



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

MODELO MATEMÁTICO DE SIMULACIÓN CONTINUA PARA COORDINAR INVENTARIOS APLICADO A UNA RED LOGÍSTICA

Mathematical model of continuous simulation to coordinate inventories applied to a logistics network

CESAR AUGUSTO PINEDA PEREZ^[1] ERIKA YAMILE BERNAL^[2]
KAREN VIVIANA LOPEZ^[2], ANDRÉS CAMILO LEON^[2], DANIEL HOLGUIN^[2]

Recibido: 17 de mayo de 2019. Aceptado: 22 de junio de 2019

DOI: <http://dx.doi.org/10.21017/rimci.2019.v6.n12.a68>

RESUMEN

Este artículo presenta un modelo matemático de simulación continua para coordinar los inventarios en una red logística fabricante-distribuidor-detallista-cliente considerando el déficit acumulado y despacho del déficit de cada uno de los actores de la red atendiendo a las demoras que se presentan en el flujo de la información y el flujo de los bienes físicos y sus efectos en las variables del sistema (variables de estado, variables de flujo, variables auxiliares).

Palabras clave: Red Logística, Simulación Continua, Inventarios

ABSTRACT

This article presents a mathematical model of continuous simulation to coordinate the inventories in a logistics network manufacturer-distributor-retailer-client considering the accumulated deficit and dispatch of the deficits of each one of the actors of the network attending to the delays that appear in the flow of information and the flow of physical goods and their effects on system variables (state variables, flow variables, auxiliary variables).

Key words: Logistics Network, Continuous Simulation, Inventories

I. INTRODUCCIÓN

Las redes y en particular los actores que integran estas redes se ven enfrentadas con los problemas que conllevan la coordinación de los inventarios en toda la red. Uno de los problemas típicos que se presentan en la coordinación de los inventarios en la red logística es el efecto látigo (efecto bullwhip), que significa la descoordinación de los inventarios en la red. Para apreciar de forma íntegra el comportamiento de un sistema dinámico, en particular, se utiliza la Dinámica Industrial, que nos permite apreciar la tendencia

y comportamiento de un sistema dinámico a través del tiempo. La dinámica industrial se aplica a sistemas donde se presenten retroalimentación o realimentación de flujo de información o de bienes físicos (sistema cerrado), caso particular la cadena de suministro o red logística [1-6].

La modelación de un sistema dinámico para ser tratado a través de la dinámica industrial, parte en principio, de definir las variables de estado, las variables de flujo, variables auxiliares y parámetros. Luego se hace un diagrama causal que permite ver todas las interacciones entre las

[1] Magister en Ingeniería Industrial, Especialista en Ingeniería de Producción e Ingeniero Industrial de la Universidad Distrital. Docente investigador del grupo O.C.A de la Corporación Universitaria Republicana. Correo electrónico: cesarpinedaperez@yahoo.es

[2] Estudiante de octavo semestre de Ingeniería Industrial de la Corporación Universitaria Republicana y pertenecientes al semillero PMA (programación matemática aplicada) adscrito al grupo de investigación O.C.A.

diferentes variables y parámetros y sus efectos negativos o positivos en las relaciones de las diferentes variables (para elaborar el diagrama causal contribuye de forma significativa abordar las metodologías del pensamiento sistémico). Y finalmente se traduce el diagrama causal en un diagrama forrester, para ser simulado en cualquiera de los programas existentes de simulación continua (Vensim, Ithink, Powersim, Stella, Dinasys, Evolution, entre otros). Al elaborar el diagrama forrester, se definen todas las ecuaciones matemáticas de las variables de estado, variables de flujo o tasa, variables auxiliares, lazos de retroalimentación positivas o negativas, estructuras básicas (demoras, autorefuerto, agotamiento, autorefuerto limitado, flujos coincidentes, búsqueda de metas, oscilaciones, cadenas, entre otros) y otras estructuras. Al definir las condiciones de simulación (como todo proceso de simulación, ya sea discreto o continuo), se deben definir la longitud de la simulación, el paso de simulación, es decir el DT (que son intervalos de tiempo igualmente espaciados y puede ser discreto o continuo) y en especial el método de integración (método de Euler, método de Runge-Kutta), atendiendo a la ecuación matemática diferencial (primero, segundo o tercer orden) que se generan en las variables de flujo o tasa y su tipo de demora. Es de resaltar las ventajas de la modelación matemática a través de la dinámica industrial, ya que estas ecuaciones matemáticas pueden ser lineales o no lineales. A diferencia de los modelos determinísticos estáticos, la dinámica industrial permite apreciar la tendencia y comportamiento de un sistema dinámico a través del tiempo. De hecho, como el caso de la coordinación de inventarios en la red logística, la dinámica industrial permite simular modelos de alta complejidad, incluyendo ecuaciones no lineales, variables aleatorias y diferentes tipos de estructuras de modelación [7-12].

La aplicación de la Dinámica Industrial a los sistemas industriales fue abordada, en principio, por Jay W. Forrester en su obra *Dinámica Industrial* (1968). En esta obra trabajó el modelo del sistema producción-distribución, modelo cliente-productor-personal y otros modelos. Forrester como miembro del MIT (Instituto tecnológico de Massachusetts) desarrolló una de las primeras computadoras digitales de alta velocidad (Whirlwind I). El MIT desarrolló el

compilador DYNAMO, que facilitó el progreso ascendente de la investigación en dinámica industrial. En la actualidad diversos investigadores como John Sterman, profesor del MIT, trabajan en la Dinámica de Sistemas (todos los sistemas dinámicos) y Dinámica Industrial (modelos de actividad industrial que involucran marketing, producción, distribución, inversión de capital, investigación y finanzas). El profesor Sterman en su obra *Business Dynamics* (2000), trata diversos modelos dinámicos extensivos a varios tipos de sistemas. Entre otros investigadores como Juan Martín García (teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas, 2003), Javier Aracil y Francisco Gordillo (*Dinámica de sistemas*, 1997) aportan obras para la investigación y enseñanza de la Dinámica de Sistemas [13-18].

II. MODELO MATEMÁTICO

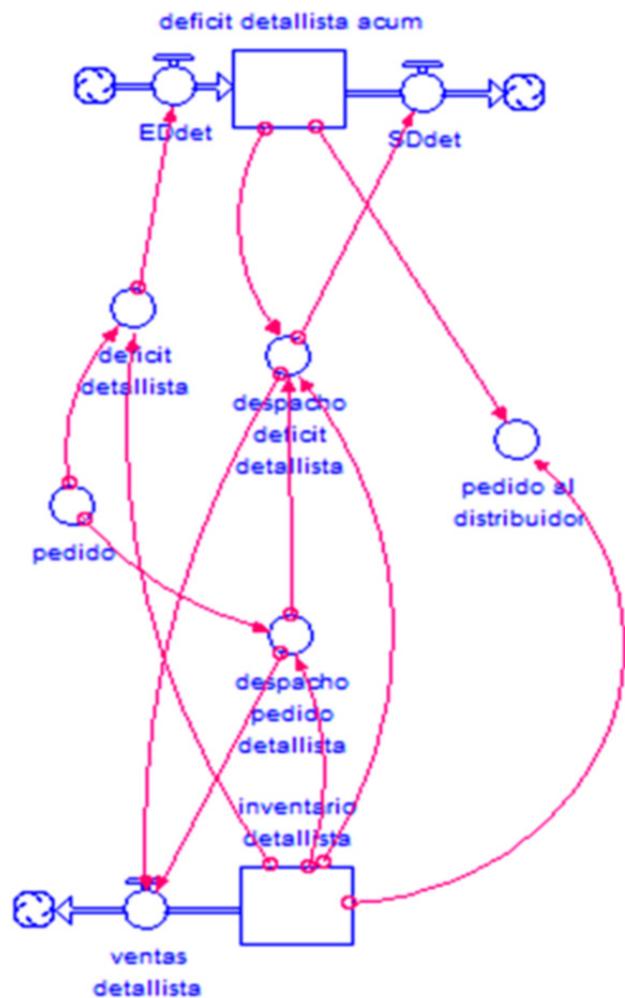


Fig. 1. Diagrama forrester Detallista

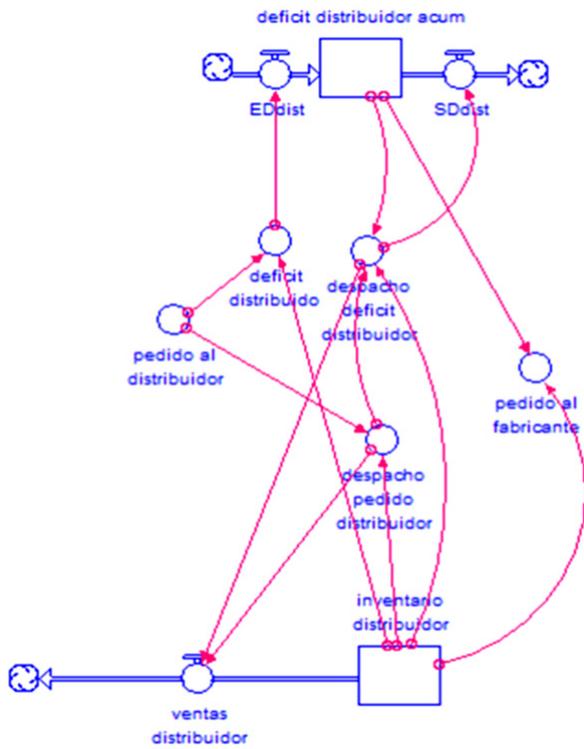


Fig. 2 Diagrama forrester Distribuidor

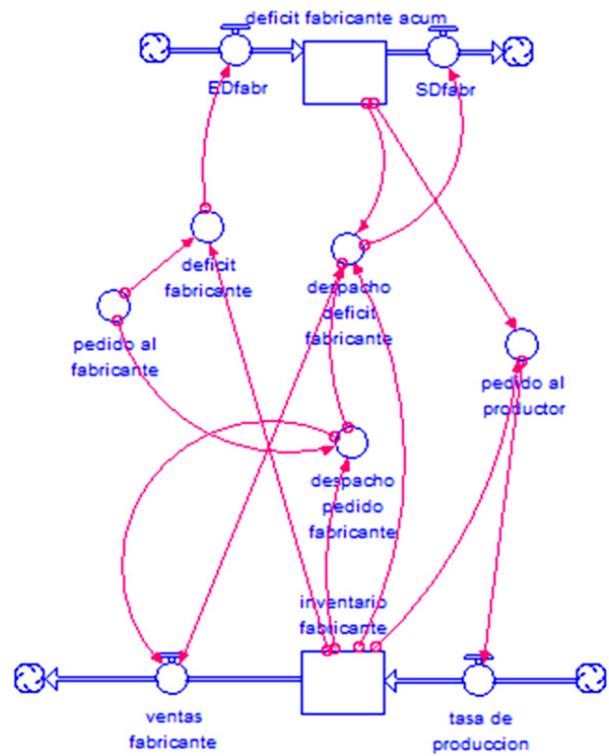


Fig. 3 Diagrama forrester Fabricante

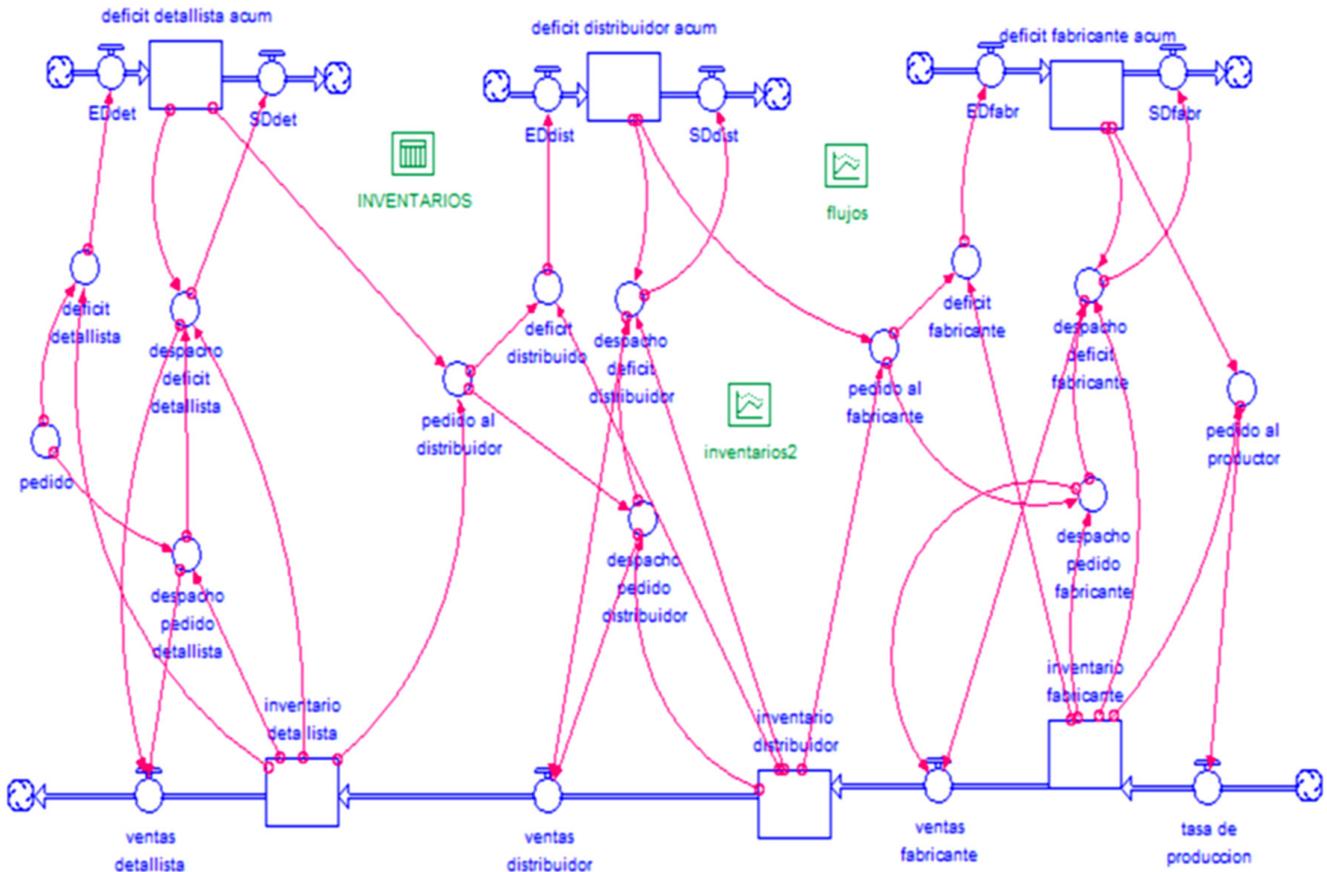


Fig. 4 Red logística completa

Las ecuaciones matemáticas del modelo para cada eslabón de la red logística son:

III. ECUACIONES FABRICANTE

Ecuaciones de estado (nivel)

Inventario fabricante(t) = Inventario fabricante (t-dt) + (Tasa de producción - Ventas fabricante) *dt valor inicial = 4

Déficit fabricante acum(t) = Déficit fabricante acum(t-dt) + (Edfabr - Sdfabr)*dt valor inicial = 0

Ecuaciones de Flujo (Tasas)

Ventas fabricante = DELAY1 (despacho déficit fabricante + despacho pedido fabricante, 2,0)

Tasa de producción = DELAY1(pedido al productor, 2,4)

EDfab = déficit fabricante

SDfab = despacho deficit fabricante

Ecuaciones variables auxiliares

Pedido al productor = SMTH1(IF (inventario fabricante < 4) THEN (4 - inventario fabricante) ELSE (0) + déficit fabricante acum, 2)

Pedido al fabricante = SMTH1(IF (inventario distribuidor < 4) THEN (4 - inventario distribuidor) ELSE (0) + déficit distribuidor acum, 2)

Déficit fabricante = IF (pedido al fabricante > inventario fabricante) THEN (pedido al fabricante - inventario fabricante) ELSE (0)

Despacho déficit fabricante = IF (inventario fabricante - despacho pedido fabricante > 0) THEN (MIN (déficit fabricante acum, inventario fabricante - despacho pedido fabricante)) ELSE (0)

Despacho pedido fabricante = IF (inventario fabricante ≥ 0) THEN (MIN (pedido al fabricante, inventario fabricante) ELSE (0)

IV. ECUACIONES DISTRIBUIDOR

Ecuaciones de estado (nivel)

Inventario distribuidor(t) = Inventario distribuidor (t-dt) + (ventas fabricante - Ventas distribuidor) *dt valor inicial = 4

Déficit distribuidor acum(t) = Déficit distribuidor acum(t-dt) + (Eddist - Sddist)*dt valor inicial = 0

Ecuaciones de Flujo (Tasas)

Ventas distribuidor = DELAY1 (despacho déficit distribuidor + despacho pedido distribuidor, 2,0)

EDdist = déficit distribuidor

SDdist = despacho déficit distribuidor

Ecuaciones variables auxiliares

Pedido al distribuidor = SMTH1(IF (inventario detallista < 4) THEN (4 - inventario detallista) ELSE (0) + déficit detallista acum, 2)

Déficit distribuidor = IF (pedido al distribuidor > inventario distribuidor) THEN (pedido al distribuidor - inventario distribuidor) ELSE (0)

Despacho déficit distribuidor = IF (inventario distribuidor - despacho pedido al distribuidor > 0) THEN (MIN (déficit distribuidor acum, inventario distribuidor - despacho pedido distribuidor)) ELSE (0)

Despacho pedido distribuidor = IF (inventario distribuidor ? 0) THEN (MIN (pedido al distribuidor, inventario distribuidor) ELSE (0)

V. ECUACIONES DETALLISTA

Ecuaciones de estado (nivel)

Inventario detallista(t) = Inventario distribuidor (t-dt) + (ventas distribuidor - Ventas detallista) *dt valor inicial = 4

Déficit detallista acum(t) = Déficit detallista acum(t-dt) + (Eddet - Sddet)*dt valor inicial = 0

Ecuaciones de Flujo (Tasas)

Ventas detallista = despacho déficit detallista + despacho pedido distribuidor

EDdet = déficit detallista

SDdet = despacho déficit detallista

Ecuaciones variables auxiliares

Pedido = 4 + STEP(4,10)

Déficit detallista = IF (pedido > inventario detallista) THEN (pedido - inventario detallista) ELSE (0)

Despacho déficit detallista = IF (inventario detallista - despacho pedido detallista > 0) THEN (MIN (déficit detallista acum, inventario detallista - despacho pedido detallista)) ELSE (0)

Despacho pedido detallista = IF (inventario detallista ≥ 0) THEN (MIN (pedido, inventario detallista)) ELSE (0)

VI. RESULTADOS

Se corrió el modelo con el software I THINK, para 12 periodos, con un paso de simulación DT = 0.25 y el método de integración EULER, ya que las demoras en información (SMTH1) y las demoras del flujo de bienes (DELAY1), son de primer orden. Las demoras en información y en flujo de bienes es de 2 unidades de tiempo.

Se evidencia en la tabla I, que el modelo matemático minimiza el exceso de inventarios, tratando de mantener coordinado la red logística, con los efectos de las demoras y la variación de la demanda.

Como se aprecia en la fig. 5, se nota el comportamiento oscilatorio de los flujos de ventas detallista, distribuidor, fabricante. La tasa de producción tiene menos acentuado el movimiento oscilatorio, debido a que es el primer surtidor del eslabón de la cadena y el surtidor del déficit en los demás eslabones.

Tabla I. Inventarios

MES	Inventario distribuidor	inventario fabrica	inventario detallista
0	4.00	4.00	4.00
1	4.00	7.31	1.27
2	3.82	9.25	0.54
3	3.14	10.38	0.68
4	1.88	10.98	1.16
5	0.52	11.10	1.48
6	0.00	10.62	1.26
7	0.56	9.41	0.92
8	1.91	7.48	0.74
9	3.28	5.11	0.99
10	3.89	2.69	1.63
11	3.39	0.59	2.36
12	1.35	0.00	2.79

Como se observa en la fig. 6, el comportamiento de los inventarios también es de tipo oscilatorio, siendo menor la oscilación en el inventario del fabricante.

En la tabla II Detallista, se muestra el comportamiento de la cadena, es decir, si el pedido al detallista es mayor al inventario del detallista, entonces se genera un déficit en el detallista, que es la diferencia entre pedido al detallista y el inventario del detallista. Este déficit del detallista es la

Tabla I. Detallista

MES	Inventario detallista	Pedido al detallista	Déficit detallista
0	4.00	4.00	0.00
1	1.27	4.00	2.73
2	0.54	4.00	3.46
3	0.68	4.00	3.32
4	1.16	4.00	2.84
5	1.48	4.00	2.52
6	1.26	4.00	2.74
7	0.92	4.00	3.08
8	0.74	4.00	3.26
9	0.99	8.00	7.01
10	1.63	8.00	6.37
11	2.36	8.00	5.64
12	2.79	8.00	5.21

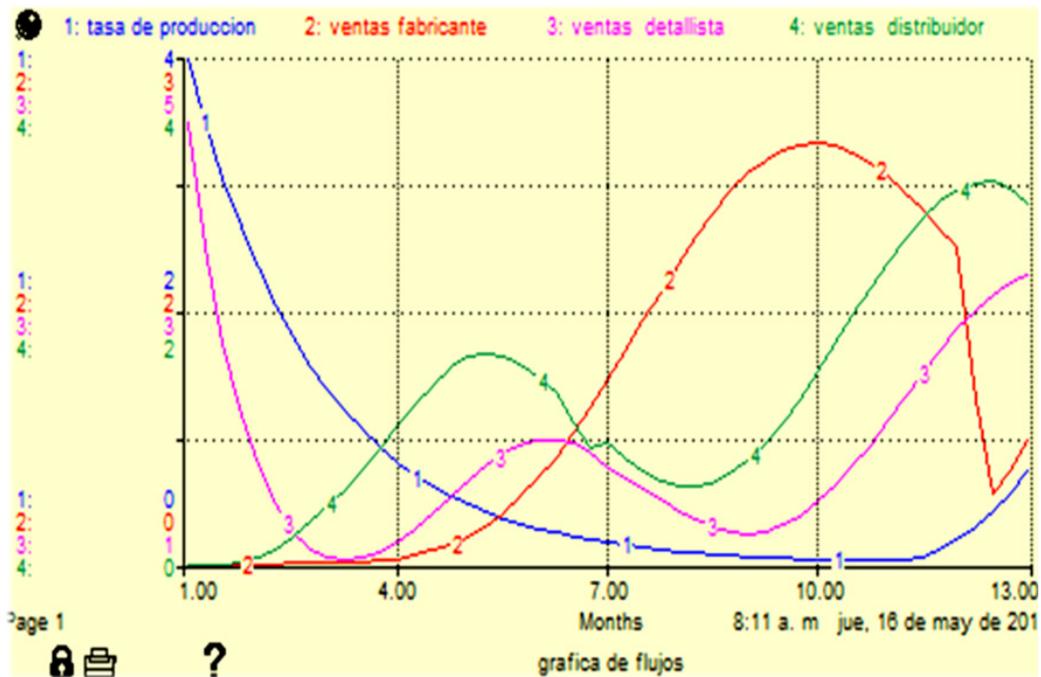


Fig. 5 Graficas de Flujos (tasa de producción, ventas fabricante, distribuidor y detallista)

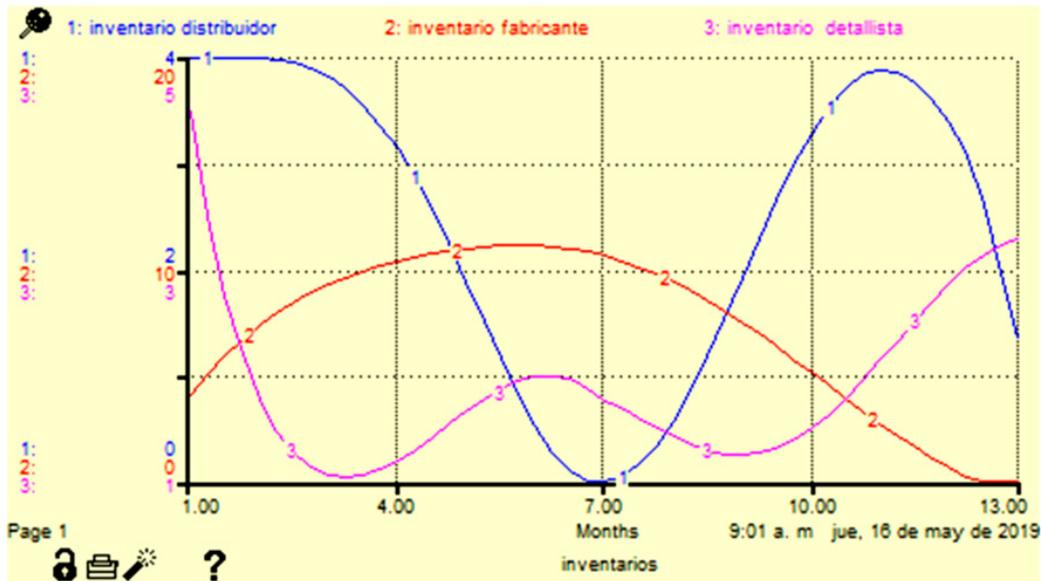


Fig. 6 Graficas de Inventarios

información que se surte a la red logística, es decir surte el déficit detallista acumulado y este a su vez surte la información de pedido al distribuidor. Y así sucesivamente se replica en la red. Se creo la variable déficit acumulado para los tres actores de la red (fabricante, distribuidor, detallista), puesto que, por efecto de las demoras en la información y de surtir los bienes físicos, el

déficit se va acumulado mientras se recibe la respuesta.

En la tabla III Pedidos, se observa que los pedidos al productor y pedido al fabricante son bajos, esto debido a que los inventarios del fabricante son altos. De hecho, es el primer eslabón que abastece de producto a la cadena de suministro.

Tabla III. Tabla de pedidos

Mes	Pedido al detallista	Pedido al fabricante	Pedido al distribuidor	Pedido al productor
0	4.00	0.00	0.00	0.00
1	4.00	0.00	0.58	0.00
2	4.00	0.02	1.63	0.00
3	4.00	0.18	2.38	0.00
4	4.00	0.66	2.69	0.00
5	4.00	1.51	2.68	0.00
6	4.00	2.46	2.63	0.00
7	4.00	3.04	2.73	0.00
8	4.00	2.99	2.92	0.00
9	8.00	2.36	3.04	0.00
10	8.00	1.54	2.92	0.00
11	8.00	1.00	2.57	0.38
12	8.00	1.13	2.09	1.44

VII. CONCLUSIONES

La dinámica industrial se constituye en una herramienta fundamental para visualizar los modelos en diferentes escenarios ajustándose a los objetivos empresariales.

Los procesos de gestión de inventarios en una red logística son complejos. La dinámica industrial permite ver la tendencia de un sistema y asimismo proponer mejoras a su modelo dinámico, de tal manera que se reduzca en lo posible el efecto látigo y se logre una mejor coordinación de los inventarios a la largo de la cadena de suministro.

REFERENCIAS

- [1] S. M. Disney and D. R. Towill, "The effect of vendor managed inventory (VMI) dynamics on the Bullwhip Effect in supply chains," in *International Journal of Production Economics*, 2003.
- [2] J. C. Fransoo and M. J. F. Wouters, "Measuring the bullwhip effect in the supply chain," *Supply Chain Management*. 2000.
- [3] D. R. Towill, "Industrial dynamics modelling of supply chains," *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, 1996.
- [4] S. Serdarasan, "A review of supply chain complexity drivers," *Comput. Ind. Eng.*, 2013.
- [5] H. L. Lee, V. Padmanabhan, and S. Whang, "The bullwhip effect in supply chains," *IEEE Eng. Manag. Rev.*, 2015.
- [6] P. Georgiadis, D. Vlachos, and E. Iakovou, "A system dynamics modeling framework for the strategic supply chain management of food chains," *J. Food Eng.*, 2005.
- [7] H. Krishnan and R. A. Winter, "Inventory Dynamics and Supply Chain Coordination," *Manage. Sci.*, 2009.
- [8] D. R. Towill, M. M. Naim, and J. Wikner, "Industrial Dynamics Simulation Models in the Design of Supply Chains," *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, 1992.
- [9] H. Akkermans and N. Dellaert, "The rediscovery of industrial dynamics: The contribution of system dynamics to supply chain management in a dynamic and fragmented world," *Syst. Dyn. Rev.*, 2005.
- [10] T. Kuznaz, H.-C. Pfohl, and B. Yahsi, "The impact of Industry 4.0 on the Supply Chain," *Innov. Strateg. Logist. Supply Chain.*, 2015.
- [11] P. Georgiadis, D. Vlachos, and E. Iakovou, "A system dynamics modeling framework for the strategic supply chain management of food chains," *J. Food Eng.*, 2005.
- [12] S. Tiwari, H. M. Wee, and Y. Daryanto, "Big data analytics in supply chain management between 2010 and 2016: Insights to industries," *Comput. Ind. Eng.*, 2018.
- [13] A. A. Tako and S. Robinson, "The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context," *Decis. Support Syst.*, 2012.
- [14] B. Tjahjono, C. Esplugues, E. Ares, and G. Pelaez, "What does Industry 4.0 mean to Supply Chain?," *Procedia Manuf.*, 2017.
- [15] B. J. Angerhofer and M. C. Angelides, "System dynamics modelling in supply chain management: research review," 2002.
- [16] H. B. Hwang and N. Xie, "Understanding supply chain dynamics: A chaos perspective," *Eur. J. Oper. Res.*, 2008.
- [17] M. Özbayrak, T. C. Papadopoulou, and M. Akgun, "Systems dynamics modelling of a manufacturing supply chain system," *Simul. Model. Pract. Theory*, 2007.
- [18] H. Sarimveis, P. Patrinos, C. D. Tarantilis, and C. T. Kiranoudis, "Dynamic modeling and control of supply chain systems: A review," *Comput. Oper. Res.*, 2008.

