

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <http://www.researchgate.net/publication/266374478>

# Aplicación del Diseño Estadístico de Experimentos a la Simulación Application of Statistical Design of Simulation Experiments

ARTICLE · JANUARY 2002

---

DOWNLOADS

7

---

VIEWS

12

3 AUTHORS, INCLUDING:



[Roberto A. Gonzalez](#)

Polytechnic University of Nicaragua

16 PUBLICATIONS 23 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Ileana Perez](#)

Universidad San Buenaventura, Cali

8 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



ISSN 1029-3450



## **Aplicación del Diseño Estadístico de Experimentos a la Simulación**

### **Application of Statistical Design of Simulation Experiments**

Maritza Petersson Roldán

Email: [maritza@fonet.umcc.cu](mailto:maritza@fonet.umcc.cu)

Facultad Industrial Economía

Universidad de Matanzas

Cuba

Roberto González Castellanos

Email: [roberto.gonzalez@umcc.cu](mailto:roberto.gonzalez@umcc.cu)

Facultad Química- Mecánica

Universidad de Matanzas

Ileana Pérez Vergara

Email: [ileper@ind.ispjae.edu.cu](mailto:ileper@ind.ispjae.edu.cu)

Facultad Ingeniería Industrial

ISPJAE.

## **INTRODUCCIÓN**

Los ejemplos de aplicación de la simulación crecen y en la actualidad la simulación se usa aún cuando estén disponibles otras herramientas. Esto se debe a que, con el actual desarrollo del hardware y del software, es posible modelar el sistema con aumentos sucesivos de complejidad, lo que posibilita que no sea tan costoso ni requiera tanto tiempo, llevar a cabo un estudio por simulación.

Esto no significa que la simulación es el método perfecto y universal; de hecho muchos sistemas reales son afectados por entradas aleatorias no controladas lo que exige el uso de modelos de simulación estocásticos, por tanto debe tomarse extremos cuidados en el diseño y análisis del experimento de simulación, para que los resultados obtenidos de la ejecución del mismo sean válidos.

Las características del sistema y los objetivos que se persiguen con el estudio imponen ciertas reglas en el diseño. Si el interés es dado un sistema, proponer determinados cambios en el mismo que definirían una nueva estructura en él y ver como mejora algún parámetro de eficiencia, está claro que no procede el uso del Diseño Estadístico de Experimentos, pues se podría resolver con métodos clásicos de inferencia estadística (estimación, prueba de hipótesis para un parámetro de una o dos poblaciones).

Sin embargo cuando se habla de cambios propuestos, en ellos están implicados un conjunto de factores que pueden o no afectar al sistema, además



ISSN 1029-3450



ellos han sido fijados en valores específicos, por tanto aún cuando el resultado evidencie mejorías en el sistema, es imposible afirmar que la variante propuesta es la mejor. Es aquí donde se impone el uso del Diseño de Experimento, pues con él es posible determinar los factores importantes, además que permite precisar si la interacción de los mismos es significativa. En una etapa posterior (optimización) es posible determinar los valores para los factores importantes que aportan el mejor valor a la variable respuesta.

Pueden existir ocasiones que por el conocimiento del sistema se decida fijar los factores considerados importantes en determinados valores, así las combinaciones de ellos resultaría en varias alternativas para el sistema, estos son los casos en que se aplicaría el diseño para un solo factor a varios niveles, en este caso tampoco puede afirmarse que la variante solución es la mejor de todas las posibles.

A continuación se mostrará un ejemplo que demuestra como los objetivos del estudio condicionan el diseño del experimento de simulación.

### **Descripción del objeto de estudio**

Se estudió la lavandería de la cadena **Sol** en Varadero. Dicha lavandería brinda el servicio de lavado a los tres hoteles de la mencionada cadena existentes en el polo turístico de Varadero: **Sol Club Palmeras, Meliá Varadero y Meliá Las América**. La misma esta comprometida con sus clientes al lavado a cero hora, o sea cambiar la ropa sucia por una cantidad idéntica de limpia a la hora de llegada. Para ello la lavandería cuenta con el siguiente equipamiento:

Equipo	Capacidad	Cantidad
Lavadora	55Kg	1
	110Kg	4
Secador	55Kg	3
plancha de rodillos (mangle)		1
Dobladora	-	1

Y tiene la siguiente organización del trabajo:

- Trabaja un total de 12 horas diarias en el horario comprendido de 7:00 AM a 7:00 PM, en las cuales se supone que se debe procesar toda la ropa sucia , en caso de ser necesario se lava y plancha durante el horario nocturno.
- La ropa se va recepcionando durante el día por lo que se va incorporando al sistema en la medida en que llega.



ISSN 1029-3450



- El lavado se realiza de forma seleccionada, evitándose las mezclas a no ser que sean imprescindibles para el aprovechamiento de las capacidades de las máquinas.
- Los programas de la operación de lavado se varía de forma manual según el tipo de ropa que se esté lavando en ese momento.
- No existe un sistema de lavado que indique qué debe lavarse primero o después, la solución de esto se deja en manos del jefe de producción que basado en su experiencia reparte las tareas y determina qué debe lavarse en cada momento con el fin de impedir la detención de los equipos.

Los diferentes tipos de ropa tratados son:

#### 1. Felpas

- Blancas: *Toallas grandes, toallas chiquitas, alfombrines*
- De color: *Toallas de playa.*

#### 1. Lisa

- Blancas de habitación: *sábanas, fundas, sábanas especiales*
- Blancas de gastronomía: *manteles, cubres, servilletas*
- Color de gastronomía: *manteles, cubres, servilletas*

Dichas piezas son sometidas a diferentes procesos como son: lavado, secado, despalillo, planchado y doblado. El proceso de lavado presenta variaciones en cuanto a su duración, que está regida por la textura del tejido y su coloración, lo que condiciona el programa de lavado a que será sometido.

Con las características del sistema expuesto la lavandería no logra cumplir con el lavado a cero hora y se ve precisada a entregar la ropa por intervalos en la medida en que la misma este lista. Como posibles causas de este problema puede pensarse en la incapacidad técnica de la línea y/o una inadecuada organización del proceso productivo.

Considerando la aleatoriedad del sistema, dada por la existencia de procesos que son realizados directamente por el hombre y a la incidencia de ellos en los procesos tecnificados, se decidió utilizar la simulación para con una nueva organización de la línea de producción poder lograr el lavado a cero hora. En este caso el **Diseño del Experimento de Simulación** sólo debe garantizar la generación de una muestra simulada de los tiempos de finalización del lavado



ISSN 1029-3450



con la nueva organización de la línea y con técnicas de estimación llegar a un resultado que permita afirmar o negar la posibilidad del cumplimiento del lavado a cero hora.

### **Obtención de la información.**

Para llevar a cabo el estudio se definieron las siguientes variables:

- Cl<sub>i</sub>: Tiempo de carga de la lavadora i, i = 1,2
- Dl<sub>i</sub>: Tiempo de descarga de la lavadora i, i = 1,2
- Cs: Tiempo de carga del secador
- Ds: Tiempo de descarga del secador
- Df<sub>i</sub>: Tiempo de doblado de las felpas tipo i, i = 1,2,3,4
- Dp: Tiempo de despallido
- Tp<sub>i</sub>: Tiempo de planchado de la pieza i, i = 1,2,3,4
- Dv: Tiempo de conteo de servilletas de color
- Cf<sub>i</sub>: Tiempo de conteo de felpas tipo i, i = 1,2,3,4

Dado que los obreros lavaderos no tienen puesto fijo fue necesario realizar un cuidadoso diseño del muestreo en que iban a ser tomados los tiempos para el estudio de las variables anteriormente definidas, para ello se realizó un plan de muestreo tal que permitiera registrar el tiempo de duración de cada una de las actividades, controlando el factor lavadero. Para lograr esto se observó cuatro veces al mismo obrero realizando la actividad i, esto se repitió cinco días cuidando que no se repitiera la misma pareja: operario, actividad. Así se obtuvieron veinte observaciones para cada una de las variables, a las cuales les fue estudiado su comportamiento estadístico utilizando el paquete estadístico **STATGRAPHICS**.

### **Descripción del sistema propuesto.**

Con el objetivo de reducir el tiempo de funcionamiento de la lavandería y lograr que cumpla con los plazos de entrega se realizó la siguiente propuesta de organización del lavado:

1. Recepcionar la ropa de 7:00AM a 3:00PM.
2. La ropa debe recibirse seleccionada y debe colocarse una vez recepcionada por la lavandería en los carros jaula, con una capacidad igual a la lavadora de 110Kg con el fin de eliminar los movimientos innecesarios de los lavaderos.
3. Se realizará una división equitativa de la capacidad en la operación de lavado asumiéndose las siguientes estructuras:
  - Primeras tres horas de funcionamiento de la línea de producción:
    - Dos lavadoras de 110Kg para la ropa lisa.
    - Dos lavadoras de 110Kg para la felpa.



ISSN 1029-3450



- La lavadora de 55Kg será destinada a lavar los picos de los diferentes tipos de ropa (bultos de 55Kg) una vez terminada esta operación se procederá a utilizar esta máquina en el lavado de la ropa lisa.
  - Pasadas las tres primeras horas de funcionamiento de la línea de producción:
    - Dos lavadoras de 110Kg para la ropa lisa
    - Dos lavadoras de 110Kg y de 55Kg para la felpas
    - Debido a que la cantidad de ropa lisa es menor que la de felpas, una vez terminado el lavado de lisa estas lavadoras pasarán a lavar la felpa restante.
4. La línea de producción comenzará su funcionamiento a las 3:00PM y durante sus primeras tres horas sólo contará con la presencia de dos operarios y el jefe de producción, los cuales serán encargados de realizar las operaciones de lavado y secado. Pasado este tiempo se sumarán el resto de los trabajadores: los que atienden la plancha, uno en el doblado y atención a los secadores, otro en el conteo de felpas, servilletas de color y apoyo al doblado.
5. El orden de lavado por tipo de pieza recomendado es:

*Felpas:*

1. Toallas de color
2. Toallas grandes
3. Toallas chiquitas
4. Alfombrines

*Lisas:*

1. Servilletas blancas
2. Servilletas de color
3. Fundas
4. Sábanas
5. Sábanas especiales
6. Manteles de color
7. Cubres de color
8. Cubres blancos
9. Manteles blancos

### **Modelo de Simulación**

El sistema a simular es la lavandería trabajando con la nueva propuesta de organización, para ello se utilizó el Simulador **Arena** de la firma **Sistem**



ISSN 1029-3450



**Modeling**, con el objetivo de determinar el tiempo que la lavandería necesitaría para tener la ropa lista, además de otros parámetros de interés. Dadas las características del sistema se definieron como entidades los bultos de 110Kg (el número de piezas que contiene un bulto varía según su tipo), como recursos las lavadoras, los secadores, la plancha de rodillos (mangle) y los lavaderos.

Se definieron también los siguientes atributos:

1. Cantidad de piezas en el bulto
2. Tipo de tejido
3. Tipo de pieza
4. Índice del tipo de lavadora

Dada que la secuencia en el proceso de transformación es diferente para determinados grupos de piezas se definieron cuatro secuencias (una para cada caso): 1, felpa, 2, lisa, 3, sábana y sábana especial, 4, servilleta de color. Como las entidades según su tipo (felpa o lisa) deben ser lavadas en sus correspondientes lavadoras, y éstas a su vez pueden ser de dos tipos (de 110Kg o 55Kg) fue necesario definir cuatro combinaciones: 1, lavadoras de felpa, 2, lavadoras de lisa, 3, lavaderos que atienden las lavadoras de felpa y lisa y los que se ocupan de la operación de doblado, 4, los lavaderos que se ocupan de la operación de despalillo, 5, colas por el lavado de felpa y de lisa.

Para lograr el objetivo propuesto bastaba registrar el tiempo que se tomaba la lavandería en tener toda la ropa del día lista. Para ello se replicó el sistema diez veces. La longitud de la corrida estaba condicionada por el momento de finalización de las operaciones en el día. Por tanto, para establecer el tamaño de la muestra era imposible manipular el tamaño de la corrida y sólo hubo de considerarse el número de réplicas independientes. Para ello se utilizó la expresión del tamaño óptimo de una muestra aleatoria simple (Pegden, 1995):

$$1.1 \quad n^* = \left[ \frac{(t_{\alpha/2, n-1}) s_n}{d} \right]^2$$

$s_n$ : desviación muestral  
 $d$ : precisión  
 $\alpha$ : nivel de confianza

El valor medio del momento de finalización fue de 50600 segundos con una desviación de 211 segundos. Fijando una confianza del 95% y una precisión de 5 segundos utilizando la expresión (1.1), se obtiene  $n^* = 3.61$ , lo que implica que con diez réplicas es suficiente para estimar el tiempo de finalización con la precisión deseada.

Como puede verse, con el sistema de lavado propuesto es posible tener toda la ropa lista aproximadamente en 14 horas. Lo que permite asegurar que con el



ISSN 1029-3450



nuevo sistema de lavado la lavandería podrá cumplir con sus compromisos de lavado a cero hora. En este caso, la simulación se ha utilizado con el propósito de validar un sistema hipotético, para ello ha bastado con estimar el valor de la variable aleatoria de interés y demostrar que la nueva organización del trabajo en la lavandería es superior a la existente.

Sin embargo, realizando un análisis más profundo de los resultados obtenidos, puede verse que aunque el tiempo de finalización se logra disminuir a 50600 segundos aproximadamente, el lavado de las felpas y la ropa lisa se concluye a los 38400 y 37400 segundos respectivamente. No es difícil pensar en un posible cuello de botella en el puesto de los secadores, quien tiene como promedio 5 bultos esperando, llegando a tener hasta 13 bultos.

Todo esto dio fundamento para considerar otras configuraciones del sistema, valorando diferentes posibilidades de composición del equipamiento y con hora de comienzo de las actividades de planchado, doblado y conteo diferentes. En ese caso es de interés conocer cuál de dichas configuraciones resuelve con mayor eficiencia las dificultades detectadas y ese nuevo objetivo obligó a un diseño del experimento de simulación diferente.

### **Experimento con un solo factor**

El hecho de considerar alternativas predeterminadas, obligó a utilizar el diseño de experimento con un solo factor, siendo el factor a estudiar el sistema de lavado y sus niveles las posibles alternativas definidas, que fueron las siguientes:

- $S_1$ : 4 lavadoras y 3 secadores comenzando a las tres horas
- $S_2$ : 4 lavadoras y 4 secadores comenzando a las tres horas
- $S_3$ : 5 lavadoras y 4 secadoras comenzando a las tres horas
- $S_4$ : 4 lavadoras y 3 secadores comenzando a la hora cero
- $S_5$ : 4 lavadoras y 4 secadores comenzando a la hora cero
- $S_6$ : 5 lavadoras y 4 secadores comenzando a la hora cero

Las variables respuestas a estudiar fueron:

- Finalización: momento de finalización del lavado
- Utilización: porcentaje de utilización de los recursos: plancha, secadores y lavadoras

Para decidir el número de experimentos a realizar se decidió tomar los valores umbrales de 15 minutos y 5% para cada una de las variables respuestas respectivamente, de manera que el experimento detectara diferencias significativas entre los sistemas de lavado, asumiendo un valor para  $s = 5$  minutos para la variable finalización y  $s = 1.5\%$  para la variable utilización, usando la expresión:



ISSN 1029-3450



$$\Phi = \sqrt{\frac{nD^2}{2a\sigma^2}}$$

Se obtuvieron los valores de  $0.75n$  y  $0.93n$  para  $f^2$ , con respecto a cada una de las variables. Utilizando las curvas características dadas en Montgomery (1997), con lo que se concluye que son necesarias al menos 6 réplicas para garantizar una potencia de 0.96 en la prueba.

Para el análisis se utilizó el software de Diseño Estadístico de Experimentos **Design-Expert** Versión 5.0, de la **Stat Ease Co.**, el cual brinda la opción de los diseños con un solo factor dentro de los diseños factoriales y se obtuvo que existen diferencias entre los sistemas de lavado para ambas variables (Las parejas que aparecen subrayadas son las que no difieren significativamente):

Variable: *Finalización*

$S_1$	$S_4$	$S_2$	$S_5$	$S_3$	$S_6$
<u>50935.67</u>	<u>50886.5</u>	<u>42479.83</u>	<u>42537.17</u>	<u>41571.5</u>	<u>41728.67</u>

Los sistemas de lavado 3 y 6 tienen los mejores tiempos de finalización, pues son significativamente menores que el resto de los tiempos asociados a los demás sistemas.

Variable: *Utilización*

$S_1$	$S_5$	$S_6$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
<u>74.66</u>	<u>73.98</u>	<u>74.93</u>	80.06	89.14	69.78

El mayor porcentaje de utilización lo reporta el sistema de lavado 3.

Como conclusión de este análisis podemos afirmar que la mejor variante es el sistema  $S_3$  o sea 5 lavadoras, 4 secadores comenzando a las tres horas el planchado y el doblado-conteo, pues lava en el menor tiempo haciendo el uso más adecuado de los recursos. Sin embargo no podemos afirmar que este sistema es el mejor, pues puede existir alguna otra combinación de los recursos que aporte mejores resultados. Por tanto si el interés es encontrar la mejor variante entre todas las posibles, se impone utilizar un **Diseño de Experimentos Multifactorial**.

### Experimento multifactorial

Se definieron:

- Las variables respuestas:



ISSN 1029-3450



- Finalización
- Utilización
- Los factores
  - # de lavadoras
  - # de secadores
  - hora de comienzo

El primer interés con este estudio era precisar qué factores tienen un efecto significativo sobre las variables respuestas, para luego con ellos obtener una función matemática que los relacione, en un principio son recomendables los modelos de primer orden como lo plantea la Metodología de Superficie de Respuesta. Como para tal propósito se recomiendan los diseños factoriales a dos niveles, en este caso se fijaron:

Factores	Niveles Bajo	Alto
# de lavadoras	4	8
# de secadores	3	7
Hora de comienzo	0	3

Se ejecutaron los experimentos recomendados para el caso y fueron analizados con el software **Design-Expert**, y se obtuvo que el factor hora de comienzo no es significativo para la variable *Finalización* y que para la variable *Utilización* los tres factores son significativos sus efectos, pero se alcanza su máximo dentro de la región experimental cuando el factor hora de comienzo toma el valor 3.

Por tanto en lo sucesivo sólo se consideraron los factores: # de lavadoras y # de secadores y las relaciones funcionales encontradas fueron:

$$\begin{aligned}
 \text{Finalización} = & 7183.38 + 29301.94 (\# \text{ de lavadoras}) + 3303.76 (\# \text{ de secadores}) \\
 & -3673.99 (\# \text{ de lavadoras})^2 + 462.64 (\# \text{ de secadores})^2 \\
 & 4496.73 (\# \text{ de lavadoras}) (\# \text{ de secadores}) + 182.70 (\# \text{ de lavadoras})^3 \\
 & + 189.85 (\# \text{ de lavadoras})^2 (\# \text{ de secadores}) + 122.58 (\# \text{ de lavadoras}) (\# \text{ de secadores})^2
 \end{aligned}$$

Para la variable *Finalización*:



ISSN 1029-3450



$$\begin{aligned}
 \text{Utilización} = & -168.86 + 127.08(\# \text{ de lavadoras}) - 9.99(\# \text{ de secadores}) \\
 & - 21.87(\# \text{ de lavadoras})^2 - 0.3(\# \text{ de secadores})^2 \\
 & + 5.01(\# \text{ de lavadoras})(\# \text{ de secadores}) + 1.21(\# \text{ de lavadoras})^3 \\
 & - 0.39(\# \text{ de lavadoras})^2(\# \text{ de secadores})
 \end{aligned}$$

Para la variable *Utilización*

Luego de obtenidas dichas expresiones se pasó a la etapa de optimización donde resulta evidente que el interés está en lavar en el menor tiempo posible, haciendo un uso racional de los recursos. Se entiende por uso racional de los recursos que los mismos sean explotados en la mayor parte del tiempo que la lavandería este ocupada en su actividad principal. Por tanto, es lógico pensar que el tiempo de lavado debe estar entre las 8 y 12 horas, pues así la instalación lavaría toda la noche y tendría la ropa lista para el cambio en las primeras horas de la mañana.

Por esa causa, con el objetivo de optimizar se utilizó la opción que para tal efecto posee el **Design-Expert 5**, se establecieron como restricciones:

4 £ # de lavadoras £ 8

3 £ # de secadores £ 7

28800 £ fin del lavado £ 43200

90 £ % de utilización £ 100

Como objetivos se fijaron minimizar el número de lavadoras y de secadores, ambos con igual importancia.

Con esa base el software propuso la siguiente solución :

# de lavadoras = 5.2

# de secadores = 4.8

Como ambos factores son indivisibles se desdobra la solución en los enteros sucesivos que la contienen:

	# lavadoras	de	# secadores	de	Finalización	% de utilización
1	5		4		42155	87.22
2	5		5		39402	89.89



ISSN 1029-3450



<b>3</b>	6	4	40997	86.49
<b>4</b>	6	5	35938	89.92

Ninguna de las variantes satisface la condición impuesta sobre el porciento de utilización, no obstante en las alternativas 2 y 4 el incumplimiento es casi despreciable, por tanto, ellas son las únicas a tener en cuenta, pero considerando que la 4 implica hacer una inversión mayor para la adquisición de una lavadora más, considerando el elemento económico, esto puede convertirla en una posibilidad prohibitiva, de ahí que la solución más apropiada a las condiciones impuestas es la dada en 2: 5 lavadoras y 5 secadores.

### **CONCLUSIONES:**

Un mismo problema tratado con simulación, puede tener diferentes diseños del experimento en dependencia del objetivo que se persigue, la calidad de los resultados no depende del diseño en sí, sino del rigor con que se haya desarrollado el mismo, teniendo en cuenta las características del sistema objeto de estudio.

### **BIBLIOGRAFÍA:**

1. Anderson, M.J., Whitcomb, P., "Design Experiments Strategies". Chem. Proc. Project Engineering, Minneapolis. 1998.
2. Casa, J.M., "Inferencia Estadística para economía y administración de empresas. Editorial Centro de estudio "Ramón Areces", S.A. 1996
3. Hillier, F.M, Lieberman, G., "Introducción a la Investigación de Operaciones". Quinta Edición. México 1991
4. Kelton, W.D., Law A.M., "Simulation Modeling & Analysis". Second Edition. McGraw-Hill, New York, 1991.
5. Kelton, W.D., Sadowski, R.P., Sadowski, D.A. "Simulation With Arena" McGraw-Hill, New York, 1998.
6. Kleijnenen, J.P., "Design and Analysis of simulation: Practical Statistical Technique". Simulation, 1977.
7. Montgomery, D.C., "Design and Analysis of Experiments". Fourth Editions. John Wiley & Sons. inc New York 1997.
8. Pegden, C.O., Shannon, R., Sadowski, R., "Introduccion to Simulation Using SIMAN", Second Edition, McGraw-Hill, New York, 1995

**Fecha de recepción:** 30/10/2002

**Fecha de aprobado:** 04/12/2002