

ISSN: 2322-7672

# **II Encuentro de Investigación Formativa Ingeniería Industrial Medellín**

Memorias

---

Diana Rocío Roldán Medina  
Beatriz Elena Ángel Álvarez  
Compiladoras



Universidad  
Pontificia  
Bolivariana

© Diana Rocío Roldán Medina (Compiladora)  
© Beatriz Elena Ángel Álvarez (Compiladora)  
© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana

**II Encuentro de Investigación Formativa - Memorias**

ISSN: 2322-7672

Primera edición, 2012

Escuela de Ingenierías

Facultad de Ingeniería Industrial

**Gran Canciller UPB y Arzobispo de Medellín:** Mons. Ricardo Tobón Restrepo

**Rector General:** Mons. Luis Fernando Rodríguez Velásquez

**Vicerrector Académico:** Pbro. Jorge Iván Ramírez Aguirre

**Editor:** Juan José García Posada

**Coordinación de producción:** Ana Milena Gómez C.

**Diagramación:** Juan Esteban Casas Tejada

**Corrector de estilo:** César Alejandro Buriticá

**Dirección editorial:**

Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2012

Email: [editorial@upb.edu.co](mailto:editorial@upb.edu.co)

[www.upb.edu.co](http://www.upb.edu.co)

Telefax: (57) (4) 354 4565

A.A. 56006 - Medellín - Colombia

**Radicado:** 1037-16-08-12

Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier medio o para cualquier propósito sin la autorización escrita de la Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

# Diseño de experimentos vía simulación: aplicación didáctica a un sistema de colas

---

## **Juan Esteban Cardona**

juanesteban.cardona@alfa.upb.edu.co

## **Andrea Arenas**

andrea.arenas@alfa.upbb.edu.co

## **Daniela González**

daniela.gonzalezlo@alfa.upb.edu.co

## **Marisol Valencia Cárdenas**

docente. Universidad Pontificia Bolivariana  
marisol.valencia@upb.edu.co

## **Abstract**

---

Success in an organization is associated with a correct satisfaction to clients, looking for reducing time, that's the reason to direct efforts to do optimization in waiting time queue processes. This work presents an experimental design done through simulation of a queue system, looking the minimization of waiting time people to be attended.

**Keywords:** Experimental Design, Simulation, Probability Distributions.

## Resumen

---

El éxito de toda organización está asociado con una correcta satisfacción de la demanda de sus clientes en el menor tiempo posible, por ello se realizan esfuerzos orientados a la optimización de los tiempos de espera en procesos de colas. En este trabajo se hace un diseño de experimentos mediante una simulación de un proceso de colas, controlando factores como distribuciones de probabilidad y número de servidores, buscando disminuir el tiempo que las personas esperan para ser atendidos.

**Palabras clave:** Diseño de experimentos, simulación, distribuciones de probabilidad.

## Introducción

---

Una ventaja de realizar diseño experimental vía simulación es que no se requieren unidades experimentales físicas, sino que se simula una situación y se controla sobre éstas, variando los factores que intervienen en el proceso, pero las unidades experimentales serán los escenarios que corresponden a una situación virtual [1]. Dichos estudios son muy comunes en la investigación estadística y de ingeniería [2], [3], ya que no es fácil en muchas situaciones tomar datos de procesos productivos o de servicios reales. A partir de esta simulación, se completa la matriz de datos completamente aleatorizada requerida para aplicar las técnicas de un diseño experimental.

Las herramientas estadísticas utilizadas para analizar los datos que resultan de un experimento son ampliamente conocidas y muchas de ellas se basan en el análisis de varianza [4].

Los análisis vía simulación habitualmente no generan un método inferencial adecuado directamente. Por ello, el ingeniero que maneja la herramienta del diseño experimental, puede controlar el proceso, recoger los datos y posteriormente, emplear las técnicas estadísticas para la optimización de niveles apropiados para la toma de decisiones en un tiempo mucho menor que el requerido en situaciones reales. Esta práctica surge como motivación para que los estudiantes investiguen temáticas de interés y apliquen conocimientos adquiridos en el curso Análisis y diseño de experimentos [5], en problemáticas especiales de la Ingeniería Industrial.

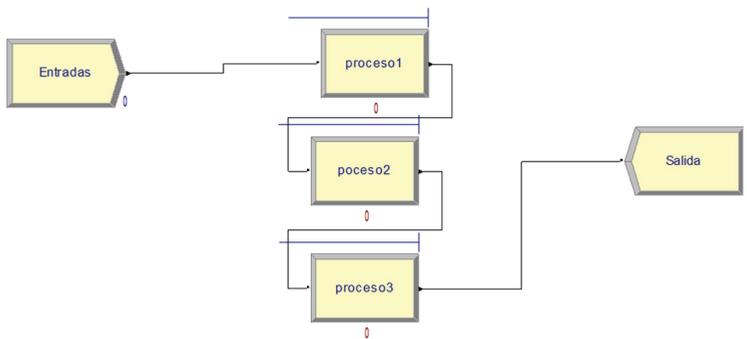
## Metodología

**Materiales y equipo:** Simulador Arena (versión académica), esquema de sistema de colas, software R para análisis estadístico.

Figura 1. Recursos del experimento



Figura 2. Variación en el número de servidores (procesos)



## Diseño de experimentos

Adicional a la definición del proceso de colas simulado, el procedimiento de análisis del diseño experimental inicia con la elección de factores y niveles a controlar, la elección de la variable respuesta, recolección de datos vía simulación, y posteriormente el análisis de varianza, validación de los supuestos de residuales, y la identificación de los niveles óptimos usando la prueba de diferencia de medias de Tukey y los intervalos de confianza de los efectos.

En primera instancia se eligen los factores y niveles, así como la unidad de medición de la variable respuesta.

### Elección del factor de interés, sus niveles y el o los factores de bloqueo

Factor de interés: Distribuciones

Niveles: distribuciones (Exponencial, Uniforme, Normal y Triangular)

Bloque: Número de servidores (procesos) en serie: 1, 2, 3, 4. (figura 2)

### Elección de la variable respuesta.

La variable respuesta corresponde al tiempo de espera del cliente.

Unidad de medición: Minutos

### Elección del diseño experimental.

Se utilizará un diseño con un factor y un bloque (DBCA)

### Procedimiento experimental.

El procedimiento experimental se basa en la utilización del simulador ARENA, el cual brinda la facilidad de generar datos y tiempos de un proceso de la vida cotidiana. Ejemplos relacionados con este trabajo son: trámites de la DIAN, aduana, sacar un pasaporte; que arrojan tiempos de espera ya que forman colas en su proceso. El proceso consiste en fijar un tiempo medio de atención de 4 minutos, en un proceso en serie, controlando la cantidad de servidores, pero teniendo presente que la atención es de 4 minutos. Se pretende determinar cómo estos servidores y la distribución probabilística de la atención (exponencial, normal, uniforme y triangular), afectan el tiempo de espera en cola de los clientes en el sistema.

### Distribuciones de probabilidad utilizadas

La distribución exponencial se utiliza para describir el tiempo entre eventos, más específicamente la variable aleatoria que representa al tiempo necesario para servir a la llegada.

La distribución uniforme describe una variable aleatoria que sólo puede tomar valores comprendidos entre dos extremos  $a$  y  $b$ , de manera que todos los intervalos de una misma longitud (dentro de  $(a, b)$ ) tienen la misma probabilidad

La distribución normal  $N(u, s^2)$  es un modelo matemático que rige muchos fenómenos. Esta distribución nos da la probabilidad de que al elegir un valor, éste tenga una medida contenida en unos intervalos definidos, lo que permitirá predecir de forma aproximada, el comportamiento futuro de un proceso, conociendo los datos del presente [4].

Distribución Triangular: Se presenta al estudiar tiempos entre averías, entre llegadas, entre accidentes, o en fabricación.

## Resultados del experimento.

A continuación se muestra la matriz de diseño con los datos de tiempos de espera utilizados:

Tabla 1. Datos del diseño experimental

Distribuciones	Número de Procesos			
	4	3	2	1
Exponencial	271,31	123,91	46,61	33,05
Uniforme	256,82	73,64	39,8	18,21
Normal	247,32	84,26	38,05	7,28
Triangular	247,24	93,093	30,37	5,61

## Análisis estadístico de los resultados.

El programa utilizado para la realización del análisis estadístico es el software R, de distribución libre.

A continuación (figura 2) se muestran los resultados para realizar análisis estadístico de los datos tomados.



Se acepta  $H_0$ , por lo tanto se cumple que los errores del modelo se distribuyen normalmente

$$\epsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$$

### Validación de supuestos de Incorrelación. Durbin Watson

lag Autocorrelation D-W Statistic p-value  
1 -0.4503669 2.877981 0.296

### Prueba de hipótesis

$H_0: \rho=0$  Hay incorrelación

$H_1: \rho \neq 0$  No hay incorrelación, el modelo no es confiable.

$$V_p = 0.296 > 0.1$$

Se acepta  $H_0$ , por lo tanto hay Incorrelación

### Homogeneidad de varianzas. Bartlett

Bartlett test of homogeneity of variances

data: res by distribucion

Bartlett's K-squared = 3.6043, df = 3, p-value = 0.3075

### Prueba de hipótesis

$H_0: \sigma_{\text{expo}} = \sigma_{\text{normal}} = \sigma_{\text{triangular}} = \sigma_{\text{uniforme}}$

$H_1: \text{al menos un par } \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2 \text{ (diferente)}$

$$V_p = 0.3075 > 0.05$$

Se acepta  $H_0$ , por lo tanto hay homogeneidad de varianza en los residuales.

Eficiencia Relativa de la inclusión de los bloques

$$Er = \frac{(ge+1)(ge2+3)MSE_{DCA}}{(ge+3)(ge2+1)MSE_{DBCA}}$$

$$MSE_{DCA} = \frac{gcMSC + (ga+ge)MSE_{DBCA}}{gc+ga+ge}$$

Donde:

$$ge = 9$$

$$ge2 = 12$$

$$gc = 3$$

$$ga = 3$$

$$MSE_{DCA} = 9416.6$$

$$MSC = 79$$

$$MSE_{DCA} = \frac{3(46767) + (3 + 9)79}{3 + 3 + 9}$$

$$MSE_{DCA} = 9416.6$$

$$Er = \frac{(9 + 1)(12 + 3)9416.6}{(9 + 3)(12 + 1)79}$$

Como la eficiencia es de 11461.29% > 125% se puede decir que ha sido muy efectivo el factor de bloque, es decir, el número de servidores utilizados para mejorar la explicación de variabilidad. Esto sugiere que en otro diseño futuro, éste puede ser efectivo como un factor de interés.

## Pruebas de diferencias de medias usando el método de Tukey

Al realizar la prueba de comparación de medias por Tukey, se puede apreciar que las medias del tiempo de espera significativamente iguales al 95% de confianza son las generadas por las distribuciones normal-triangular, uniforme-triangular y uniforme-normal; siendo la de la exponencial la media diferente (figura 3).

De esta manera la media de la exponencial es la que más tiempo medio de espera genera respecto a las otras.

Figura 3. Prueba de Tukey para diferencia entre medias de los niveles del factor de interés, con un 95% de confianza

	diff	lwr	upr	p adj
Normal-Triangular	0.149025	-19.502767	19.80082	0.9999949
unif-Triangular	3.038250	-16.613542	22.69004	0.9610494
EXPO-Triangular	24.640425	4.988633	44.29222	0.0153739
unif-Normal	2.889225	-16.762567	22.54102	0.9661457
EXPO-Normal	24.491400	4.839608	44.14319	0.0159148
EXPO-unif	21.602175	1.950383	41.25397	0.0313978

## Conclusiones

La importancia de simular un proceso se ve reflejado muchas veces en el ahorro de tiempo y costos para el análisis de un proceso. Ya que al simular con tiempos que se asemejan a la realidad de la empresa, se puedan dar buenas conclusiones sin necesidad de un operario que tome tiempos que genera pérdida de días de trabajo.

Con respecto a los tipos de distribuciones en la simulación, da a entender que los mejores tiempos del proceso, en los que hay menos tiempos de espera, se encuentran con la distribución triangular. Caso contrario con la distribución exponencial que da mayores colas y mayor tiempo de espera. Así que procesos regulados de esta forma, conducen a la disminución de los tiempos de espera, según este tipo de sistemas utilizado.

Se reafirma aún más con este procedimiento que la estandarización y métodos del trabajo en las empresas reduce tiempo y costos, ya que da un mayor nivel

de producción, aumentando así las utilidades de la empresa. Esto se ve reflejado en las variables con poca variación, como aquellas con distribuciones de probabilidad como la normal, triangular y uniforme.

Para realizar análisis experimentales de las actividades de una empresa es de gran ayuda, agilidad, usar un software para simular el proceso, que facilita la toma de decisiones de manera confiable.

## Referencias

---

1. Law, A.; Kelton, W. Simulation Modeling and Analysis. Third edition. New York: Mc Graw Hill , 2000.
2. Robert, C. and Casella, G. Monte Carlo Statistical Methods. New York: Springer. 2004.
3. Baena A, Salazar J.C. Análisis y Diseño de Experimentos aplicados a estudios de simulación. Dyna, Año 76, Nro. 159, pp. 249-257. ISSN 0012-7353. Medellín, Septiembre de 2009.
4. Valencia, M. Notas de curso. Análisis y Diseño de experimentos. En <http://digicampus.upb.edu.co/moodle/>. 2011
5. Hunter W. G. Some Ideas about Teaching Design of Experiments, with 25 Examples of Experiments Conducted by Students. The American Statistician, Vol. 31, No. 1 pp. 12-17 (Feb., 1977).