp 113-244.
- HILLIER FREDERICK & LIEBERMAN GERALD, "Investigación de Operaciones", 2010, Ed. McGraw-Hill, 7º edición. pp 871-913.
- KOK T., JANSSEN F. ET AL, "Phillips Electronics Synchronizes its Supply Chain to End the Bulwhip Effect", enero-febrero 2005, Interfaces, 35(1):, pp 37-48,
- LOVE F. STEPHEN, "Inventory Control", 1989, McGraw-Hill International Book Company, México, pp. 56-100.
- MENDENHALL WILLIAM, "Introducción a la Probabilidad y la Estadística", 2005, Internacional / iberoamérica, pp 210-226.
- MYERS H. RAYMOND & WALPOLE E. RONALD, "Probabilidad y Estadística para Ingenieros", 2002, Interamericana, México D.F., pp 97-102.
- NAVARRO CID JOSÉ, "Las Organizaciones como Sistemas Abiertos Alejados del Equilibrio", 2002, Universidad de Barcelona, ISBN B.5220-2002/84-475-2666-6, España, pp.115-230.

• TAYLOR WILLIAM, "Production, Payroll, Inventory, Delivery ". 7Julio 1996., Industrial Engineering, vol.1, no, pp 36-39.

• TEKIN, E., SABUNCUOGLU: "Simulation Optimization: A Comprehensive Review on Theory and Applications", noviembre, 2004, IIE Transactions, 36(11); pp 1067-1081

• TIWARI, V. & GARVIRNENI S.: "ASP, The art and Science of Practice: Recoupling Inventory Control Research and Practice: Guidelines for Achieving Synergy", marzo-abril, 2007, Interfaces, 37 (2);, pp 176-186

• WARDFIELD JOHN N. "Process Leadership in Organizations", junio 2000, no.1, Serie Managing the Unmanageable", ITESM Campus Monterrey, pp 12-37,