

**Simulación de la política  $(Q, r)$  en una ambiente *Assembly to Order* con un tiempo de seguridad estocástico incluido en el tiempo de entrega al cliente**

POR

Yamil I. Torres Ramírez

Tesis sometida en cumplimiento de los requisitos para el grado de

MAESTRIA EN ADMINISTRACION DE EMPRESAS

EN

Gerencia Industrial

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO

RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ

2014

Aprobado por:

\_\_\_\_\_  
Mario Córdova Claudio, PhD.  
Miembro, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Sonia Bartolomei Suárez, PhD.  
Miembro, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Roberto Seijo Vidal, PhD.  
Presidente, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Cristina Pomales, PhD.  
Representante de Estudios Graduados

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Roberto Seijo Vidal, PhD.  
Decano Asociado Interino de Investigación y Estudios Graduados

\_\_\_\_\_  
Fecha

**Copyright© Yamil I. Torres Ramirez, 2014**

## ABSTRACT

This investigation applies an inventory policy  $(Q, r)$  at the ATO manufacturing environment where demand is recognized as the client's order is entered and not when the component is required on the manufacturing process, recognizing a safety time. This is based on a previous Seijo-Vidal (2009) research where the safety times were studied with constant values, in difference with this one which uses random values to be specific an exponential statistic distribution known. The purpose of this investigation was to understand the impact of the random safety time on the function of the expected total annual cost to verify if there exists some economic benefits utilizing random safety time versus utilizing a constant one at 3 different intervals where safety times could be found: a)  $d \leq l_{min}$  b)  $l_{min} \leq d \leq l_{max}$  c)  $d \geq l_{max}$ . For this a simulation of discrete events on a computer running software Arena Rockwell Software was utilized, with the final objective of obtaining a value for the parameters of this policy, in specific for:  $Q^*, r^*$  and for the expected total annual cost. The optimization tool *Optquest* was utilized for the 8 scenarios that were realized through our design of experiment. Finally a comparison of the effect on the level of reorganizing and the expected total annual cost of a random safety time versus a constant one was done and it was concluded that this modified policy utilized has economic benefits only on the interval where  $d \leq l_{min}$ . This benefit is on a minor scale that when utilizing a constant safety time, but this is due to that fact that randomness is added to the system. What this policy shows us is that it could be applicable when the lead time of the supplier is less than the insurance time specified on the cases where suppliers are located far as Seijo-Vidal (2009) had specified.

## RESUMEN

Esta investigación aplica una política de inventario  $(Q, r)$  al ambiente de manufactura ATO en donde la demanda se reconoce al entrar la orden del cliente y no cuando el componente es requerido en el proceso de manufactura, reconociendo así un tiempo de seguridad. Esta a su vez se basa en un trabajo previo de Seijo- Vidal (2009) en donde el tiempo de seguridad se estudió con valores constantes, a diferencia de éste, que se utiliza valores aleatorios, en específico una distribución estadística exponencial con un parámetro conocido. El propósito de esta investigación fue entender el impacto de este tiempo de seguridad aleatorio en la función del costo total anual esperado para ver si existía algún beneficio económico de utilizar este tiempo de seguridad aleatorio versus utilizar uno constante en 3 diferentes intervalos diferentes donde el tiempo de seguridad se puede encontrar: a)  $d \leq l_{min}$  b)  $l_{min} \leq d \leq l_{max}$  c)  $d \geq l_{max}$ . Para esto se utilizó el uso de simulación de eventos discretos en computadora con el programa Arena Rockwell Software, con el fin de obtener un valor para los parámetros de la política en específico para:  $Q^*, r^*$  y el costo total anual esperado se utilizó la herramienta de optimización *Optquest* para los 8 escenarios que se realizaron dado un diseño de experimento. Finalmente se hizo una comparación del efecto en el nivel de reordenar y el costo total anual esperado de un tiempo de seguridad aleatorio vs, uno constante y se concluyó que el utilizar esta política modificada tiene un beneficio económico únicamente en el intervalo donde  $d \leq l_{min}$ , ese beneficio es a menor escala que al utilizar un tiempo de seguridad constante pero esto se debe a la aleatoriedad que se le está añadiendo al sistema. Lo que nos muestra que esta política puede ser aplicable cuando el lead time del suplidor es menor que el tiempo de seguridad específicamente en los casos donde los suplidores están localizados lejos a según Seijo-Vidal (2009) había indicado.

## AGRADECIMIENTOS

*Quiero agradecerle a Dios por darme fuerzas para finalizar esta investigación.*

*A mis padres por su apoyo incondicional,*

*A mi pareja por su comprensión,*

*Especial agradecimiento al Dr. Mario Córdova y la Dra. Sonia Bartolomei Suárez por su participación.*

*Y finalmente quiero darle gracias al Dr. Roberto Seijo por su paciencia, por el tiempo y por haber creído en mí.*

# Tabla de Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	V
TABLA DE CONTENIDO .....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABLAS.....	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	IX
LISTA DE APÉNDICES.....	X
GLOSARIO.....	XI
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.2 MOTIVACIÓN.....	6
<b>2 REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>7</b>
<b>3 METODOLOGÍA.....</b>	<b>11</b>
3.1 DESARROLLO DEL MODELO.....	13
3.2 VERIFICACIÓN DEL MODELO CON LA POLÍTICA DEL EOQ .....	15
3.3 VALIDACIÓN DEL MODELO CON LA POLÍTICA ( $Q, r$ ) .....	17
3.4 VALIDACIÓN DEL OPTIMIZADOR.....	22
3.5 VERIFICACIÓN CON (SEIJO VIDAL, 2009).....	24
3.6 EXPERIMENTACIÓN.....	26
<b>4 ANÁLISIS Y RESULTADOS.....</b>	<b>28</b>
4.1 RESULTADOS DE LA VERIFICACIÓN DEL EOQ .....	28
4.2 RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN CON LA POLÍTICA ( $Q, r$ ) .....	31
4.3 RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL OPTIMIZADOR.....	36
4.4 RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DE LA POLÍTICA CON SEIJO-VIDAL (2009).....	38
4.5 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO .....	41
<b>5 CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS.....</b>	<b>45</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>47</b>
<b>APÉNDICES.....</b>	<b>50</b>

## Lista de Figuras

Figura 1: Ejemplo de un proceso de ensamblaje final bajo ATO .....	2
Figura 2: Tiempo de Seguridad variable.....	4
Figura 3: Sistema de ATO con entrega variable.....	5
Figura 4 Costo total óptimo según Seijo-Vidal (2009).....	10
Figura 5 Flujograma del Modelo .....	14
Figura 6 Comportamiento del Inventario Promedio según el EOQ.....	16
Figura 7 Comportamiento Teórico del EOQ .....	17
Figura 8 Comportamiento de los costos según el EOQ teóricos Vs. Simulación.....	30
Figura 9 Intervalos de Confianza para el número esperado de órdenes de remplazo.....	32
Figura 10 Intervalos de confianza para el inventario promedio .....	33
Figura 11 Intervalo de confianza del número esperado de órdenes atrasadas .....	34
Figura 12 Intervalos de confianza para el costo total .....	35
Figura 13 Costo Total Teórico Vs. Costo Total del Optimizador.....	37
Figura 14 Costo Total con un tiempo de seguridad constante $d \leq l_{min}$ y $d \leq l_{max}$ .....	39
Figura 15 Nivel de reordenar con un tiempo de seguridad constante $d \leq l_{min}$ y $d \leq l_{max}$ ...	39
Figura 16 Costo Total con un tiempo de seguridad constante $l_{min} \leq d \leq l_{max}$ .....	40
Figura 17 Nivel de Reordenar con un tiempo de seguridad constante $l_{min} \leq d \leq l_{max}$ .....	40
Figura 18 Costo total y Nivel de reordenar Constante Vs. aleatorio intervalo $E[d] \leq l_{min}$	41
Figura 19 Costo total y Nivel de reordenar intervalo $l_{min} \leq E[d] \leq l_{max}$ .....	43
Figura 20 Costo total y Nivel de reordenar Constante Vs. aleatorio intervalo $E[d] \geq l_{max}$	44

## Lista de Tablas

Tabla 1 Escenarios utilizados para la verificación del EOQ.....	15
Tabla 2 Valores teórico de la política ( $Q, r$ ) .....	20
Tabla 3 Valores de entrada en la simulación .....	21
Tabla 4 Valores obtenidos del optimizador vs. Teóricos.....	23
Tabla 5 Niveles utilizados en el diseño de experimento.....	24
Tabla 6 Escenarios utilizados en la validación con Seijo-Vidal (2009) .....	25
Tabla 7 Valores de $Q$ y $r$ utilizados en el Optimizador.....	26
Tabla 8 Valores teóricos del EOQ Vs. Valores obtenidos de la simulación.....	29
Tabla 9 Valores para el número esperado de órdenes de remplazo .....	32
Tabla 10 Valores para el inventario promedio.....	33
Tabla 11 Valores para el número de órdenes atrasadas .....	34
Tabla 12 Valores del costo total.....	35
Tabla 13 Valores del Optimizador .....	37

## Lista de Abreviaturas

ATO	<i>Assembly to Order</i>
MTS	<i>Make to Stock</i>
LT	<i>Lead time</i>
EOQ	<i>Economic Order Quantity</i>
TC	Costo Total
$LT_{min}$	<i>Lead time mínimo</i>
IC	Intervalo de Confianza
$LT_{max}$	<i>Lead time máximo</i>

## Lista de Apéndices

Apéndice A: Programación y gráfico del modelo en Arena Rockwell Software.....	52
Apéndice B: Gráficas del Costo Total y Nivel de Reordenar para la Verificación con Seijo-Vidal (2009) en el intervalo $d \leq l_{min}$ y $d \leq l_{max}$ .....	55
Apéndice C: Gráficas del Costo Total y Nivel de Reordenar para la Verificación con Seijo-Vidal (2009) en el intervalo $l_{min} \leq d \leq l_{max}$ .....	57
Apéndice D: Gráficas del Costo Total y Nivel de Reordenar de la Experimentación en el intervalo $E[d] \leq l_{min}$ .....	59
Apéndice E: Gráficas del Costo Total y Nivel de Reordenar de la Experimentación en el intervalo $l_{min} \leq E[d] \leq l_{max}$ .....	61
Apéndice F: Gráficas del Costo Total y Nivel de Reordenar de la Experimentación en el intervalo $E[d] \leq l_{max}$ .....	63

## Glosario

1. SIMAN – es un lenguaje de simulación de eventos discretos que permite modelar el manejo de componentes en un sistema de manufactura.
2. ARENA - es un programa de simulación de eventos discretos y automatización que permite optimizar y animar procesos.
3. *Assembly to order* - uno de los ambientes básicos de manufactura donde se dilata el ensamblaje final hasta que el cliente define las últimas características del producto.

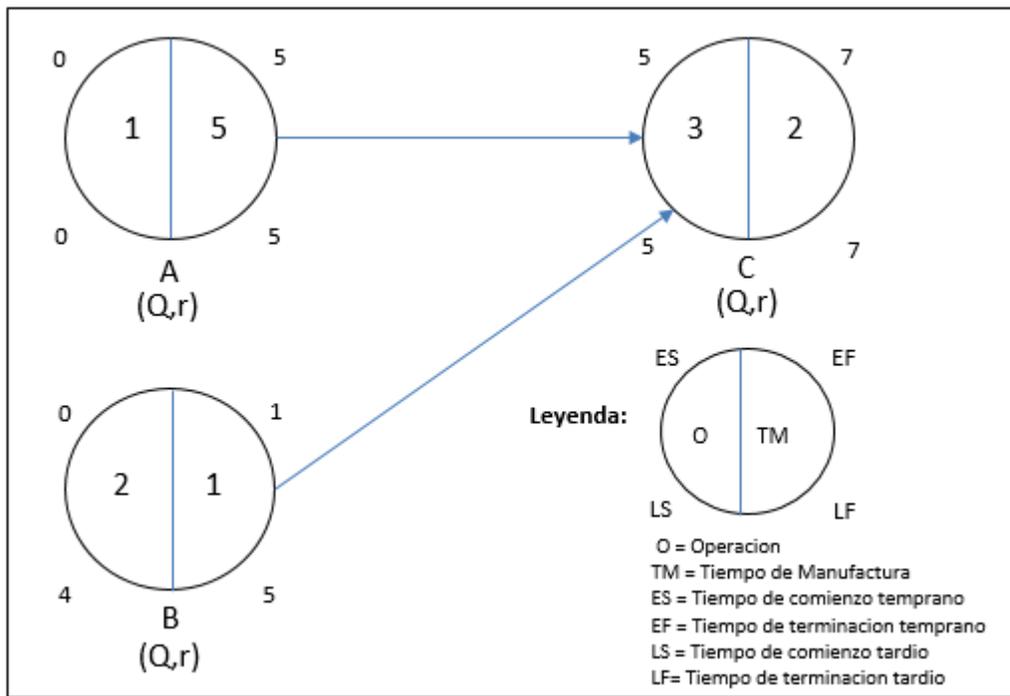
# 1 INTRODUCCIÓN

Las organizaciones de manufactura utilizan diferentes estrategias para satisfacer las ordenes de los clientes, entre las que se encuentran: *Make to Stock* (MTS) y *Assembly to Order* (ATO). Esta investigación se enfoca en la estrategia ATO en donde el manufacturero dilata el ensamblaje final hasta recibir una orden fija del cliente. Esto significa que no se mantiene inventario del producto terminado, sino de los componentes o piezas que son necesarios para el ensamblaje final. El servicio al cliente en este ambiente se mide basado en el cumplimiento de la fecha prometida, y la misma se le brinda al cliente tan pronto éste entra la orden al manufacturero. Por lo tanto, satisfacer la promesa de embarque depende de la disponibilidad de los componentes y no del inventario del producto terminado.

La política de inventario  $(Q, r)$  asume un costo de penalidad que se incurre si el producto en cuestión no está disponible justo cuando se recibe la demanda. Cuando esta política está siendo utilizada en un ambiente ATO para controlar el inventario de los componentes que se requieren para completar el ensamblaje final, la teoría existente asume, para propósitos de tomar la decisión de reordenar, que la demanda se reconoce cuando el componente es requerido en el proceso de manufactura y no cuando se recibe la orden del cliente.

Seijo-Vidal (2009), estudia la política  $(Q, r)$  bajo un ambiente ATO asumiendo que la decisión de reordenar de cada componente ocurre al momento de recibir la orden del cliente y no cuando el componente es requerido en el proceso de manufactura. Bajo este escenario, es posible que la falta de inventario de un componente al momento de recibo de la orden del cliente, no redunde en fallar la promesa de entrega al cliente si el componente se hace disponible antes de

ser requerido en el proceso de manufactura. Seijo-Vidal (2009) reconoce que cada componente tiene entonces un tiempo de seguridad, que se define como el tiempo máximo que transcurre desde que se recibe la orden del cliente, hasta que el componente es requerido en el proceso de manufactura para cumplir con la promesa de embarque.



**Figura 1: Ejemplo de un proceso de ensamblaje final bajo ATO**

La Figura 1 muestra el concepto del tiempo de seguridad en un ambiente ATO con 3 estaciones de trabajo (1, 2 y 3); en cada estación se requiere un componente (A, B y C) y un tiempo de manufactura (5, 1 y 2). Asumiendo que las políticas de inventario que se siguen en cada estación de trabajo son independientes y que la operación en la estación subsiguiente no puede comenzar hasta que su predecesora haya terminado, entonces podemos calcular el tiempo

de seguridad para los componentes A, B y C, como 0, 4 y 5 unidades de tiempo, respectivamente correspondiente al tiempo de comienzo tardío (LS).

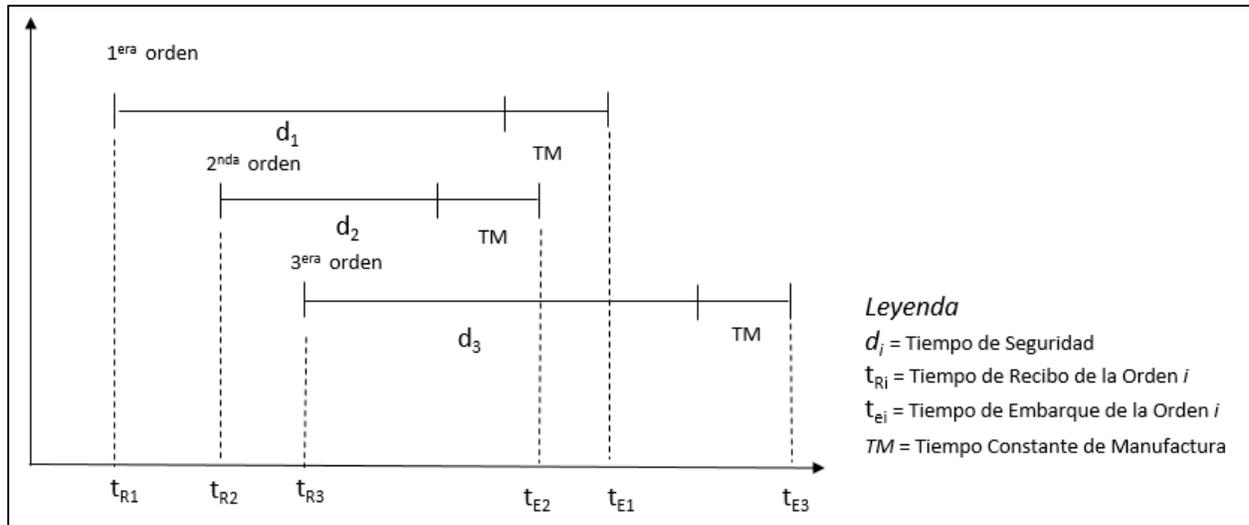
A diferencia de Seijo-Vidal (2009), en donde se estudió matemáticamente el comportamiento de una política de inventario  $(Q, r)$  bajo la premisa de un tiempo de seguridad constante, esta investigación estudia el comportamiento de la política bajo la premisa de un tiempo de seguridad aleatorio y haciendo uso de la simulación de eventos discretos en computadora. La premisa de aleatoriedad se basa en que en un ambiente real, el tiempo de seguridad debe ser variable y no constante.

## **1.1 Descripción del Problema**

Esta investigación estudia la política de inventario  $(Q, r)$  en un entorno de manufactura ATO, en donde la demanda de los componentes, para propósito de tomar la decisión de reordenar, es reconocida cuando se recibe la orden del cliente y no cuando los componentes son requeridos en el proceso de manufactura. Se asume que el manufacturero asigna una promesa de embarque al cliente, la cual, de no ser satisfecha, obliga a que se incurra un costo de penalidad. Este costo se incurre como resultado de no tener los componentes disponibles al momento de ser requeridos en el proceso de manufactura. Bajo este escenario, Seijo-Vidal (2009) identifica un tiempo de seguridad para cada componente que permite embarcar la orden del cliente a tiempo y no incurrir en costo de penalidad, aunque no se tuviera inventario disponible al momento de recibir la orden del cliente, siempre y cuando el material se consiga a tiempo para cuando es requerido en manufactura.

Las siguientes premisas se hacen como parte de este estudio (favor de referirse a la Figura 2):

- 1) el manufacturero incluye un tiempo de seguridad como parte de la promesa de embarque del producto terminado,
- 2) el tiempo de seguridad es variable como resultado de, entre otras cosas, las condiciones del proceso de manufactura (capacidad, problemas de calidad, roturas de máquina, etc.) y las necesidades del cliente (urgencia, método de embarque, etc.).

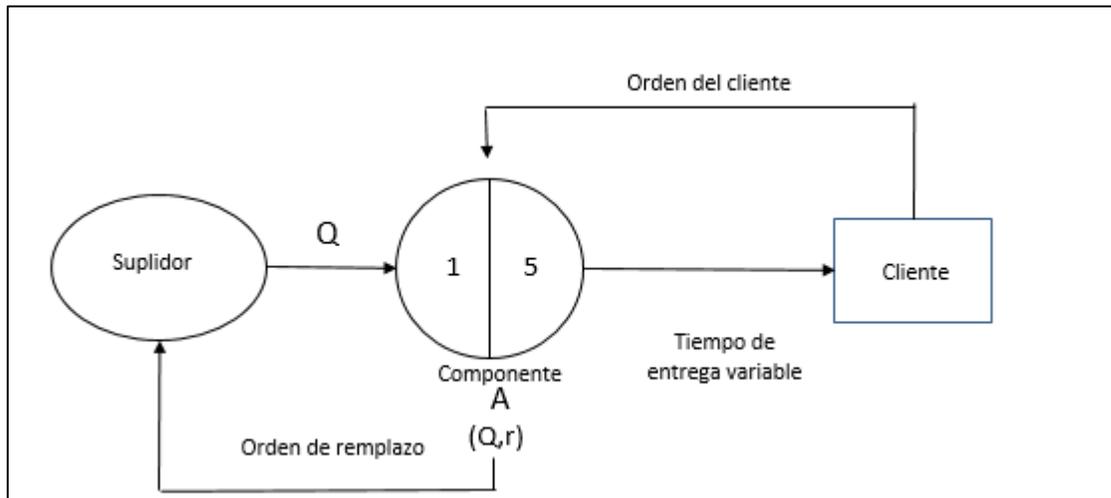


**Figura 2: Tiempo de Seguridad variable**

Partiendo de estas premisas, la investigación asume que el tiempo de seguridad a nivel de los componentes es aleatorio y sigue una distribución exponencial con parámetro conocido.

En la práctica, es común que la decisión con respecto a cuándo ordenar ( $r$ ) y cuánto ordenar ( $Q$ ) se tome de manera independiente. Esto es, la  $Q$  y la  $r$  de cada componente se definen sin tomar en cuenta el efecto que puedan tener entre sí, como resultado de la interrelación que existe a lo largo del proceso de manufactura para completar. Como resultado de esto, esta investigación estudia el comportamiento de la política  $(Q, r)$  con respecto al tiempo aleatorio de seguridad para el sistema más sencillo posible: una estación de trabajo con un solo componente. Esto sienta las

bases para investigaciones futuras en donde se estudien sistemas más complejos que permitan evaluar la interrelación entre las políticas de diferentes componentes a lo largo del proceso de manufactura.



**Figura 3: Sistema de ATO con entrega variable**

La Figura 3 presenta gráficamente el sistema ATO que se estudia en esta investigación. La misma asume un solo componente que se rige por la política de inventario  $(Q, r)$  y una sola estación de trabajo en donde se requiere el componente. El tiempo de embarque al cliente asume un tiempo de manufactura constante y un tiempo de seguridad aleatorio. Además, se asume que la orden de reemplazo del componente tiene un *lead time* y que la capacidad del suplidor es infinita.

Seijo-Vidal (2009) estudió el escenario descrito en el párrafo anterior bajo la premisa de que el tiempo de seguridad es constante y bajo dos escenarios o políticas diferentes de embarque:

1) el cliente permite embarques antes de la promesa establecida y 2) el cliente no permite embarques temprano. En adición, concluyó que bajo ciertas condiciones, la política  $(Q, r)$  en un

ambiente ATO puede tener un desempeño mejor cuando se reconoce la demanda al momento de recibir la orden del cliente.

Esta investigación utiliza simulación de eventos discretos para estudiar, bajo una política en donde el cliente no permite embarques antes de tiempo, el impacto que tiene un tiempo de seguridad aleatorio en las conclusiones de Seijo-Vidal (2009).

## **1.2 Motivación**

La motivación de esta investigación surge del deseo de entender más a fondo el comportamiento de la política de inventario  $(Q, r)$  cuando es utilizada en el entorno de producción ATO bajo la premisa de que el tiempo de seguridad es variable, en particular, aleatorio. Bajo esta premisa, el modelo se asemeja más a un sistema real en donde, factores como las condiciones del proceso de manufactura (capacidad, problemas de calidad, roturas de máquina, etc.) y las necesidades del cliente (urgencia, método de embarque, etc.) pueden afectar el tiempo de promesa y, por ende, el tiempo de seguridad. Entonces, resulta interesante entender cómo la aleatoriedad del tiempo de seguridad afecta el comportamiento de la política de inventario al compararlo con un tiempo constante.

## 2 REVISIÓN DE LITERATURA

La mayoría de las investigaciones relacionadas al control y manejo de inventario se enfocan, al igual que en el caso de esta investigación, en optimizar los parámetros de la política de inventario basado en minimizar los costos relacionados con la política. Bookbinder & Cakanyildirim (1999); Eltawil & Elnagar (2007); Hayya et. al.(2008); Hou & Zhang (2007); Woo (1991); WU (2008) son literaturas aplicadas a un entorno donde la orden del cliente es servida o satisfecha desde un inventario de producto terminado, lo cual se conoce como un ambiente de manufactura *Make-toStock* (MTS). Por otro lado Benjaafar & Elhafsi (2006); Hillier (2002); Lu et. al. (2003); Mishra (1999); Mohebbi & Choobineh (2004); Ning Hsu et. al. (2006); Shang Song & Yao (2002), al igual que en ésta investigación, aplican al entorno *Assembly to Order* (ATO), en donde existe un inventario de los componentes y los sub-ensamblajes, pero no del producto terminado. En este entorno, se procede a hacer el ensamblaje final para su subsecuente embarque una vez el cliente coloca la orden del producto.

Bookbinder & Cakanyildirim (1999); WU (2008) modelaron interrupciones ya sean por consecuencias del ambiente externo o interno que afectan el nivel de inventario en un entorno MTS. En ambas investigaciones, se aplican heurísticos a la política de inventario  $(Q, r)$  en un ambiente de incertidumbre dado por la aleatoriedad en la demanda y el *lead time*, y se estudian sus efectos con respecto al costo total del inventario. Al igual, Hadley & Within (1963) aplican esta política con distintos tipos de costos, niveles de servicio y los niveles de inventario de seguridad. Otros autores que utilizan la política de inventario  $(Q, r)$  son entre otros: Hou & Zhang (2007) y Woo (1991). En particular, este último busca aproximaciones de los parámetros  $(Q, r)$  a través del método Markovian donde se busca minimizar el costo promedio del inventario.

A diferencia de esta investigación, los estudios mencionados consideran la política  $(Q, r)$  en un ambiente MTS.

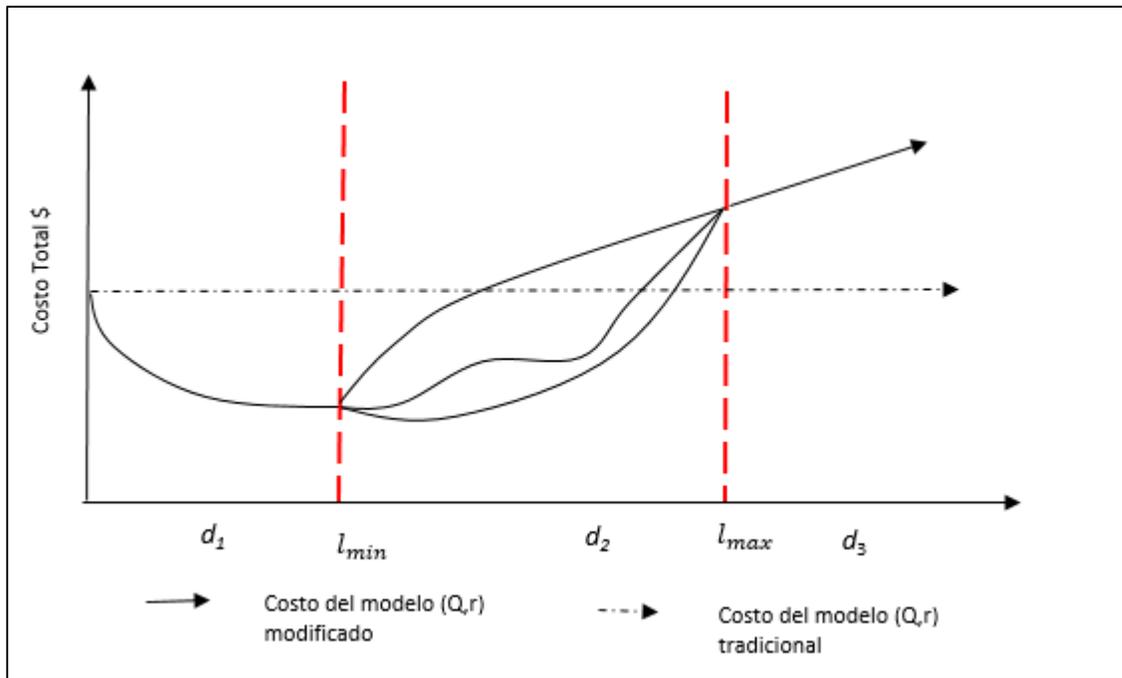
Benjaafar & Elhafsi (2006); Lu et. al. (2003) tienen como fin optimizar la cantidad de ordenar en un ambiente ATO y siguiendo una política  $(s, S)$ , pero a diferencia de esta investigación, ellos se enfocan en la variación del *lead time* y no incorporan el concepto del tiempo de seguridad.

Todas las literaturas mencionadas anteriormente, utilizan modelos matemáticos para determinar los niveles óptimos de la política de inventario. Según Eltawil & Elnagar (2007), en un modelo matemático las soluciones se limitan por la generalización de las presunciones. No obstante también indican que el utilizar una cantidad grande de variables puede causar que el modelo matemático no sea la opción más viable, ya que añade complejidad causando un alto costo computacional. Por esta razón, los autores utilizan la simulación como una herramienta de investigación, en específico, la optimización en una política de inventario  $(s, S)$  para identificar y entender las razones de los cambios en las variables. Wan y Kleijnen (2006), determinan los valores de los parámetros de la política de inventario  $(s, S)$  bajo unas condiciones existentes determinadas a través de la simulación, con la intención de probar que los valores estimados en la simulación son los óptimos.

El tiempo de seguridad que surge en un entorno ATO, cuyo fin es proteger la promesa de embarque de las incertidumbres que pueden surgir durante los procesos de manufactura, queda excluido de las investigaciones antes mencionadas. Seijo-Vidal, (2009), estudia este tiempo de seguridad bajo la premisa de una política  $(Q, r)$  implantada para manejar el inventario de los componentes o sub-ensamblajes. En su investigación, el modelo matemático de costos estudiado

por Hadley & Within (1963) es modificado para incorporar un tiempo de seguridad constante bajo dos escenarios diferentes: 1) el cliente permite entregas antes de la fecha de embarque y 2) entregas tempranas de embarque no son permitidas. En ambos escenarios, se toma como base la metodología de Hadley & Within (1963) para explicar el impacto que tiene en el costo óptimo del modelo, el tiempo de seguridad constante a medida que este aumenta.

Seijo-Vidal (2009) encontró en el escenario en donde embarques antes de tiempo son permitidos, que la política de inventario  $(Q, r)$  modificada para incorporar el tiempo de seguridad tiende a dar costos menores a la política  $(Q, r)$  tradicional estudiada por Hadley & Within (1963), independientemente del valor que se asuma para los parámetros del modelo. En el escenario en donde embarques antes de tiempo no son permitidos, Seijo-Vidal (2009) estudió el comportamiento del modelo con respecto al intervalo dado por un *lead time* mínimo ( $LT_{min}$ ) y un *lead time* máximo ( $LT_{max}$ ) bajo las siguientes premisas: 1) cuando el tiempo de seguridad constante  $d_1 \leq LT_{min}$ , 2) cuando el tiempo de seguridad constante  $d_2 \in (LT_{min}, LT_{max}]$  y 3) cuando el tiempo de seguridad constante  $d_3 > LT_{max}$ . Seijo-Vidal (2009) encontró en el caso en donde  $d_2 \in (LT_{min}, LT_{max}]$ , que el desempeño del modelo es dependiente de los valores que asuman los parámetros del mismo; sin embargo, el desempeño es independiente a los parámetros del modelo en los otros dos escenarios (refiérase a la figura 4). En particular, la política modificada tiende a dar costos menores a la tradicional cuando  $d_1 \leq LT_{min}$ , y costos mayores cuando  $d_3 > LT_{max}$ .



**Figura 4 Costo total óptimo según Seijo-Vidal (2009)**

Esta investigación se diferencia de Seijo-Vidal (2009) en cuanto a que incorpora en el estudio un tiempo de seguridad variable, con el objetivo de estudiar un escenario más representativo de la realidad. En particular, asume que el tiempo de seguridad es aleatorio con distribución conocida. Otra diferencia fundamental, es la utilización de simulación de eventos discretos en tiempo real para realizar el estudio, debido a que se prevé que el comportamiento del modelo es dependiente de los parámetros.

### 3 METODOLOGÍA

Esta investigación está basada en el trabajo de Seijo-Vidal (2009), en donde se demuestra que el modelo matemático de la política  $(Q, r)$  modificado para incorporar un tiempo de seguridad constante, se comporta de la siguiente manera:

1. Modelo EOQ – bajo las premisas de un tiempo de seguridad  $d = 0$ , una razón de demanda constante y conocida, y un tiempo de reemplazo (*lead time* del suplidor)  $LT = 0$ .
2. Modelo  $(Q, r)$  de Hadley & Within (1963) – bajo las premisas de un tiempo de seguridad  $d = 0$ , una demanda por unidad de tiempo aleatoria y estacionaria, y un tiempo de reemplazo aleatorio.

Seijo-Vidal (2009) estudia el comportamiento del modelo modificado para diferentes tiempos de seguridad constantes y conocidos, y desarrolla la curva del costo óptimo con respecto al tiempo de seguridad.

La investigación actual se basa en estudiar el comportamiento del modelo modificado bajo la premisa de un tiempo de seguridad aleatorio. Para esto, se utilizó simulación de eventos aleatorios discretos en tiempo real, por lo cual, se requirió verificar y validar el modelo de simulación. Para propósitos de verificación, se corroboró bajo las siguientes premisas que el modelo de simulación se comporta como el modelo EOQ: tiempo de seguridad  $d = 0$ , una razón de demanda constante y conocida, y un tiempo de reemplazo (*lead time* del suplidor)  $LT = 0$ .

Para propósito de validación, se corroboró lo siguiente para ciertas condiciones en específico:

1. Que el modelo de simulación se comportara como el modelo matemático de la política  $(Q, r)$  de Hadley & Within (1963) bajo las premisas de un tiempo de seguridad  $d = 0$ , una demanda por unidad de tiempo aleatoria y estacionaria, y un tiempo de reemplazo aleatorio.
2. Que la curva de costo óptimo del modelo de simulación con respecto al tiempo de seguridad tuviera el mismo comportamiento encontrado por Seijo-Vidal (2009) cuando se asume un tiempo de seguridad constante y conocido. En este punto de la investigación fue necesario validar el optimizador de ARENA, programa de simulación utilizado en la investigación.

Una vez completada la validación, se procedió a estudiar el impacto que tiene un tiempo de seguridad aleatorio en el comportamiento de la curva de costo óptimo del modelo de simulación con respecto al valor esperado del tiempo de seguridad, y se comparó con Seijo-Vidal (2009).

Las siguientes secciones de la metodología detallan el desarrollo, verificación y validación del modelo de simulación y su respectiva experimentación para comparar el comportamiento de la política modificada de inventario  $(Q, r)$  bajo un tiempo de seguridad constante y conocido vs. un tiempo de seguridad aleatorio y estacionario.

### 3.1 Desarrollo del modelo

Esta investigación utilizó el programa ARENA como la herramienta de simulación de eventos discretos en tiempo real para modelar la política de inventario  $(Q, r)$ , modificada para incorporar el tiempo de seguridad. La conceptualización del modelo utiliza SIMAN, lenguaje de simulación, para crear dos redes lógicas de instrucciones que simulan lo siguiente: 1) el ciclo de recibo y despacho de la orden del cliente y 2) el ciclo de reemplazo de material del proveedor. Los parámetros de la simulación del primer ciclo son: la razón del tiempo entre llegadas de las órdenes del cliente, el tiempo de seguridad asignado a cada orden, el nivel de reordenar ( $r$ ) y el tamaño de la orden de reemplazo ( $Q$ ); mientras que en el segundo ciclo, el parámetro es el *lead time*. Cada corrida de simulación corrió por un largo equivalente de 100 años, donde un año laboral se compone de 240 días laborales y 8 horas de trabajo al día, para un total de 1920 horas por corrida de simulación.

El siguiente algoritmo explica la red lógica que representa el ciclo de recibo y despacho de la orden del cliente:

Comenzar,

Recibir la orden del cliente;

Verificar nivel de inventario y ordenar material de reemplazo de ser necesario;

Dilatar la orden del cliente de acuerdo al tiempo de seguridad;

Mientras el *inventario* = 0, orden del cliente espera en fila;

Dilatar orden del cliente de acuerdo al tiempo de manufactura;

Terminar.

El siguiente algoritmo explica la red lógica que representa el ciclo de la orden de reemplazo de material del proveedor:

Comenzar,

Se genera orden de reemplazo al proveedor;

Orden de reemplazo se dilata por tiempo equivalente al *lead time*;

Se recibe orden de reemplazo y se añade cantidad al inventario;

Terminar.

La siguiente figura muestra la interacción entre ambas lógicas para poder emular el comportamiento del proveedor y el fabricante, en un ambiente ATO que incluye un tiempo de seguridad aleatorio en la fecha de entrega al cliente.

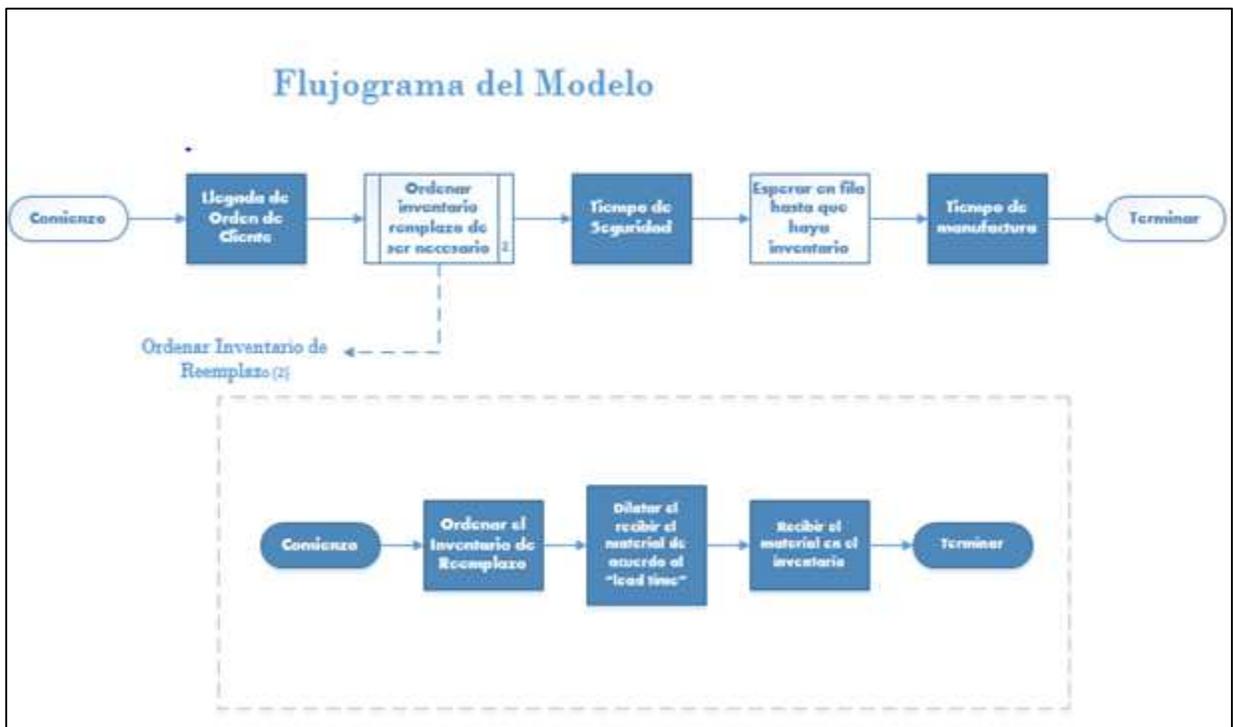


Figura 5 Flujograma del Modelo

Entre las presunciones del modelo se encuentran las siguientes: a) el proveedor tiene suficiente capacidad e inventario para abastecer la demanda del fabricante b) el nivel de inventario del fabricante inicia con la cantidad de ordenar ( $Q$ ) más el nivel de reordenar ( $r$ ). Las estadísticas de interés generadas por la simulación son las siguientes: número de órdenes de reemplazo, inventario promedio y número de órdenes de clientes atrasadas.

### 3.2 Verificación del modelo con la Política del EOQ

El comportamiento del modelo de simulación se verificó con la política del *economic order quantity* (EOQ) bajo las premisas de un tiempo de seguridad  $d = 0$ , una razón de demanda constante y conocida, y un *lead time*  $LT = 0$  ó instantáneo.

Se experimentó, haciendo uso de un diseño  $2^3$ , con 8 escenarios diferentes en los que se le asignó un nivel máximo y mínimo a cada factor experimental: razón de demanda anual ( $D$ ), costo de ordenar ( $A$ ) y costo de mantener inventario ( $IC$ ). A continuación los 8 escenarios utilizados:

**Tabla 1 Escenarios utilizados para la verificación del EOQ**

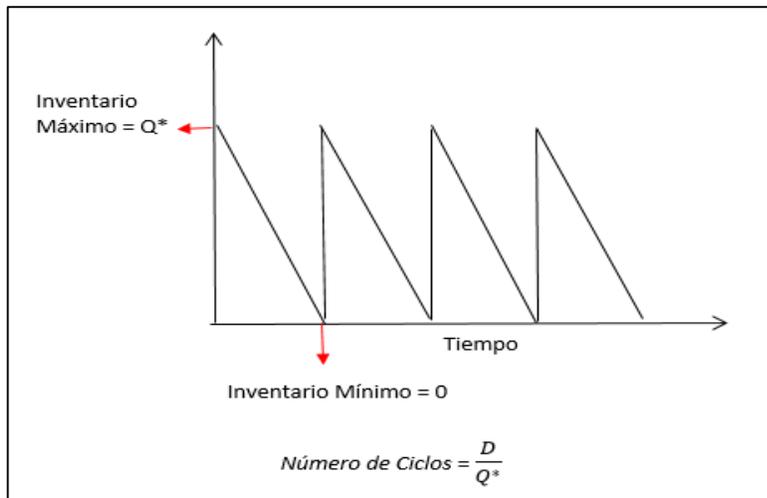
Escenario	$D$	$IC$	$A$	$Q_{EOQ}^*$
1	24000	\$ 40.00	\$ 120.00	379
2	24000	\$ 40.00	\$ 60.00	268
3	24000	\$ 20.00	\$ 120.00	537
4	24000	\$ 20.00	\$ 60.00	379
5	16000	\$ 40.00	\$ 120.00	310
6	16000	\$ 40.00	\$ 60.00	219
7	16000	\$ 20.00	\$ 120.00	506
8	16000	\$ 20.00	\$ 60.00	310

A cada uno de estos escenarios se le calculó el EOQ o  $Q^*$  y el número de ciclos esperados  $N$ , según las fórmulas teóricas del modelo EOQ:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DA}{IC}}, \quad (1)$$

$$N = \frac{D}{Q^*}. \quad (2)$$

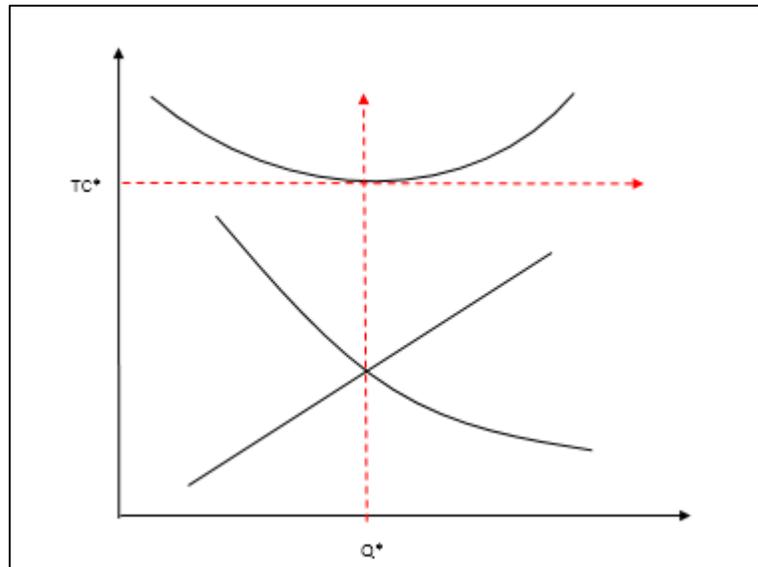
Una vez se obtuvo  $Q^*$  para cada uno de los escenarios, se redondeó al entero más cercano y el valor obtenido se utilizó como parámetro de entrada en la simulación. En adición, el nivel de reordenar, el tiempo de seguridad y el tiempo de reemplazo del proveedor, se fijaron en cero. Se procedió a correr una réplica para obtener el inventario mínimo, el inventario máximo y el número de ciclos de reemplazo, para cada escenario con el objetivo de verificar que la curva de inventario del modelo de simulación se comportara de acuerdo al modelo teórico del EOQ (ver Figura 6).



**Figura 6 Comportamiento del Inventario Promedio según el EOQ**

La teoría del EOQ nos demuestra que la  $Q^*$ , y por ende el costo total anual mínimo, ocurre cuando el costo anual de ordenar es igual al costo anual de mantener inventario dada la relación

inversa que existe entre ambos costos. Adicional a esto, a medida que  $Q$  aumenta, el costo anual de ordenar disminuye en proporción inversa y el costo anual de inventario aumenta linealmente (ver Figura 7). Este comportamiento se verificó para los escenarios 3 y 6.



**Figura 7 Comportamiento Teórico del EOQ**

Una vez completadas estas verificaciones, se procedió a validar el modelo de simulación con la política de control de inventario  $(Q, r)$  bajo la premisa de una demanda aleatoria, lo cual se explica en la próxima sección.

### **3.3 Validación del Modelo con la Política $(Q, r)$**

El modelo de simulación se verificó y validó con la política de control de inventario  $(Q, r)$ , para lo cual, se corrió bajo las siguientes presunciones: un tiempo de seguridad igual a cero, un *lead time* mayor que cero y un tiempo entre llegadas de órdenes de clientes exponencial con parámetro  $(\lambda)$  conocido. La verificación se realizó principalmente con la función de *Trace* de ARENA, la cual permite rastrear las órdenes del cliente para asegurar que el comportamiento del

modelo es el esperado. Para propósitos de validación, se ejecutaron los siguientes pasos, los cuales son explicados en detalle en los párrafos subsiguientes:

1. Del modelo de simulación, se determinó la distribución de la demanda durante el *lead time*.
2. Para el modelo teórico:
  - a. Se utilizó la distribución determinada en el paso anterior para calcular la  $Q^*$  y  $r^*$ .
  - b. Se calculó el costo total anual esperado, el número esperado de órdenes de reemplazo anuales, el inventario promedio esperado y el número esperado de órdenes atrasadas.
3. Se corrió la simulación con la  $Q^*$  y  $r^*$  calculadas en el paso 2.a., y se estimaron los intervalos de confianza para el costo total anual esperado, el número esperado de órdenes de reemplazo anuales, el inventario promedio esperado y el número esperado de órdenes atrasadas.
4. Se verificó que las estadísticas del modelo teórico estuvieran contenidas dentro de sus respectivos intervalos de confianza, según fueron calculados en el paso anterior.

Se utilizó el algoritmo de la política tradicional  $(Q, r)$  según Hadley & Within (1963), para poder conseguir los valores teóricos, el cual asume que la distribución de la demanda durante el *lead time* es conocida. Por esta razón, fue necesario determinar la distribución que sigue esta demanda en el modelo de simulación. Debido a que la distribución del tiempo entre llegadas de las órdenes de los clientes se asume exponencial ( $\lambda$ ), donde  $\lambda = \text{ordenes}/\text{tiempo (horas)}$ , podemos concluir que la distribución de la demanda (órdenes llegadas o recibidas) por hora sigue una distribución *Poisson*. Asumiendo, para propósitos de ésta validación, que el *lead time* es de 80 horas, podemos concluir que la demanda durante el *lead time* es una variable aleatoria representada

por la suma de variables *Poisson* independientes. Por el Teorema del Límite Central podemos concluir que la demanda durante el *lead time* tiende a una distribución normal  $(\mu, \sigma^2)$ , donde  $\mu = 80 \text{ horas} * \frac{1}{\text{ordenes/tiempo}}$  representa el valor esperado de la demanda, y  $\sigma^2 = 80 \text{ horas} * \frac{1}{\text{ordenes/tiempo}}$  representa la varianza.

Se utilizó el algoritmo de (Hadley & Within, 1963) para calcular los valores teóricos de la política  $(Q, r)$ : la cantidad óptima a ordenar  $Q^*$ , el nivel óptimo de reordenar  $r^*$ , el costo total anual esperado  $TC$ , el número esperado de órdenes de reemplazo anuales  $\frac{D}{Q^*}$ , el inventario promedio esperado  $\frac{Q^*}{2}(r^* - \mu)$ , y el número esperado de órdenes atrasadas al año  $\frac{D}{Q^*}E[BO|r^*]$ . Este algoritmo es un proceso iterativo que inicia con un valor de  $Q$  denominado como  $Q_W = EOQ$ , el cual se coloca en la siguiente ecuación y se despeja para el valor de  $r$ .

$$H(r) = \frac{QIC}{\pi D}. \quad (3)$$

El valor calculado de  $r$  se coloca en la siguiente fórmula para obtener el número esperado de órdenes atrasadas en un ciclo:

$$E[BO|r] = \left[ (\mu - r)\Phi\left(\frac{r-\mu}{\sigma}\right) + \sigma\phi\left(\frac{r-\mu}{\sigma}\right) \right], \quad (4)$$

donde  $\Phi\left(\frac{r-\mu}{\sigma}\right)$  es la función acumulativa inversa y  $\phi\left(\frac{r-\mu}{\sigma}\right)$  es la función de densidad de la normal estandarizada para una distribución normal  $N(\mu, \sigma^2)$ . Una vez obtenido el valor esperado de órdenes atrasadas en un ciclo, este valor se utiliza en la siguiente ecuación para calcular un nuevo

valor de  $Q^*$ :

$$Q^* = \sqrt{\frac{2D(A+\pi E[BO])}{IC}}. \quad (5)$$

Este nuevo valor de  $Q^*$ , llamado  $Q_1$ , lo sustituimos en la ecuación # 3 para recalcular la nueva  $r$ , llamada  $r_1$ . Ese valor de  $r_1$  se usa para recalcular el  $E[BO|r]$  con la ecuación # 4, y ese valor se lleva a la ecuación # 5 para recalcular la  $Q_2$ . Este proceso iterativo se lleva a cabo hasta que la  $Q^*$  converge con la  $r^*$ , este punto suele llegar cuando la  $Q^*$ , al recalcularse ya no cambia de valor. Esa  $Q^*$  y  $r^*$  que convergen son las que se utilizan para calcular el costo total que sería el costo mínimo.

La fórmula de costo total anual esperado es compuesta por el costo anual esperado de ordenar material de reemplazo, el costo esperado de mantener inventario y el costo anual esperado de penalidad incurrido al tener órdenes en atraso.

$$\text{Costo Total} = \frac{D}{Q^*}A + \frac{Q^*}{2}(r^* - \mu)IC + \frac{D}{Q^*}\pi E[BO|r^*] \quad (6)$$

Donde, para propósito de validación:

$A = \$10$ : costo de ordenar,

$IC = \$1.08$ : costo de inventario por unidad por unidad de tiempo,

$\pi = \$2.00$ : costo de penalidad por unidad, y

$D = \left(\frac{1}{\lambda}\right) * 8 \text{ hrs/día} * 240 \text{ días/año}$ : demanda anual esperada,

Los siguientes 3 escenarios se utilizaron para calcular los valores teóricos:

**Tabla 2 Valores teórico de la política ( $Q, r$ )**

Escenario	$\lambda$	$D$	$\mu$	$\sigma$	$Q^*$	$r^*$	$TC$	# esperado de órdenes anuales	# esperado de órdenes atrasadas	Inventario Promedio
1	1	1920.00	80.00	8.944	192.390	94.370	\$ 223.29	9.980	2.048	110.570
2	0.10	19200.00	800.00	28.284	606.560	859.920	\$ 719.80	31.650	5.498	363.200
3	6	320.00	13.33	3.651	78.840	17.390	\$ 89.53	4.060	0.993	43.480

El modelo de simulación se corrió para cada uno de los tres escenarios, redondeando el valor teórico obtenido para la  $Q^*$  y  $r^*$  al entero más cercano. Se construyeron intervalos de confianza para cada una de las métricas de interés: el costo total anual esperado, el número esperado de órdenes de reemplazo anuales, el inventario promedio esperado y el número esperado de órdenes atrasadas al año. Los valores entrados en la simulación para cada uno de los escenarios fueron los siguientes:

**Tabla 3 Valores de entrada en la simulación**

Escenario	$\lambda$	Lead time	$Q_{Simu}^*$	$r_{Simu}^*$
1	Expo(1)	80 hrs.	192	94
2	Expo(.10)	80 hrs.	606	860
3	Expo(6)	80 hrs.	79	17

Para cada uno de los escenarios, el modelo de simulación se corrió con 10 repeticiones iniciales. Luego, se determinó el número mínimo de corridas  $N^*$  requeridas según Pegden, Shannon, & Sadowski (1995) para construir intervalos de 95% de confianza y un error relativo de 5% a cada métrica de interés, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$N^* = n * \left( \frac{t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2(x)}{n}}}{\bar{X} * Error\ Relativo} \right)^2 \quad (7)$$

Donde,

$n$ , es el número de corridas o repeticiones que definen la muestra inicial,

$1 - \alpha$ , es el porcentaje de confianza,

$\bar{X}$ , es la media de la muestra para la métrica de interés, y

$S^2(x)$ , es la varianza de la muestra para la métrica de interés.

Para completar la validación del modelo de simulación de acuerdo a la política de control de inventario  $(Q, r)$ , se verificó, para cada escenario, que los valores teóricos de las métricas de interés estuvieran contenidos en sus respectivos intervalos de confianza.

### **3.4 Validación del Optimizador**

La herramienta que se utilizó para llevar a cabo la investigación fue *OptQuest*, optimizador del programa de Arena Rockwell. Este optimizador trabaja definiendo una región de búsqueda para  $Q$  y  $r$ , y definiendo una función objetivo, la cual, para esta validación, fue la minimización de la ecuación del costo total anual esperado (ecuación #6) de la política de control de inventario  $(Q, r)$ . Iterativamente, de acuerdo a un algoritmo interno, el optimizador calcula y compara el costo total anual esperado de dos combinaciones consecutivas de  $Q$  y  $r$ , y mantiene la información de la combinación que represente el costo menor. La búsqueda continúa hasta ofrecer un óptimo local luego de un número de iteraciones, predeterminadas por el usuario, en donde la función objetivo no mejora.

Para asegurar un análisis estadístico adecuado, el optimizador le permite al usuario definir el número de corridas o réplicas a realizarse con cada iteración de búsqueda, así como, definir las condiciones iniciales de la simulación y sus estadísticas. Para propósitos de esta investigación y luego de varias pruebas de ensayo y error, se definió hacer 3 réplicas, cada una de un largo equivalente a 100 años, reinicializar las estadísticas y regresar al estado inicial con cada iteración nueva.

El optimizador se validó con la política de control de inventario  $(Q, r)$  para cada uno de los escenarios definidos en la sección anterior (refiérase a la tabla #3). Para esto, el modelo de simulación se corrió bajo las siguientes presunciones: un tiempo de seguridad igual a cero, un *lead time* mayor que cero y un tiempo entre llegadas de órdenes de clientes exponencial con parámetro  $(\lambda)$  conocido. Los pasos que se siguieron en cada escenario son:

1. Se definió la región de búsqueda, de forma tal que los valores teóricos óptimos de la política de control de inventario  $(Q, r)$ ,  $Q^*$  y  $r^*$ , estuvieran contenidos dentro de la región.
2. La combinación óptima local obtenida por *OptQuest*, definida de ahora en adelante como  $Q_{Opt}^*$  y  $r_{Opt}^*$ , se utilizó como parámetro de entrada en el modelo de simulación para construir un intervalo de 95% de confianza al costo total anual esperado, con un error relativo de 5%.
3. Se verificó que el costo total anual esperado de la política de control de inventario  $(Q, r)$ , calculado para  $Q^*$  y  $r^*$ , estuviera contenido dentro del intervalo de confianza establecido en el paso anterior.

La siguiente tabla (Tabla 4) presenta los valores óptimos de  $Q$  y  $r$ , tanto teóricos como los obtenidos con el optimizador *OptQuest*.

**Tabla 4 Valores obtenidos del optimizador vs. Teóricos**

Escenario	$Q_{Teo}^*$	$r_{Teo}^*$	$Q_{Opt}^*$	$r_{Opt}^*$
1	192	94	193	94
2	606	860	599	860
3	79	17	80	17

### 3.5 Verificación con Seijo- Vidal (2009)

El comportamiento del modelo de simulación se verificó con Seijo-Vidal (2009), asumiendo un tiempo de seguridad  $d \geq 0$ , constante y conocido. Se definieron 8 escenarios de acuerdo a un diseño de experimento  $2^4$  medio factorial, en donde los factores experimentales son los siguientes: el costo de ordenar ( $A$ ), el costo de inventario ( $IC$ ), el costo de penalidad ( $\pi$ ) y el tiempo entre llegada ( $\lambda$ ). El diseño de experimento se compone de un total de 8 escenarios, en donde los factores  $\lambda$ ,  $A$  y  $\pi$  se observan cada uno 4 veces en su nivel alto y 4 veces en su nivel bajo, mientras que el factor  $IC$  se observa dos veces en su nivel alto y 4 veces en su nivel bajo dado que en Seijo-Vidal (2009) se concluyó que este era el factor menos relevante. (Refiérase Tabla 4)

**Tabla 5 Niveles utilizados en el diseño de experimento**

Nivel	$\lambda$	$IC$	$A$	$\pi$
Bajo	Expo(6)	\$ 5.00	\$ 1.08	\$ 2.00
Alto	Expo(1)	\$ 10.00	\$ 2.16	\$ 4.00

En particular, para cada escenario presentado en la Tabla 5, se verificó que la curva del costo total anual esperado óptimo en función del tiempo de seguridad  $d$ , siguiese el mismo comportamiento encontrado por Seijo-Vidal (2009). Según Montgomery (2001) destaca la importancia de tener un grupo control que pueda ser utilizado para comparar los resultados obtenidos con el grupo experimental. Estos escenarios se utilizaron para formar el grupo control que serán la base de comparación con el grupo experimental desarrollado en la próxima sección.

**Tabla 6 Escenarios utilizados en la validación con Seijo-Vidal (2009)**

Escenario	$\lambda$	$IC$	$A$	$\pi$
1	Expo(6)	\$ 5.00	\$ 1.08	\$ 2.00
2	Expo(1)	\$ 5.00	\$ 1.08	\$ 2.00
3	Expo(6)	\$ 5.00	\$ 1.08	\$ 4.00
4	Expo(6)	\$ 10.00	\$ 2.16	\$ 4.00
5	Expo(1)	\$ 5.00	\$ 1.08	\$ 4.00
6	Expo(1)	\$ 10.00	\$ 2.16	\$ 4.00
7	Expo(6)	\$ 5.00	\$ 2.16	\$ 2.00
8	Expo(1)	\$ 5.00	\$ 2.16	\$ 2.00

Para cada escenario de la Tabla 6, se corrió el siguiente algoritmo con el objetivo de construir la curva del costo total anual esperado óptimo en función del tiempo de seguridad  $d$ :

Comenzar,

Definir  $d = \text{límite mínimo}$ ;

Mientras  $d \leq \text{límite máximo}$ ,

Utilizar *OptQuest* para determinar  $Q_{opt}^*$  y  $r_{opt}^*$ ;

Graficar el costo total anual esperado óptimo obtenido con  $Q_{opt}^*$  y  $r_{opt}^*$ ;

Definir  $d = d + \text{incremento}$ ;

Terminar el ciclo;

Terminar;

Para propósito de correr el optimizador, los siguientes valores de  $Q$  y  $r$  presentados en la tabla 7, fueron utilizados como base para definir la región de búsqueda.

**Tabla 7 Valores de  $Q$  y  $r$  utilizados en el Optimizador**

Escenario	$Q_{EOQ}^*$	$r$
1	54	18
2	133	96
3	54	19
4	54	18
5	133	99
6	133	96
7	38	17
8	94	94

Este algoritmo se corrió bajo dos condiciones diferentes:

1. *Lead time* de la orden de remplazo del suplidor constante y conocido, en particular, 40 horas, y
2. *Lead time* de la orden de remplazo del suplidor que sigue una distribución aleatoria conocida, en particular, uniforme (40, 60) horas.

Para la primera condición, se utilizó un *límite mínimo* = 0 horas, un *límite máximo* = 50 horas e *incremento* = 10 horas. Esto nos permite entender el comportamiento de la curva del costo total anual esperado óptimo cuando  $d \leq \textit{lead time}$  y cuando  $d \geq \textit{lead time}$ . Para la segunda condición, se utilizó un *límite mínimo* = 40 horas, un *límite máximo* = 60 horas e *incremento* = 5 horas. Esto nos permite entender el comportamiento de la curva del costo total anual esperado óptimo cuando  $\textit{lead time mínimo} \leq d \leq \textit{lead time máximo}$ .

### **3.6 Experimentación**

En la experimentación se utilizó el mismo diseño de experimento y escenarios mencionados en la Tabla 6 de la sección anterior, pero asumiendo un tiempo de seguridad  $d$  que sigue una distribución aleatoria conocida, en particular, exponencial. Para cada escenario de la

Tabla 6, se corrió el mismo algoritmo mencionado en la sección 3.5 para construir la curva del costo total anual esperado óptimo en función del valor esperado del tiempo de seguridad  $d$ , con las siguientes dos siguientes condiciones:

1. *Lead time* de la orden de remplazo del suplidor es constante y conocido, en particular, 40 horas,
2. *Lead time* de la orden de remplazo del suplidor sigue una distribución aleatoria conocida, en particular, uniforme (40, 60) horas.
3. En la primera condición se utilizó un *límite mínimo* =  $Expo(10)$  horas, un *límite máximo* =  $Expo(50)$  horas e *incremento* = 10 horas para el valor esperado del tiempo de seguridad  $d$ . Esto nos permite entender el comportamiento de la curva del costo total anual esperado óptimo cuando  $E[d] \leq lead\ time$  y cuando  $E[d] \geq lead\ time$ . Para la segunda condición, se utilizó un *límite mínimo* =  $Expo(40)$  horas, un *límite máximo* =  $Expo(60)$  horas e *incremento* = 5 horas para el valor esperado del tiempo de seguridad  $d$ . Esto nos permite entender el comportamiento de la curva del costo total anual esperado óptimo cuando  $lead\ time\ mínimo \leq E[d] \leq lead\ time\ máximo$ .

El propósito de esta sección es poder concluir sobre las diferencias que existen entre usar un tiempo de seguridad constante versus uno aleatorio y qué efectos tiene en términos de la curva de costo total anual esperado, la cantidad a ordenar y el nivel de reordenar.

## 4 ANÁLISIS Y RESULTADOS

En esta sección, podemos encontrar los resultados obtenidos de cada una de las secciones antes mencionadas. A manera de resumen, el modelo de simulación desarrollado en esta investigación es representativo de los siguientes modelos relacionados a la teoría de control de inventario:

1. EOQ bajo las presunciones de un tiempo de seguridad igual a cero, un tiempo de LT igual a cero y una demanda constante y conocida.
2. Política  $(Q, r)$  bajo las presunciones de un tiempo de seguridad igual a cero y una demanda estacionaria y aleatoria con parámetros conocidos.
3. Política  $(Q, r)$  modificada con un tiempo de seguridad constante y conocido para un ambiente de manufactura ATO bajo la premisa de que el cliente no acepta embarques antes de tiempo Seijo-Vidal (2009).

En cuanto a la experimentación, pudimos observar que al tener un tiempo de seguridad aleatorio, el modelo tiende a definir un nivel de reordenar mayor a cuando se tiene un tiempo de seguridad constante, por ende, el costo anual total tiende a ser más alto. Adelante se explica en detalle los resultados obtenidos en cada una de las secciones.

### 4.1 Resultados de la verificación del EOQ

El comportamiento de nuestro modelo en comparación con el EOQ tradicional fue similar, con la única diferencia que el número de ciclos de remplazo es un entero exacto dado que es un contador en la simulación y el valor teórico es un número continuo.

En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos en la simulación y los valores obtenidos según las formulas teóricas del EOQ.

**Tabla 8 Valores teóricos del EOQ Vs. Valores obtenidos de la simulación**

Escenario	Teórico				Simulación			
	Inventario Mínimo	Inventario Maximo	# esperado de órdenes anuales	$Q_{EOQ}^*$	$Q_{EOQ}^*$	Inventario Mínimo	Inventario Maximo	# esperado de órdenes
1	0	379.47	63.25	379.47	379	0	379	63
2	0	268.33	89.44	268.33	268	0	268	89
3	0	536.66	44.72	536.66	537	0	537	44
4	0	379.47	63.25	379.47	379	0	379	63
5	0	309.84	51.64	309.84	310	0	310	51
6	0	219.09	73.03	219.09	219	0	219	73
7	0	505.96	31.62	505.96	506	0	506	31
8	0	309.84	51.64	309.84	310	0	310	51

Una vez observado que los valores entre el modelo teórico y la simulación son similares, se utilizaron los escenarios 3 y 6 para verificar el comportamiento del EOQ gráficamente según Render , Stair, & Hanna (2009), mencionado anteriormente. En las siguientes graficas se muestra como los costos obtenidos por la simulación se comportan igual que los costos obtenidos teóricamente.

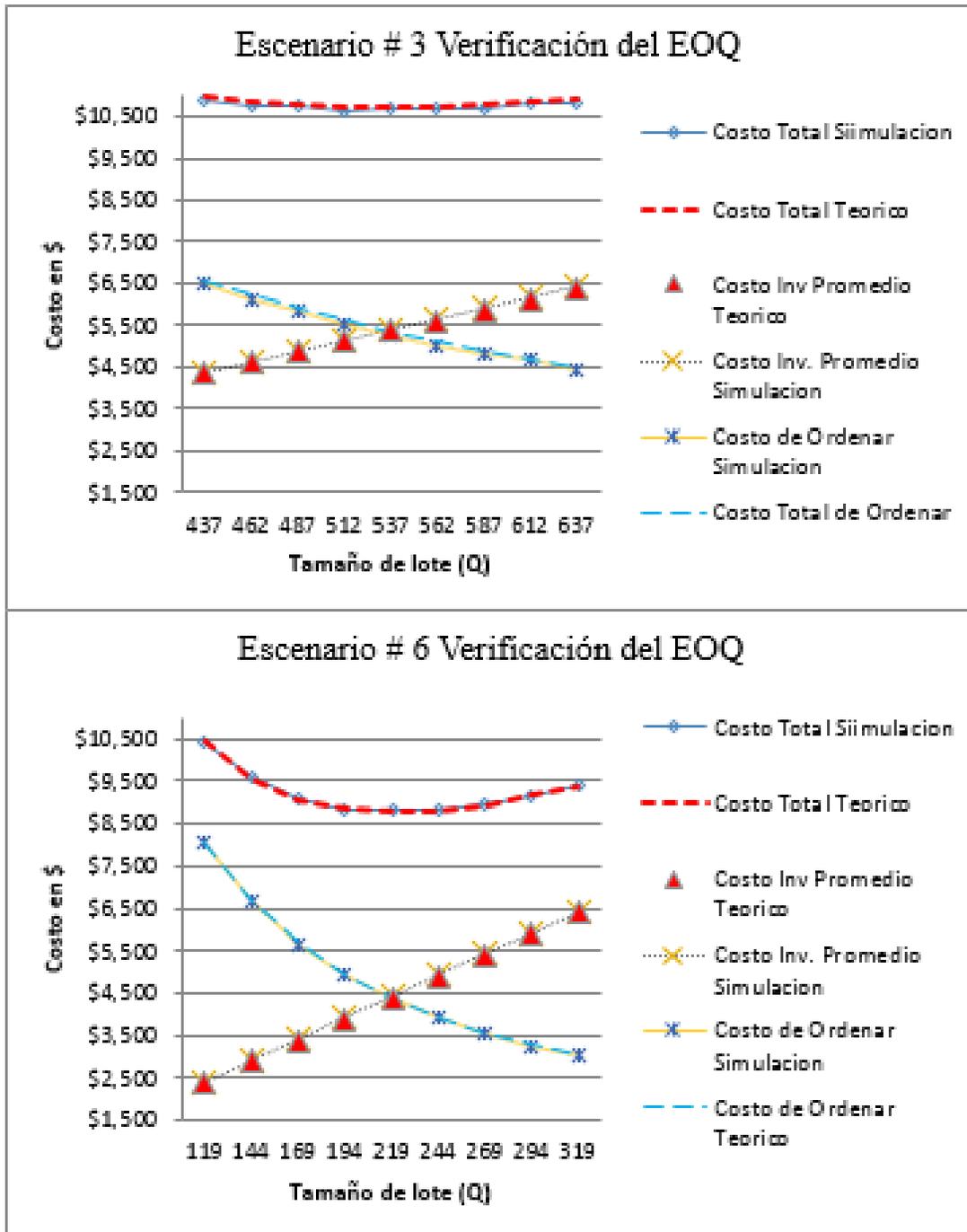


Figura 8 Comportamiento de los costos según el EOQ teóricos Vs. Simulación

## 4.2 Resultados de la validación con la política $(Q, r)$

De acuerdo a lo establecido en la sección 3.3, se corrieron tres escenarios diferentes con el objetivo de verificar y validar el modelo de simulación con la política de control de inventario  $(Q, r)$ . Para cada escenario, se verificó que el modelo reflejara los siguientes comportamientos:

1. el modelo pone la orden de reemplazo al proveedor justo cuando la posición del inventario, definida como *Inventario Físico – Ordenes atrasadas + Inventario en Tránsito*, llega al nivel de reordenas  $r$ ,
2. toda orden de cliente que llega cuando no hay inventario físico disponible es clasificada como orden atrasada,
3. el material de las órdenes de reemplazo esperan una cantidad de tiempo igual al *lead time* antes de considerarse disponibles en el inventario físico, y
4. las órdenes atrasadas de los clientes son satisfechas en el orden en que se recibieron tan pronto el material de la orden de reemplazo se considera como inventario físico disponible.

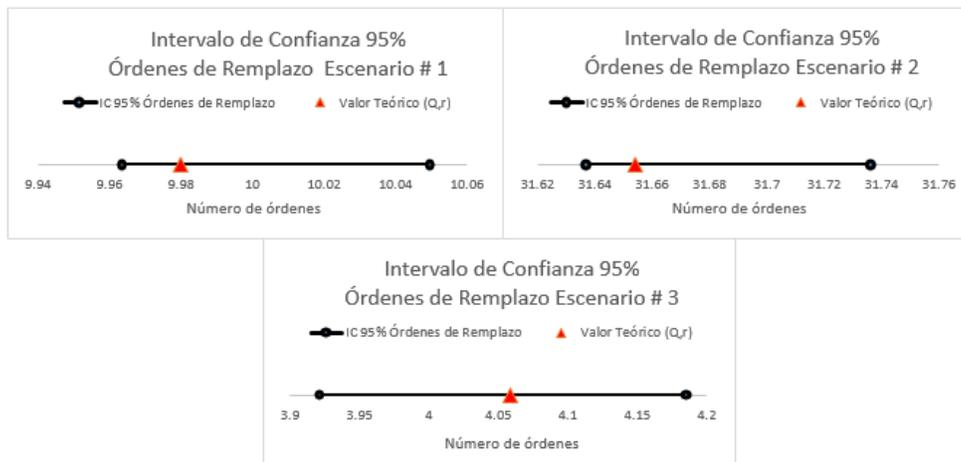
Con respecto a la validación, se calcularon los valores  $Q^*$  y  $r^*$  de acuerdo al algoritmo de Hadley & Within (1963), y se corroboró que las métricas de interés del modelo teórico estuvieran contenidas en los intervalos de confianza obtenidos de la simulación. Las métricas de interés fueron las siguientes: el costo total anual esperado, el número anual esperado de órdenes de reemplazo, el inventario promedio esperado y el número anual esperado de órdenes atrasadas.

Es importante mencionar que, con el objetivo de minimizar el tiempo de corrida de máquina para cada escenario, se decidió hacer corridas de simulación de un largo equivalente a 100 años; cada año compuesto por 240 días, de 8 horas cada uno. Las estadísticas de la simulación fueron reiniciadas con cada nueva réplica.

La siguiente tabla (tabla 9) y figura (figura 9) demuestran la validación del modelo de simulación con respecto al número anual esperado de órdenes de remplazo. Esta métrica se obtuvo de un contador en la simulación, por lo cual, el resultado del contador fue dividido entre 100 años.

**Tabla 9 Valores para el número esperado de órdenes de remplazo**

Escenario	Teórico	Simulación			
	# esperado de órdenes de remplazo	Intervalo de confianza 95% Simulación		$N^*$	# de corridas
1	9.98	9.96	10.05	1	3
2	31.65	31.64	31.74	1	3
3	4.06	3.92	4.19	1	3

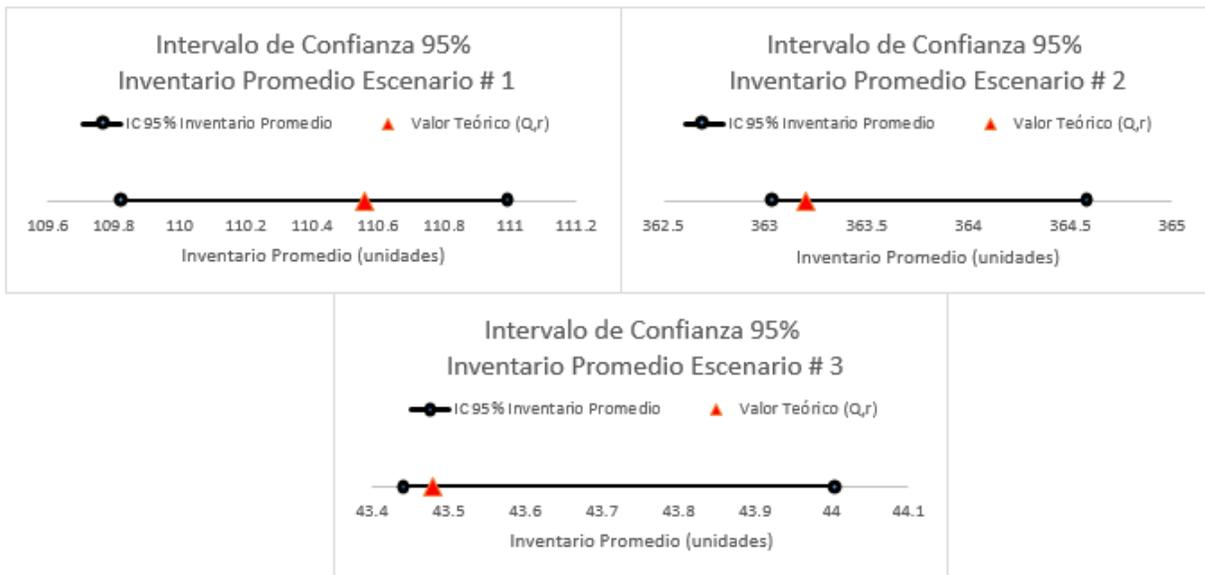


**Figura 9 Intervalos de Confianza para el número esperado de órdenes de remplazo**

La siguiente tabla (Tabla 10) y figura (figura 10) demuestran la validación del modelo de simulación con respecto al inventario promedio. Esta métrica es un cálculo que se obtiene de las estadísticas de la simulación.

**Tabla 10 Valores para el inventario promedio**

Escenario	Teórico	Simulación			
	Inventario Promedio	Intervalo de confianza 95% Simulación		# de corridas	
1	110.56	109.83	110.99	1	3
2	363.2	363.03	364.59	1	3
3	43.48	43.44	44.00	1	3

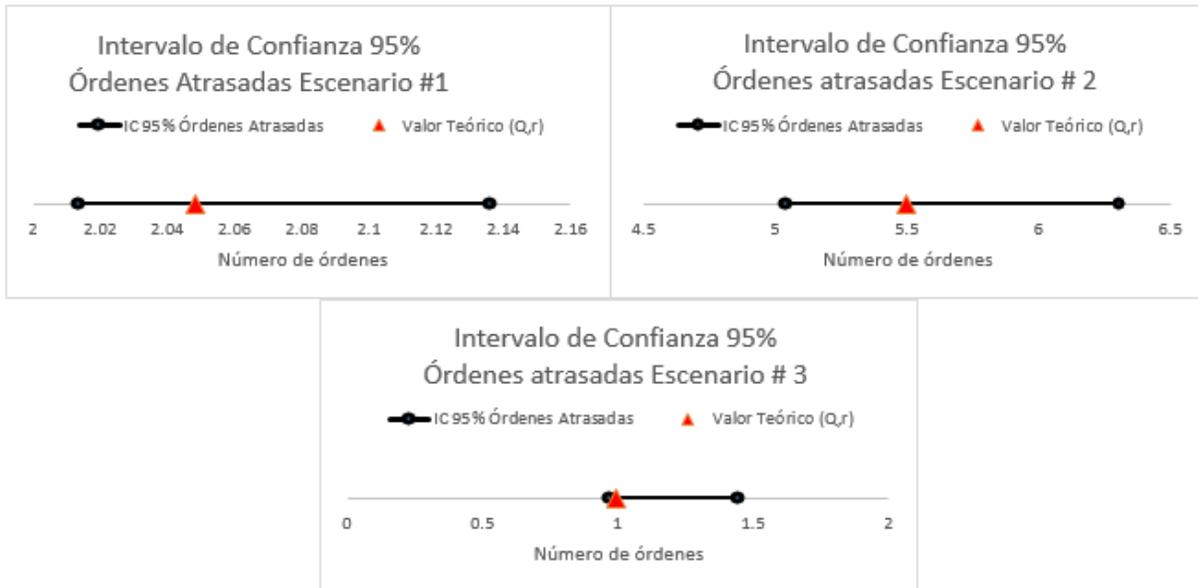


**Figura 10 Intervalos de confianza para el inventario promedio**

La siguiente tabla (Tabla 11) y figura (figura 11) demuestran la validación del modelo de simulación con respecto al número esperado de órdenes atrasadas. Esta métrica se obtuvo de un contador en la simulación, por lo cual, el resultado del contador fue dividido entre 100 años.

**Tabla 11 Valores para el número de órdenes atrasadas**

Escenario	Teórico	Simulación			
	# esperado de órdenes atrasadas	Intervalo de confianza 95% Simulación		$N^*$	# de corridas
1	2.048	2.0136	2.1364	4	10
2	5.498	5.044	6.310	2	3
3	0.993	0.967	1.439	1	3

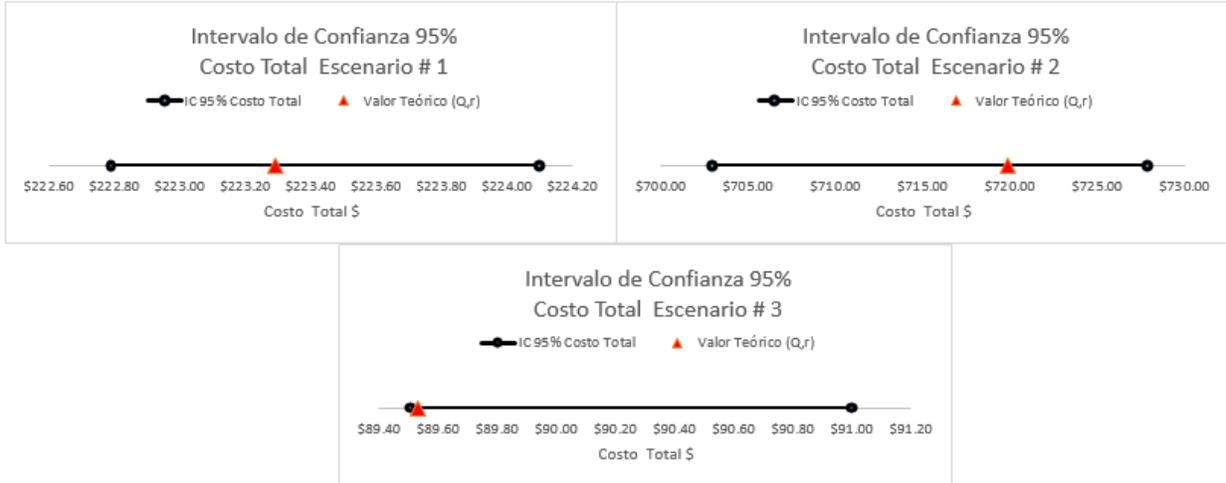


**Figura 11 Intervalo de confianza del número esperado de órdenes atrasadas**

La siguiente tabla (Tabla 12) y figura (figura 12) demuestran la validación del modelo de simulación con respecto al costo total. Esta métrica se obtuvo a través de la ecuación 6.

**Tabla 12 Valores del costo total**

Escenario	Teórico	Simulación			
	$TC_{teo}$	Intervalo de confianza 95% Simulación		$N^*$	# de corridas
1	\$ 223.29	\$ 219.99	\$ 225.43	1	3
2	\$ 719.80	\$ 703.00	\$ 727.89	1	3
3	\$ 89.53	\$ 89.50	\$ 91.01	1	3



**Figura 12 Intervalos de confianza para el costo total**

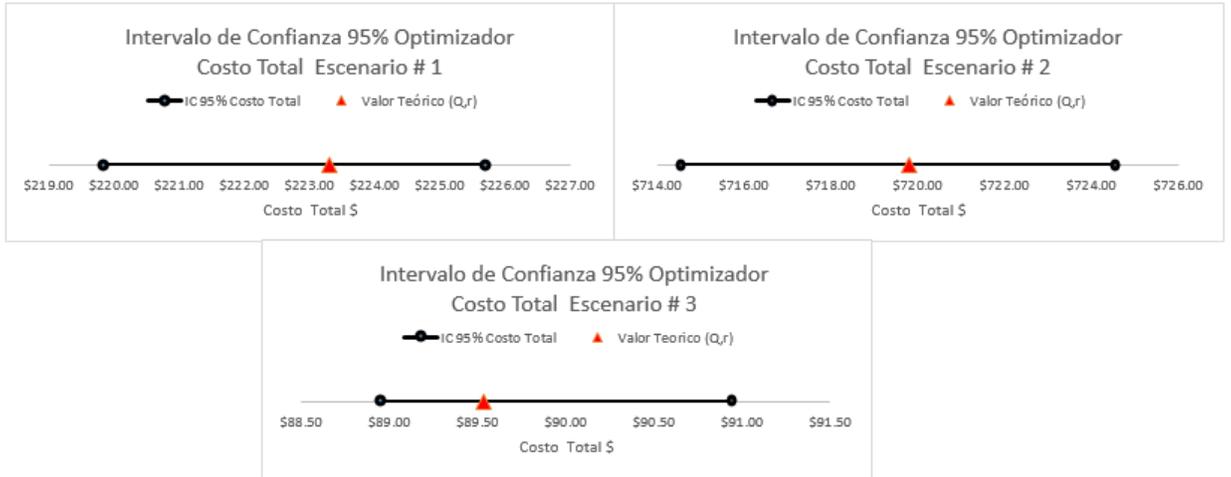
En conclusión, de acuerdo a lo esperado, el modelo de simulación valida de acuerdo a la política de control de inventario  $(Q, r)$  bajo las siguientes presunciones: un tiempo de seguridad igual a cero, un *lead time* mayor que cero y un tiempo entre llegadas de órdenes de clientes exponencial con parámetro  $(\lambda)$  conocido.

### 4.3 Resultados de la Validación del Optimizador

De acuerdo a lo establecido en la sección 3.4, con el objetivo de validar el optimizador *OptQuest*, se corrieron tres escenarios diferentes bajo las condiciones en las que el modelo de simulación se comporta de acuerdo a la política de control de inventario  $(Q, r)$ . Los resultados del optimizador se utilizaron como parámetros de entrada en el modelo de simulación para calcular intervalos de 95% de confianza al costo total anual esperado, con un error relativo de 5%.

Se observó que los valores óptimos obtenidos por *OptQuest*,  $Q_{Opt}^*$  y  $r_{Opt}^*$ , no necesariamente son los valores óptimos teóricos,  $Q^*$  y  $r^*$ . Esto era esperado, ya que, a diferencia del modelo teórico, la simulación incorpora incertidumbre en el estudio como resultado de la generación de eventos aleatorios. En adición, el optimizador utiliza un algoritmo de búsqueda, no exhaustivo, que incorpora meta-heurísticos para dirigir la búsqueda hacia una solución suficientemente buena, pero sin garantía de ser el óptimo global. Como consecuencia, el número esperado anual de órdenes de reemplazo, el inventario promedio esperado y el número esperado anual de órdenes atrasadas, no son métricas consideradas para propósitos de validación, ya que son dependientes a los valores de  $Q$  y  $r$ . Sin embargo, debido a que la teoría de inventario indica que valores de  $Q$  y  $r$  en la proximidad de  $Q^*$  y  $r^*$  no deben reflejar un cambio significativo en el costo total anual esperado, se utilizó ésta métrica para propósitos de validación.

Las siguiente tabla (Tabla 13) y figura (Figura 13) demuestran la validación del optimizador con respecto al modelo de control de inventario  $(Q, r)$ , ya que, para cada escenario, se observa que el valor teórico óptimo del costo total anual esperado, calculado con  $Q^*$  y  $r^*$ , está contenido en el intervalo de confianza construido al correr la simulación con los valores de  $Q_{Opt}^*$  y  $r_{Opt}^*$ .



**Figura 13 Costo Total Teórico Vs. Costo Total del Optimizador**

**Tabla 13 Valores del Optimizador**

Escenario	Teórico	Optimizador			
	$TC_{teo}$	Intervalo de confianza 95% Optimizador		$N^*$	# de corridas
1	\$ 223.29	\$ 219.86	\$ 225.71	1	3
2	\$ 719.80	\$ 714.56	\$ 724.56	1	3
3	\$ 89.53	\$ 88.95	\$ 90.95	1	3

Por lo que pudimos concluir que el optimizador puede ser la herramienta a utilizarse y puede representar el comportamiento del costo total.

#### 4.4 Resultados de la Validación de la Política con Seijo-Vidal (2009)

Esta sección presenta los resultados del modelo de simulación asumiendo un tiempo de seguridad  $d$  constante y conocido, y lo compara con Seijo-Vidal (2009), el cual demuestra el siguiente comportamiento;

- 1) el costo total anual esperado óptimo en función del tiempo de seguridad  $d$ , disminuye en el intervalo donde la  $d$  es menor que un *lead time* mínimo ( $d \leq l_{min}$ ),
- 2) el costo total anual esperado óptimo en función del tiempo de seguridad  $d$ , depende de los parámetros de entrada del problema, cuando la  $d$  se encuentra entre un *lead time* mínimo y un *lead time* máximo ( $l_{min} \leq d \leq l_{max}$ ),
- 3) el costo total anual esperado óptimo en función del tiempo de seguridad  $d$ , aumenta en el intervalo donde la  $d$  es mayor que un *lead time* máximo ( $d \geq l_{max}$ ).
- 4) El nivel de reordenar disminuye en todos los intervalos a medida que el tiempo de seguridad  $d$  aumenta.

El comportamiento del costo total anual esperado resulto ser el mismo en los intervalos donde el tiempo de seguridad  $d$  es menor que un *lead time* mínimo ( $d \leq l_{min}$ ), que la tendencia fue a disminuir y cuando el tiempo de seguridad  $d$  es mayor que un *lead time* máximo ( $d \geq l_{max}$ ), que la tendencia fue a aumentar. En la siguiente figura se muestra ambos comportamientos para el escenario # 1:

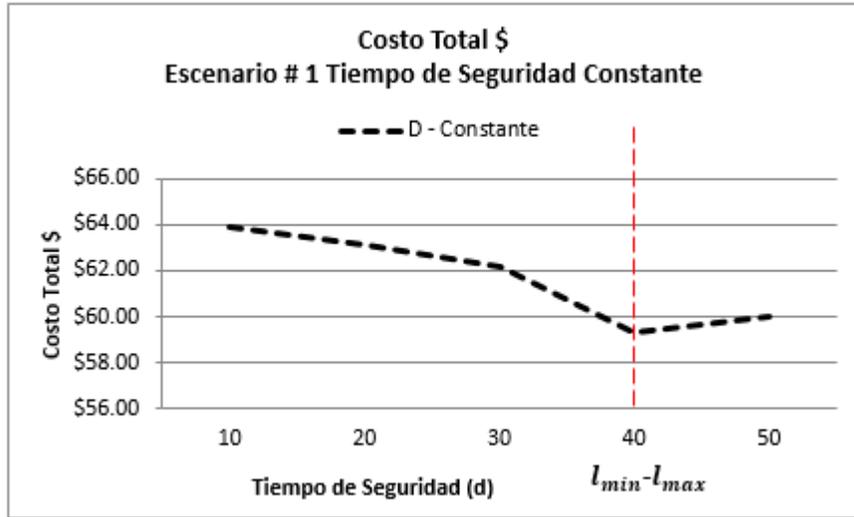


Figura 14 Costo Total con un tiempo de seguridad constante  $d \leq l_{min}$  y  $d \leq l_{max}$

En cuanto al nivel de reordenar pudimos observar que en ambos intervalos su tendencia fue disminuir a medida que el tiempo de seguridad  $d$  aumentaba. (Refiérase a la figura 15)

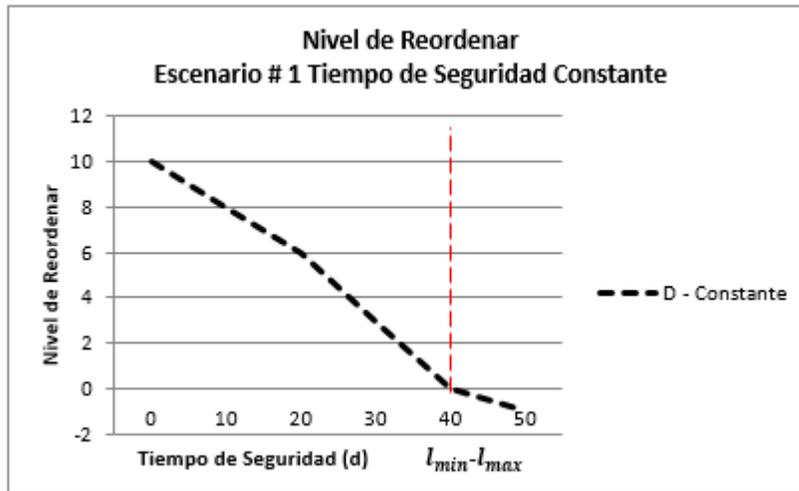
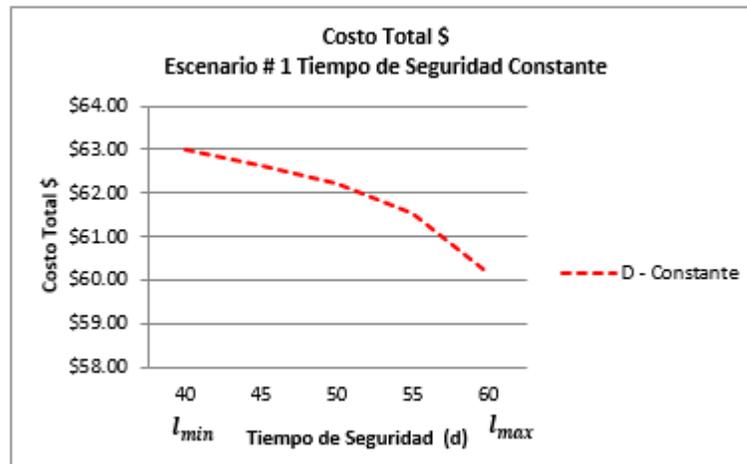


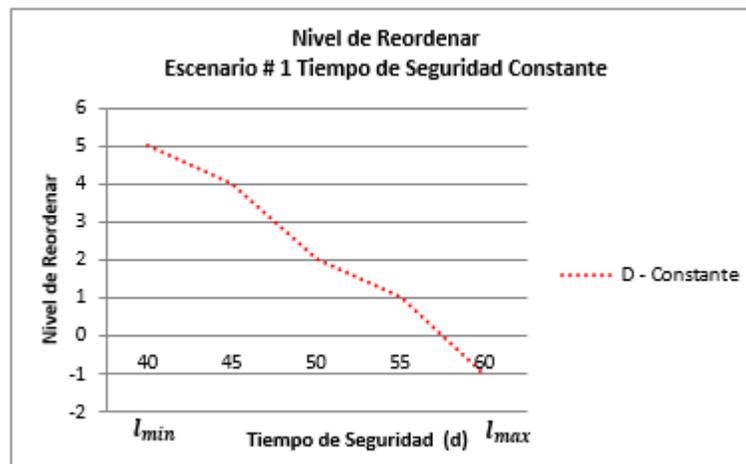
Figura 15 Nivel de reordenar con un tiempo de seguridad constante  $d \leq l_{min}$  y  $d \leq l_{max}$

Finalmente en la siguiente figura se muestra el comportamiento del costo total anual esperado en el intervalo donde el tiempo de seguridad  $d$  estaba entre un *lead time* mínimo y un *lead time* máximo, ( $l_{min} \leq d \leq l_{max}$ ), donde se observo que siempre disminuye a medida que el tiempo de seguridad  $d$  aumentaba.



**Figura 16 Costo Total con un tiempo de seguridad constante  $l_{min} \leq d \leq l_{max}$**

En cuanto al nivel de reordenar en este intervalo, también se observó que disminuyó a medida que  $d$  aumentaba.



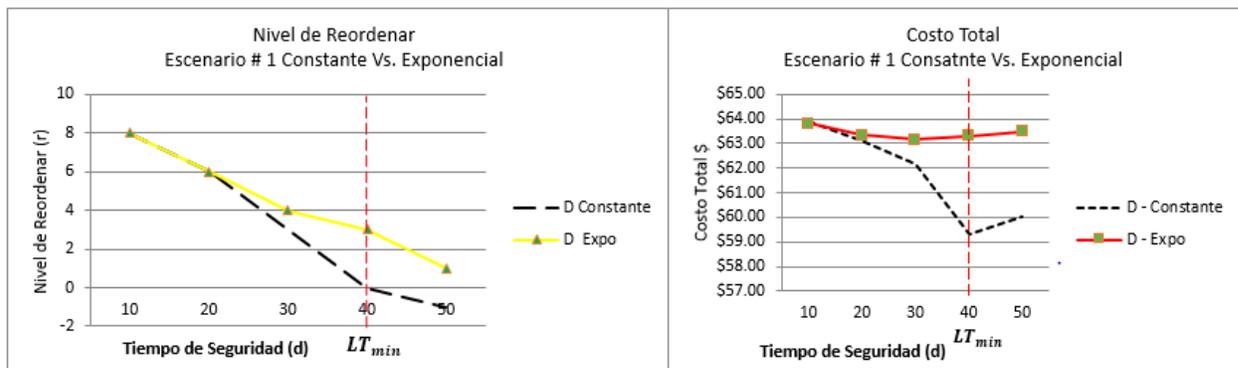
**Figura 17 Nivel de Reordenar con un tiempo de seguridad constante  $l_{min} \leq d \leq l_{max}$**

## 4.5 Resultados del experimento

Los resultados del experimento en el primer intervalo donde  $E[d] < l_{min}$ , fueron los siguientes: 1) el nivel de reordenar disminuye, 2) la cantidad a ordenar no tiene un patrón definido y 3) el costo total disminuye.

El primer comportamiento se debe a que según  $E[d]$  aumenta, la demanda durante el intervalo de tiempo, *lead time* -  $d$ , disminuye, causando que la variabilidad disminuya. Como resultado se requiere menos *safety stock* para satisfacer la demanda durante ese intervalo de tiempo, por lo cual, el nivel de reordenar  $r$  disminuye. En cuanto al segundo punto, se concluye que la cantidad de ordenar es dependiente a los parámetros del escenario que se esté utilizando.

Y por último el tercer comportamiento observado en el costo total se debe principalmente a la reducción en inventario como resultado de la disminución del nivel de reordenar  $r$ . En la siguiente figura se observan el primer y tercer comportamiento.



**Figura 18 Costo total y Nivel de reordenar Constante Vs. aleatorio intervalo  $E[d] \leq l_{min}$**

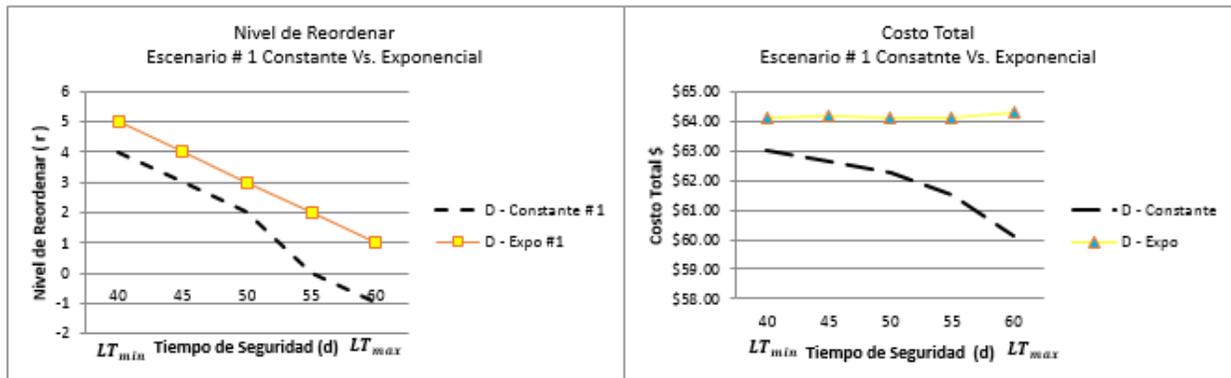
En comparación con el grupo control, (véase figura 18) donde se utilizó un tiempo de seguridad constante, se observó lo siguiente: 1) la razón de cambio en el costo total es más drástico

cuando la  $d$  es contante; 2) la razón de cambio en el nivel de reordenar es más drástico cuando la  $d$  es constante.

En cuanto al comportamiento del nivel de reordenar, la aleatoriedad del tiempo de seguridad  $d$  incorpora mayor variabilidad a la demanda durante el intervalo de tiempo, *lead time* -  $d$ , explicando así la razón de cambio menor en el nivel de reordenar  $r$  cuando se compara al escenario con un tiempo de seguridad  $d$ , constante y conocido. Finalmente en el comportamiento del costo total, es una disminución en el inventario promedio dado la disminución en  $r$  lo que hace que la razón de cambio sea mayor cuando se usa un tiempo de seguridad constante.

En el siguiente intervalo donde  $l_{min} \leq E[d] \leq l_{max}$ , se observaron los siguientes comportamientos: 1) el nivel de reordenar siempre disminuye, 2) la cantidad a ordenar no tiene un patrón definido, y 3) el costo total no tiene un comportamiento definido.

En comparación cuando la  $d$  es constante, la  $r$  disminuyo no tan agresivamente dado la aleatoriedad que se le incluye en el tiempo de seguridad. En cuanto al costo total pudimos observar que este es mayor cuando usamos una  $d$  aleatoria que cuando usamos una  $d$  constante pero esto es dado a que la aleatoriedad hace que se incluya más inventario de seguridad lo que aumenta el costo de un inventario haciendo que el costo total sea mayor. En la siguiente figura 19, se observa el primer comportamiento y el tercer comportamiento.



**Figura 19 Costo total v Nivel de reordenar Constante Vs. aleatorio intervalo  $l_{min} \leq E[d] \leq l_{max}$**

Finalmente en el intervalo donde  $E[d] \geq l_{max}$ , observamos los siguientes comportamientos: 1) el nivel de reordenar disminuyo, 2) la cantidad a ordenar no tiene un patrón definido, 3) el costo total siempre aumenta. Estos comportamientos son los mismos que se observaron cuando se utiliza una  $d$  constante, demostrando así que este intervalo es el de menor beneficio económico comparado con los demás intervalos.

En comparación pudimos observar: la  $r$  disminuyo a menor grado con una  $d$  aleatoria que con una constante, el costo total aumento a mayor grado con  $d$  aleatoria que con una constante. Este aumento en el costo total se debe a lo que ya habíamos explicado anteriormente, de que la aleatoriedad hace que se utiliza un nivel mayor de inventario de seguridad. En la siguiente figura 20, se observan los comportamientos antes mencionados.

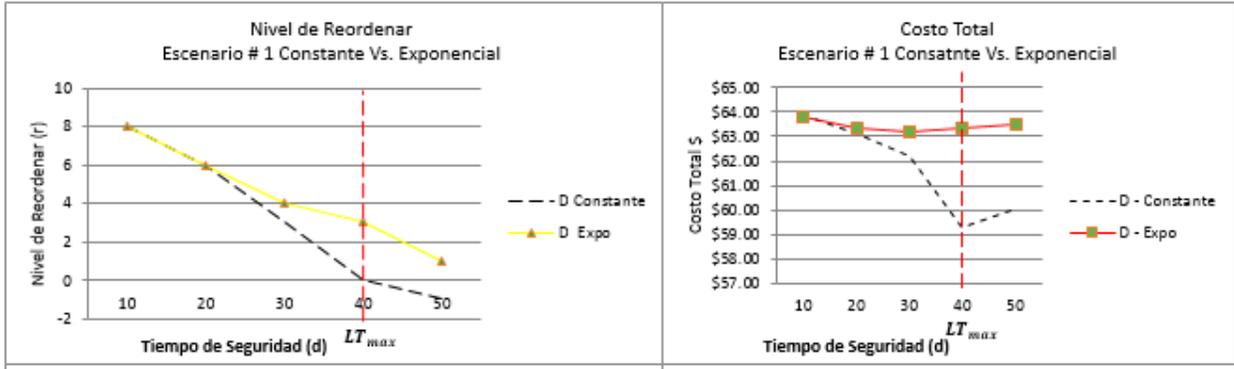


Figura 20 Costo total y Nivel de reordenar Constante Vs. aleatorio intervalo  $E[d] \geq l_{max}$

## 5 CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

Las conclusiones del desempeño del modelo fueron basadas únicamente para las distribuciones que fueron utilizadas, en particular, un *lead time* con una distribución uniforme (40,60), y un tiempo de seguridad con una distribución exponencial. Una posible alternativa para investigaciones futuras sería el experimentar con distribuciones diferentes para estudiar el comportamiento del costo total anual esperado. Otra oportunidad de estudio sería, el efecto en el costo total anual esperado asumiendo dependencia entre las estaciones, en base a lo que hemos estudiado podemos prever que la tendencia sea aumentar dado que solo con un componente la aleatoriedad hace que este aumenta estudiando esa dependencia sería añadir más aleatoriedad.

En términos del desempeño del modelo utilizando una  $d$  aleatoria, se mantiene el mismo comportamiento que si utilizáramos una  $d$  constante pero a menor beneficio económico debido a que por la aleatoriedad de la  $d$ , el sistema va a preferir añadir más safety stock.

Hemos concluido según lo establecido anteriormente, que en el escenario cuando el valor esperado de  $d$  se encuentra en el intervalo donde  $E[d] \leq l_{min}$ , se puede utilizar esta política en situaciones donde los proveedores están localizados lejos, esto utilizando un safety time aleatorio lo que hace que el sistema sea más parecido a lo que ocurre en la vida real y se puede apreciar que el costo disminuye hasta un punto dado por lo cual hay un beneficio de utilizar este modelo contra la política tradicional de  $(Q, r)$ , ese beneficio es a menor grado que si se utilizara la  $d$  constante. Un posible estudio en el futuro es tratar de entender si ese beneficio justifica los controles que se vayan a requerir para mantener un sistema así. En el caso cuando la  $d$  se encuentra en el intervalo donde  $l_{min} \leq E[d] \leq l_{max}$ , se llega a la misma conclusión que cuando

se utiliza una  $d$  constante donde se muestra que es más el que la  $d$  sea aleatorio lo que hace prácticamente que el modelo sea dependiente de los parámetros pero no se observa un beneficio significativo. Y finalmente en el caso donde la  $d$  se encuentra en el intervalo donde  $(E[d] \geq l_{max})$ , el modelo no se debe utilizar para esos casos.

## REFERENCIAS

- Bookbinder, J. H., & Cakanyildirim, M. (1999). Random lead times and expedited orders in ...Q; r† inventory. *European Journal of Operations Research*, 300-313.
- Benjaafar, S., & Elhafsi, M. (2006, December). Production and Inventory Control of a Single Product Assemble to order system. *Management Science*, pp. 1896-1912.
- Eltawil, A. B., & Elnagar, G. R. (2007). Simulation Optimization of an (s, S) Inventory Control System with Random Demand Sizes, Demand Arrivals and Lead Times. *37th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, Egypt.
- Hadley, H., & Within, T. (1963). *Analysis of Inventory Control*. Prentice Hall.
- Hayya, J. C., Harrison, T. P., & Chatfield, D. C. (2008). *Solution for the intractable inventory model when both demand and lead time are stochastic*. Pennsylvania.
- Hillier, M. S. (2002). The costs and benefits of commonality in assemble-to-order systems with a Q, r policy for component replenishment. *European Journal of Operational Research* 141, 570–586.
- Hou, Y., & Zhang, Q. (2007). *The Optimal Inventory Control of a System with Random Lead Time where Random Supply Interruptions affect the Replenishment*. China.
- Lu, Y., Shen-Shong, J., & Yao, D. D. (2003). Order fillrate, leadtime variability and advance demand information in ana assemble to order system. *Operations Research*, 292.

- Mishra, A. K. (1999). *Optimization Models for Component Commonality in Assemble to Order Systems*. Pittsburg.
- Mohebbi, E., & Choobineh, F. (2004). The impact of component commonality in an assemble-to-order. *The International Journal of Management Science*, 472 – 482.
- Montgomery, D. C. (2001). *Design and Analysis of Experiments*. Arizona: John Wiley & Sons, Inc.
- Ning Hsu, V., Yee Lee, C., & So, K. C. (2006, March). Optimal Component Stocking Policy for Assemble-to-Order Systems with Lead-Time-Dependent Component and Product Pricing. *Management Science*, pp. 337-351.
- Pegden, C., Shannon, R. E., & Sadowski, R. P. (1995). *Introduction to Simulation Using Siman*. McGraw-Hill.
- Render, B., Stair, R. M., & Hanna, M. E. (2009). *Quantitative Analysis for Management*. New Jersey: Prentice Hall.
- Seijo-Vidal, R. L. (2009, August). Modified (Q, r) Inventory Control Policy for an Assemble to Order Environment.
- Shang Song, J., & Yao, D. D. (2002, Sep/Oct). Performance analysis and optimization of assemble to order system with random lead time. *Operations Research*, p. 889.
- Wan, J., & Kleijnen, J. P. (2006). *Simulation for the Optimization of (s, S) Inventory System with Random Lead Times and a Service Level Constraint by Using Arena and OptQuest*.

Woo, Y. Y. (1991). *A class  $(Q,r)$  inventory models with partial backorders, Poisson demand, and Erlang distributed lead times*. Nueva York.

WU, X. (2008).  *$(Q; r)$  Inventory Policies under Uncertain Supply Chain Environment*. Raleigh, North Carolina.

## APÉNDICES

### Apéndice A: Programación y gráfico del modelo en Arena Rockwell Software

```

0$          CREATE,          10000::NEXT(1$);

1$          COUNT:          Contador Lotes,1;
2$          ASSIGN:         Numero de Lote=NC(Contador lotes);
3$          QUEUE,          Inventario del Suplidor;
4$          SEIZE,          1,Other:
                          Suplidor,1:NEXT(5$);

5$          BRANCH,         1:
                          If,Numero de lote==1,6$,Yes:
                          Else,12$,Yes;

6$          DUPLICATE,      1:
                          Tamano de Lote+Nivel de Reordenar-1:NEXT(7$);

7$          COUNT:          Contador Piezas,1;
8$          ASSIGN:         Numero de Pieza=NC(2);
9$          ALTER:          Inventario,-1;
10$         QUEUE,          Inventario en Mano,,16$;
11$         SEIZE,          1,Other:
                          Inventario,1:NEXT(f21);

f21         QUEUE,          f2:DETACH;
16$         DUPLICATE,      1:
                          Tamano de Lote-1:NEXT(10$);

12$         ASSIGN:         Transito=Transito+Tamano de Lote;
13$         COUNT:          En Transito,Tamano de Lote;
14$         DELAY:          40,,Other:NEXT(15$);

15$         ASSIGN:         Transito=Transito-Tamano de Lote:NEXT(16$);

17$         CREATE,         1:EXPO(1):NEXT(18$);
Demanda

18$         COUNT:          Contador de Ordenes,1;
19$         ASSIGN:         Tiempo de llegada de la orden=TNOW:
                          Numero de Orden=NC(Contador de Ordenes):
                          # de Ordenes en el Sistema=# de Ordenes en el Sistema+1;

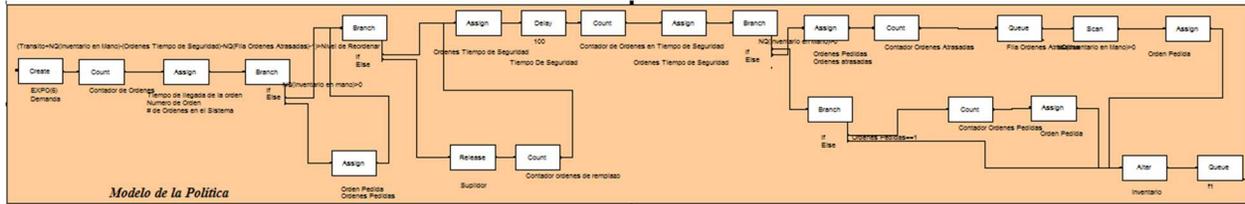
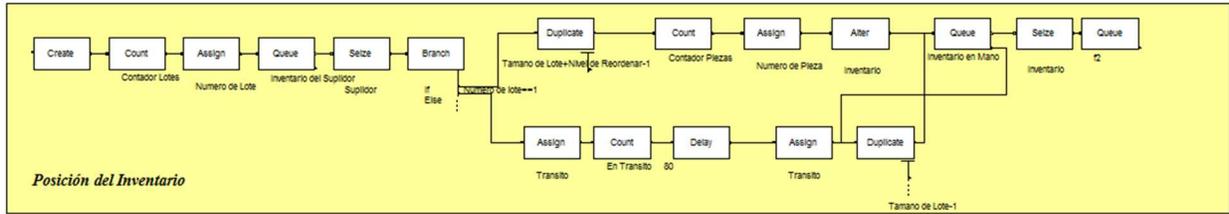
20$         BRANCH,         1:
                          If,NQ(Inventario en mano)>0,25$,Yes:
                          Else,22$,Yes;

25$         BRANCH,         1:
                          If,
                          (Transito+NQ(Inventario en Mano)-(Ordenes Tiempo de
Seguridad)-NQ(Fila Ordenes Atrasadas)-1)>Nivel de Reordenar,
23$,Yes:
                          Else,27$,Yes;

23$         ASSIGN:         Ordenes Tiempo de Seguridad=Ordenes Tiempo de
Seguridad+1;

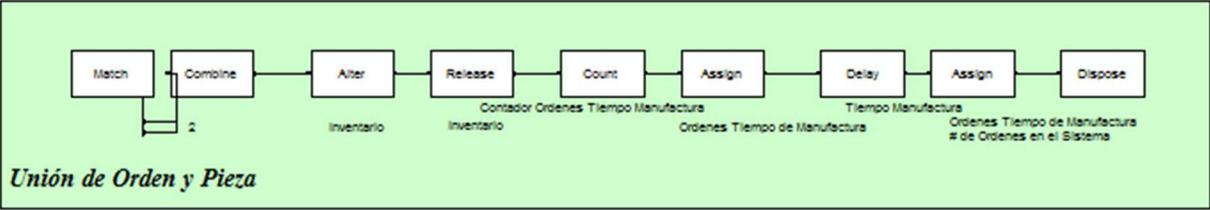
```

46\$	DELAY:	30,,Other:NEXT(21\$);	Tiempo
De Seguridad			
21\$	COUNT:	Contador de Ordenes en Tiempo de Seguridad,1;	
24\$	ASSIGN:	Ordenes Tiempo de Seguridad=Ordenes Tiempo de Seguridad-	
1;			
26\$	BRANCH,	1:	
		If,NQ(Inventario en Mano)>0,29\$,Yes:	
		Else,28\$,Yes;	
29\$	BRANCH,	1:	
		If,Ordenes Pedidas==1,30\$,Yes:	
		Else,32\$,Yes;	
30\$	COUNT:	Contador Ordenes Pedidas,1;	
31\$	ASSIGN:	Orden Pedida=Orden Pedida-1;	
32\$	ALTER:	Inventario,1;	
f11	QUEUE,	f1:DETACH;	
28\$	ASSIGN:	Ordenes Pedidas=1:	
		Ordenes atrasadas=1;	
33\$	COUNT:	Contador Ordenes Atrasadas,1;	
34\$	QUEUE,	Fila Ordenes Atrasadas;	
35\$	SCAN:	NQ(Inventario en Mano)>0;	
36\$	ASSIGN:	Orden Pedida=Orden Pedida-1:NEXT(32\$);	
27\$	RELEASE:	Suplidor,1;	
45\$	COUNT:	Contador ordenes de remplazo,1:NEXT(23\$);	
22\$	ASSIGN:	Orden Pedida=Orden Pedida+1:	
		Ordenes Pedidas=1:NEXT(25\$);	

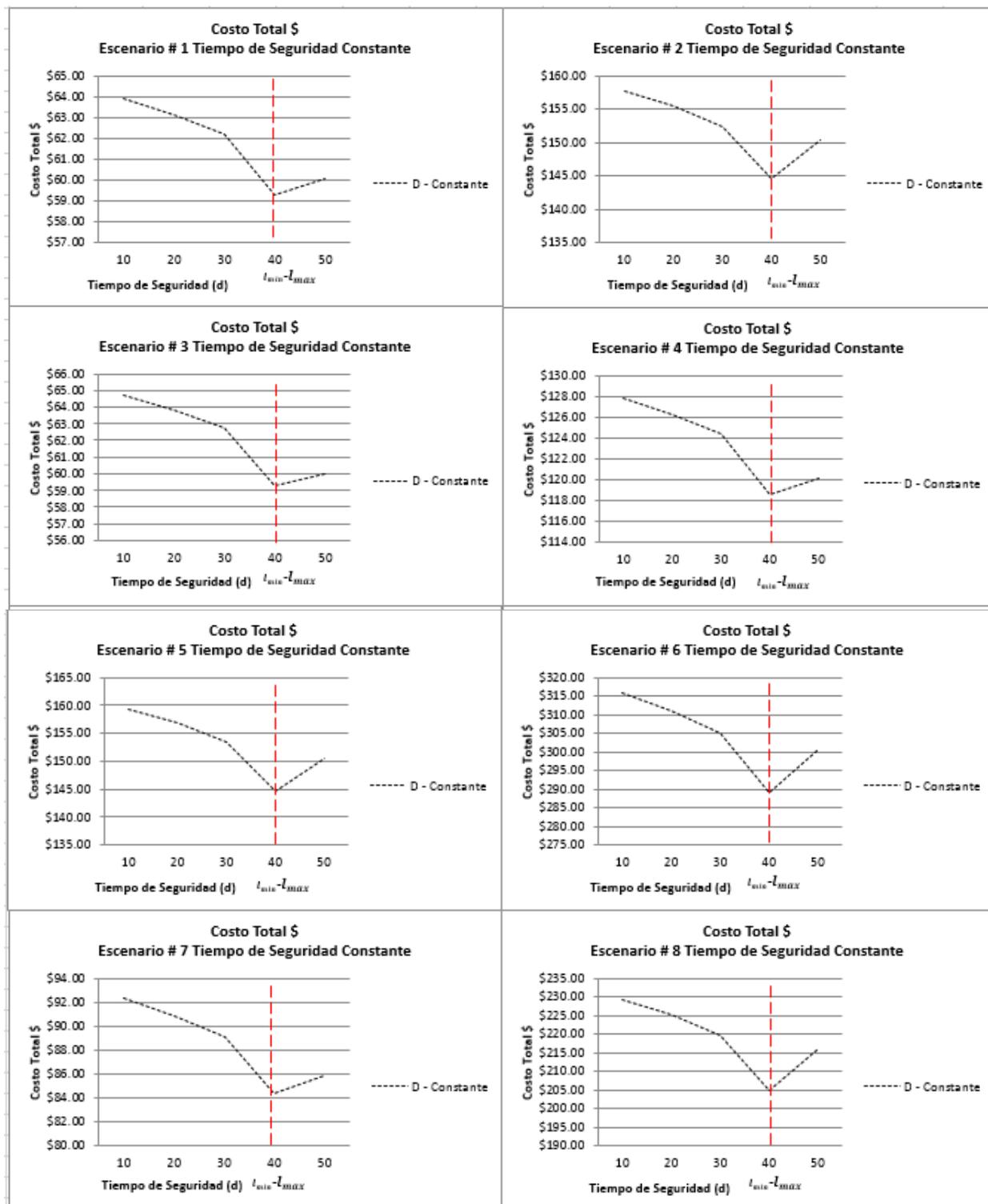


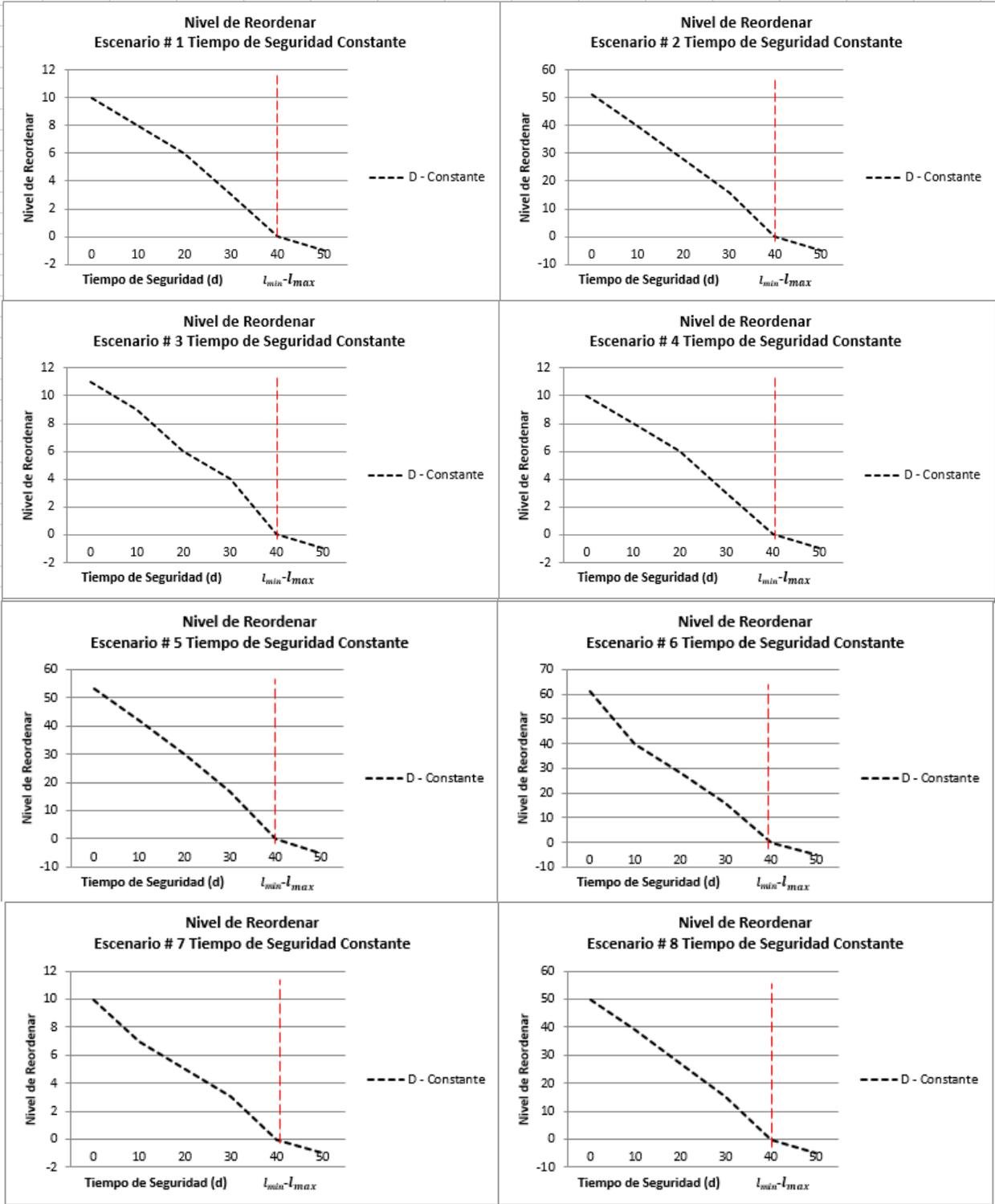
### Experimento

<b>Project</b> Modelo No Entrega Temprana Permitida	<b>Counters</b> Contador Lotes Contador Piezas Contador de Ordenes Contador Ordenes Atrasadas Contador de Ordenes en Tiempo de Seguridad Contador Ordenes Tiempo Manufactura En Traslito Contador Ordenes Pedidas Contador ordenes de remplazo
<b>Queues</b> Inventario del Supliodor Inventario en Mano I2 Fila Ordenes Atrasadas I1	<b>Replicate</b> 192000
<b>Resources</b> Inventario Supliodor	<b>Seeds</b> Inv
<b>Attributes</b> Numero de Lote Numero de Pieza Tiempo de llegada de la orden Numero de Orden Ordenes Pedidas Ordenes atrasadas	<b>DStats</b> NQ(Inventario en Mano) NQ(Fila Ordenes Atrasadas) V(3) V(8) V(9) V(10)
<b>Variables</b> Tamaño de Lote Nivel de Reordenar Traslito Tiempo de Seguridad Tiempo Manufactura Tiempo de Espera del Supliodor # de Ordenes en el Sistema Orden Pedida Ordenes Tiempo de Manufactura Ordenes Tiempo de Seguridad	<b>Outputs</b> DAVG(Inventario en mano Inf.) NC(Contador Ordenes Atrasadas) NC(Contador ordenes de remplazo)

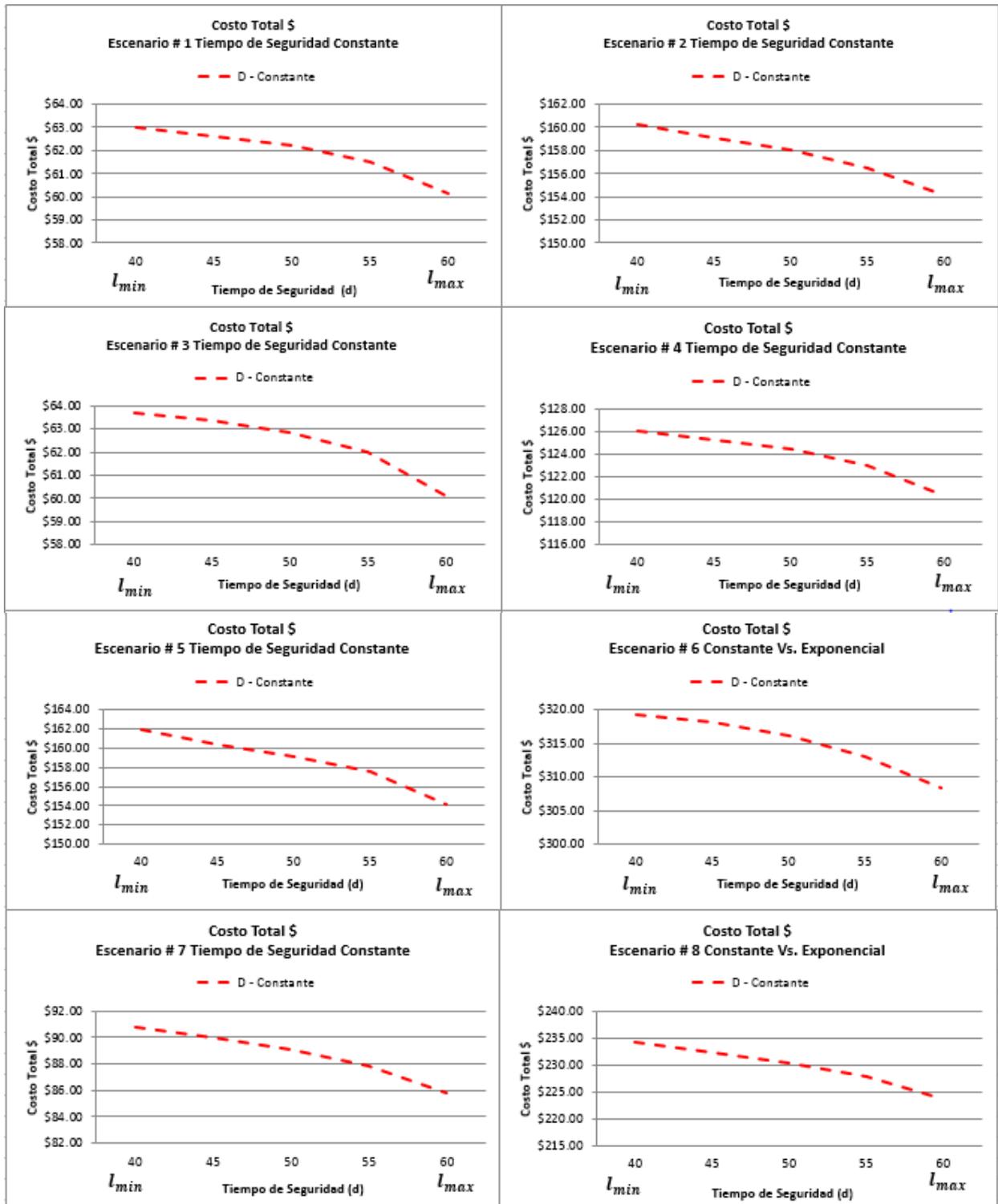


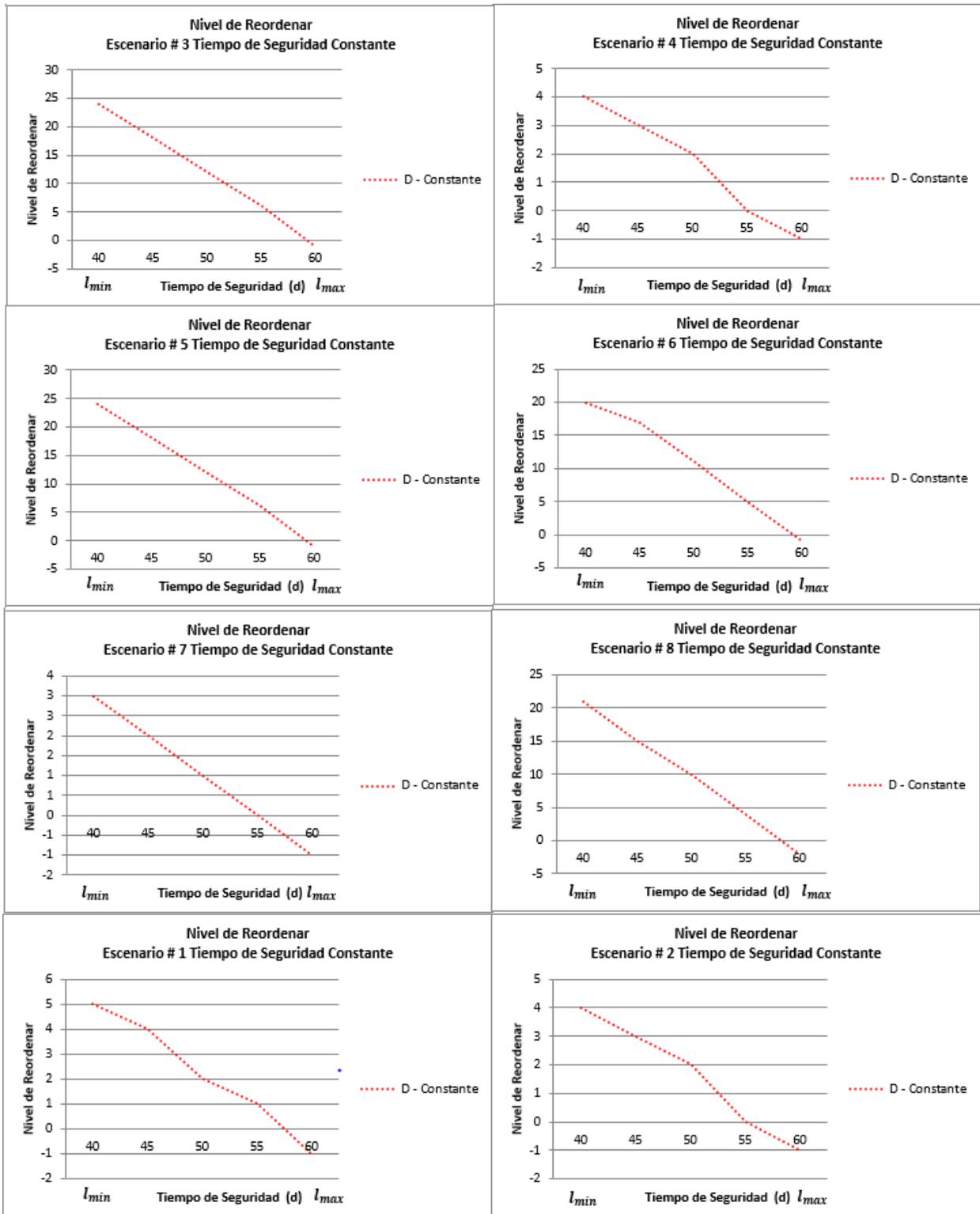
**Apéndice B:** Gráficas del Costo Total y Nivel de Reordenar para la Verificación con Seijo-Vidal (2009) en el intervalo  $d \leq l_{min}$  y  $d \leq l_{max}$



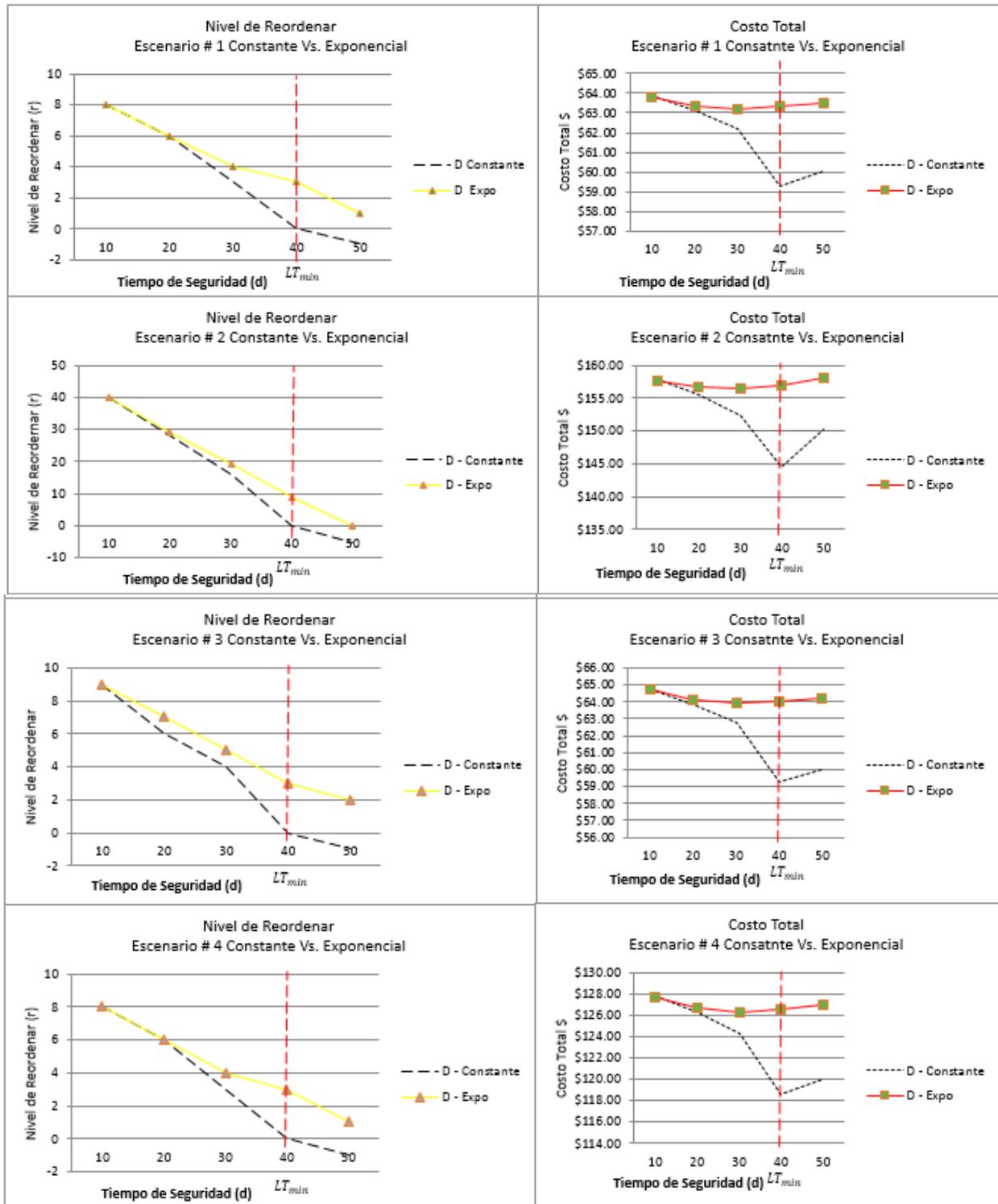


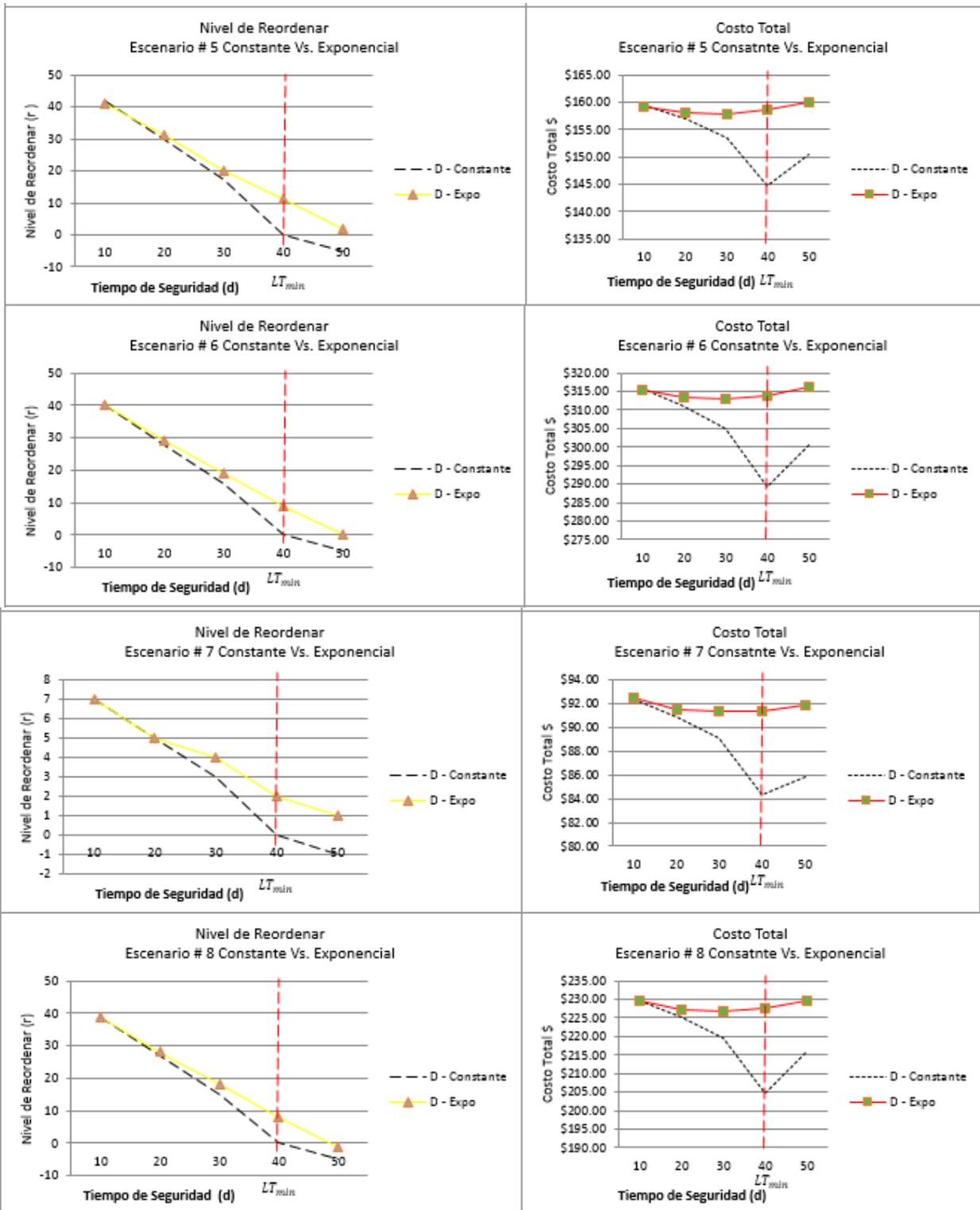
**Apéndice C: Gráficas del Costo Total y Nivel de Reordenar para la Verificación con Seijo-Vidal (2009) en el intervalo  $l_{min} \leq d \leq l_{max}$**



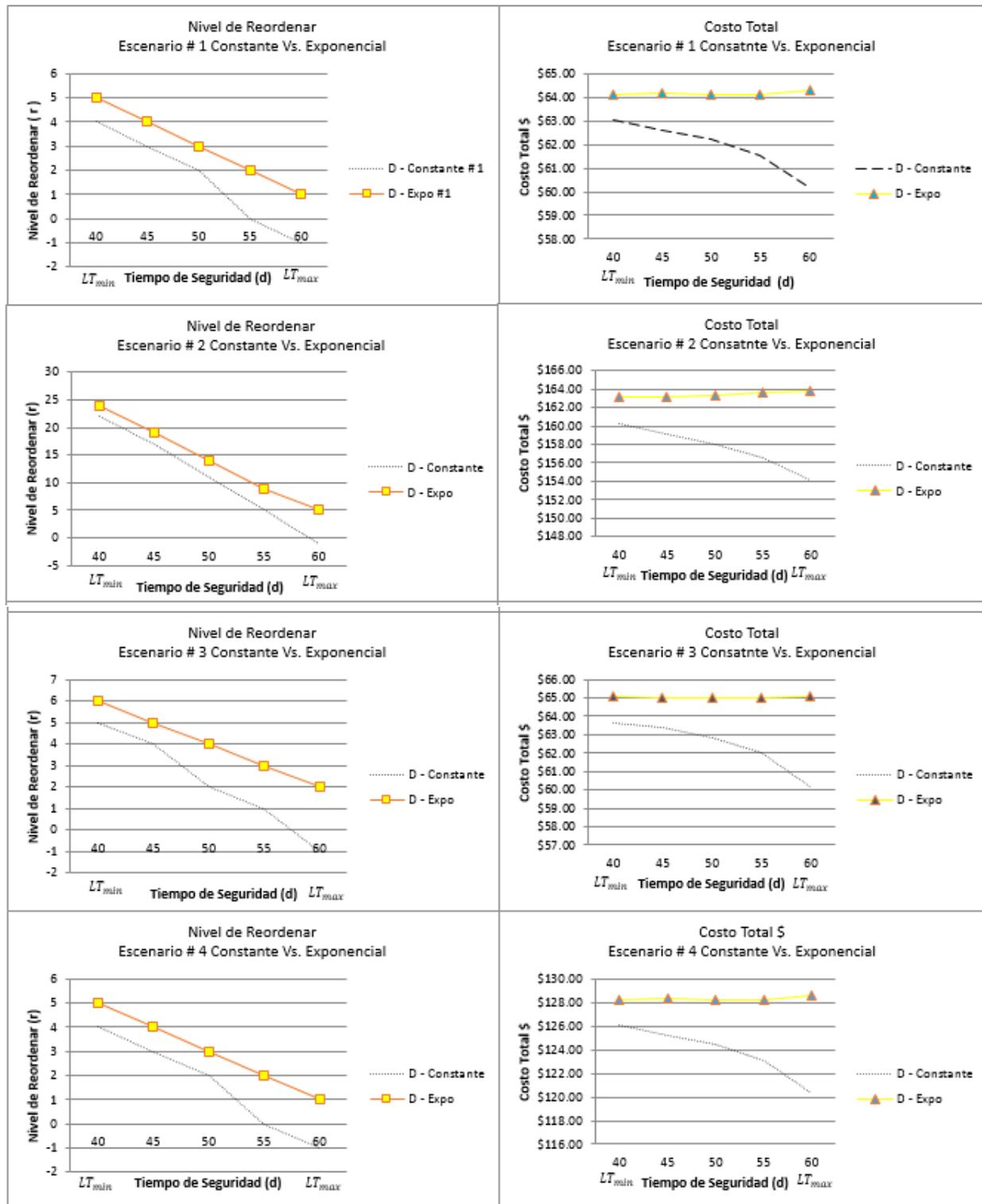


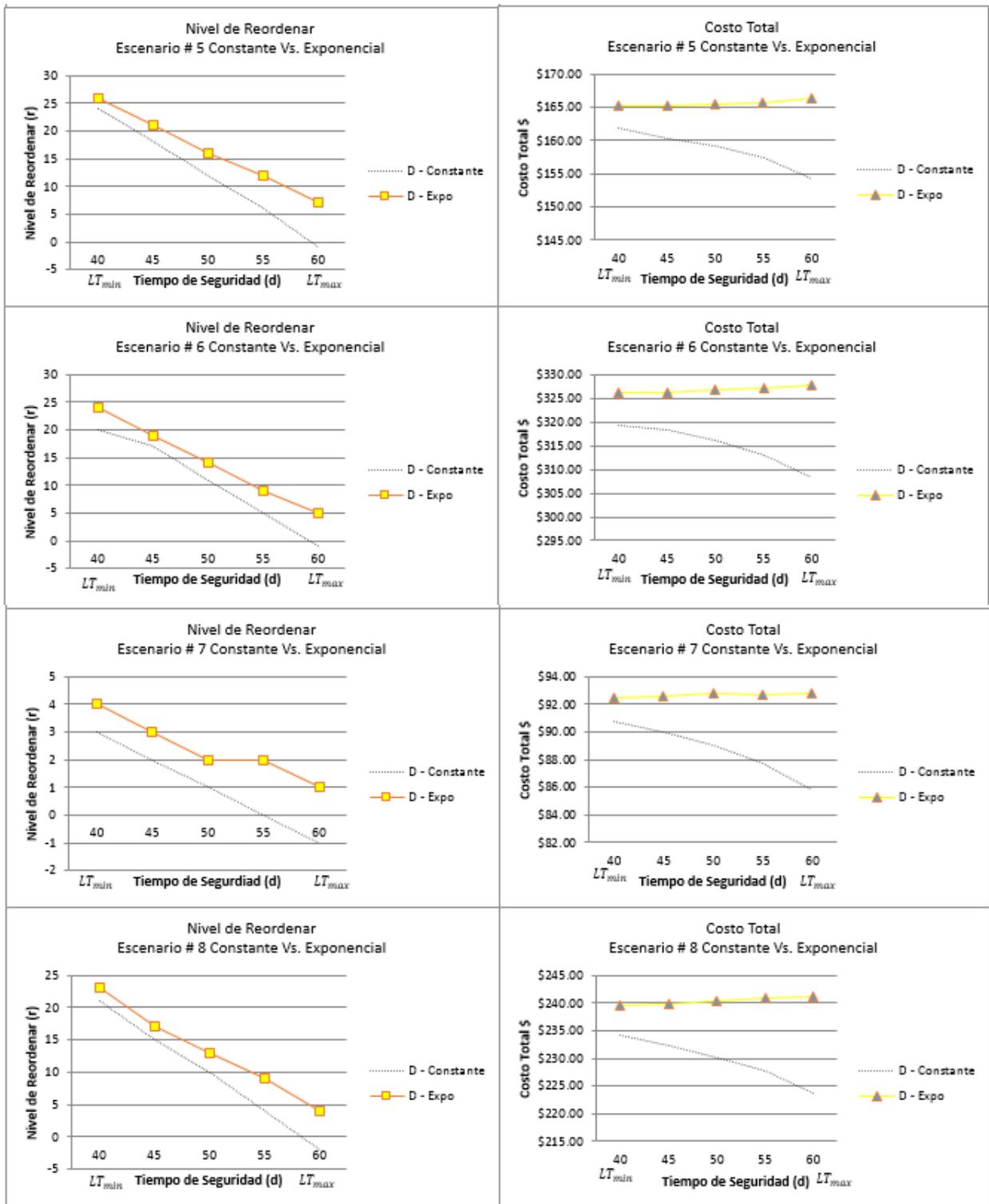
**Apéndice D:** Gráficas del Costo Total y Nivel de Reordenar de la Experimentación en el intervalo  $E[d] \leq l_{min}$





**Apéndice E:** Gráficas del Costo Total y Nivel de Reordenar de la Experimentación en el intervalo  $l_{min} \leq E[d] \leq l_{max}$





**Apéndice F:** Gráficas del Costo Total y Nivel de Reordenar de la Experimentación en el intervalo  $E[d] \leq l_{max}$

