

# ESTUDIO DE IMPLEMENTACIÓN CONJUNTA DE LAS TECNICAS DE SIMULACIÓN Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA EL MEJORAMIENTO DE PROCESOS PRODUCTIVOS.

**René Amaya Mier**

Magíster de Ingeniería Industrial  
Universidad de Los Andes  
Santafé De Bogotá D.C., Colombia  
Agosto de 1999.

*Resumen: Las técnicas de simulación y diseño de experimentos se encuentran dentro de las más efectivas para generar conocimiento sobre sistemas complejos. En este artículo se pretende mostrar cómo de la aplicación conjunta de ambas técnicas se puede obtener un método ventajoso para la recreación de la variación inherente a sistemas complejos, obtención de resultados de configuraciones de interés, y su posterior análisis por intermedio de técnicas estadísticas para la consecución de conclusiones estadísticamente significativas. Para el logro de lo anterior se presentan los resultados obtenidos de la implementación práctica de un proyecto realizado en una empresa con características propias del medio industrial colombiano con el objetivo de mejoramiento de la productividad de sus procesos, y las conclusiones que arrojó dicho estudio.*

Palabras Claves: Diseño de Experimentos, Simulación, Arena, Implementación conjunta de Simulación y DOE, Mejoramiento de Procesos.

## **1 INTRODUCCION**

Dentro de los esquemas productivos que propenden por respuestas ágiles y efectivas tendientes a la solución de problemas complejos y en general al mejoramiento de procesos para ser más competitivos en el actual entorno globalizado, es sentida la necesidad de técnicas que permitan a investigadores e ingenieros profundizar acerca del conocimiento sobre los sistemas de producción, de una forma económica y dentro de razonables límites de tiempo, conduciendo a un mejor aprovechamiento de las

restricciones de recursos productivos para la obtención de un mejor producto o servicio.

El trabajo que se quiere llevar a cabo con esta tesis comprende la investigación sobre dos de las principales herramientas para el mejoramiento de procesos y en general características de calidad del producto, que cumplen con las expectativas anteriores, como son la Simulación por Computador y el Diseño de Experimentos (DOE)<sup>1</sup>; como resultado de esta investigación, se han encontrado en la literatura numerosos reportes acerca de ventajosas aplicaciones sobre ambas técnicas utilizadas en forma individual, no siendo tan frecuentes en la literatura artículos sobre aplicaciones conjuntas y complementarias de ambas técnicas. De otra parte la información disponible generalmente está relacionada con aplicaciones de sistemas de manufactura flexible, sistemas con vehículos autoguiados, líneas de ensamble, sistemas JIT (justo a tiempo), entre otros, que no son enteramente correspondientes con las condiciones observadas en nuestro medio industrial, habida cuenta de una aplicación mayoritaria de producción por procesos, con una infraestructura tecnológica de máquinas poco flexibles diseñadas para producciones cuantiosas.

Dentro del alcance de este proyecto se pretende profundizar acerca de las posibilidades que brindan la aplicación conjunta de ambas técnicas como método potenciador de los beneficios obtenidos individualmente por cada una de ellas, y para el logro de esto se ha pretendido en este trabajo una profundización en el conocimiento sobre éstas a través del estudio e implementación práctica de una aplicación en un proceso productivo con características representativas del medio industrial colombiano. Para la consecución de lo anterior se va a llevar a cabo un estudio en la empresa EMPAQUES INDUSTRIALES DE COLOMBIA (EIC), basado

---

<sup>1</sup> Por sus siglas en inglés, Design of Experiments

fundamentalmente en el modelaje de su aparato productivo mediante Simulación por Computador, y el análisis de resultados sobre el modelo del sistema mediante Diseño de Experimentos.

## **2 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

- 1) Análisis de la implementación conjunta de las técnicas de *Simulación y Diseño de Experimentos*.
  - i) Revisión bibliográfica de estado del arte de ambas técnicas.
  - ii) Características de su implementación en un proyecto real.
  - iii) Implementación del proyecto empleando recursos tecnológicos sencillos.
  
- 2) Propuestas de mejora de la productividad del proceso bajo estudio.
  - i) Obtención de un modelo válido del sistema modelado.
  - ii) Realización del Diseño de Experimentos sobre dicho modelo.
  - iii) Obtención de conclusiones estadísticamente significativas del desempeño del sistema.

## **3 SIMULACIÓN Y DOE**

La Simulación puede ser definida en un sentido amplio como “una actividad en donde se pueden hacer inferencias sobre el comportamiento de un sistema dado a través de un modelo cuyas relaciones causa-efecto sean las mismas (o similares) a las del original”[8].

El Diseño de Experimentos es en general una extensión del método científico tradicional, en el que se adelantan una serie de pruebas en algún campo de estudio particular para obtener una profundización de los conocimientos sobre éste. Esto comprende la intervención del investigador en el fenómeno estudiado, la alteración sistemática de las condiciones en que éste se realiza,

y la observación y análisis de las características de interés con el objetivo de obtener un mayor nivel de entendimiento sobre dicho fenómeno. Un experimento es una prueba o serie de pruebas en las que se realizan cambios intencionados sobre algunas de las variables de entrada de un sistema bajo estudio, de las que se sospecha afectan mayormente una variable de respuesta de interés, de forma de observar e identificar las razones para los cambios en dicha respuesta[8].

Tradicionalmente [1] la simulación ha sido utilizada como herramienta para la predicción de medidas de desempeño de sistemas reales o imaginarios, donde se realizan comparaciones pareadas de distintos tipos de configuraciones del sistema modelado (escenarios) en búsqueda de la mejor respuesta.

En esta situación sin embargo, no es aparente la dificultad que surge al intentar definir la “mejor” configuración que maximiza el desempeño del sistema modelado. El problema de evaluar el alto número de variantes de que se compone un sistema complejo, con las herramientas de que se dispone y la experiencia del personal calificado, pueden no ser suficientes para escoger las variables y niveles apropiados, con lo que se incurriría en el llamado “efecto de optimización local” [5] al intentar con un método aleatorio de prueba y error encontrar respuestas puntuales al problema perdiendo de vista el espectro total de posibilidades.

Por otra parte, en la mayoría de las situaciones sería deseable para el analista considerar variaciones *simultáneas* de varios factores a la vez, de forma de evaluar varios efectos en la(s) variable(s) de respuesta.

En la matriz que se muestra a continuación se presentan algunas de las características principales en cuanto a ventajas y desventajas que se

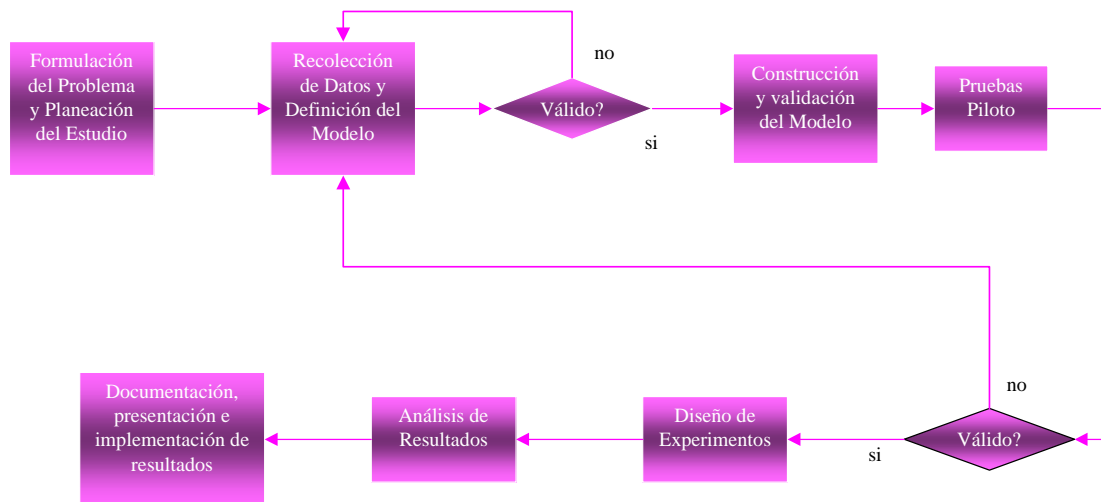
observan en el uso individual de cada una de éstas técnicas, y de la misma manera como mediante su uso conjunto se puede al mismo tiempo reducir e multiplicar sus ventajas

	SIMULACIÓN	DOE	SIMUL & DOE
VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Estudio de sistemas complejos, reales o imaginarios imposibles por métodos analíticos.</li> <li>•No interviene el sistema real</li> <li>•Visualización de escenarios, y de la secuencia de los procesos.</li> <li>•Secuencias comprimidas en el tiempo.</li> <li>•Control Experimental.</li> <li>•Procesos estocásticos.</li> <li>•Desarrollo del software y hardware</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Estudio de sistemas complejos reales.</li> <li>•Método sistemático de análisis de sistemas, eficiente uso de datos</li> <li>•Configuración óptima de factores para maximizar desempeño y robusticidad.</li> <li>•Variación simultánea de factores.</li> <li>•Resultados estadísticamente significativos</li> <li>•Tiene en cuenta interacciones de factores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Su uso combinado brinda los medios para una conveniente obtención de resultados sobre el modelo, y un método robusto de análisis de resultados.</li> <li>•Método sistemático para definir configuraciones específicas a simular. (Eficiencia en el uso de la información requerida).</li> <li>•Conclusiones estadísticamente significativas sobre los factores y su combinación para maximizar desempeño del sistema.</li> <li>•Posibilidad de análisis de interacciones de factores sobre la variable de respuesta.</li> </ul>
DESVENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Personal capacitado.</li> <li>•Resultados engañosamente correctos.</li> <li>•Modelos desechables.</li> <li>•Comparaciones pareadas, prueba y error.</li> <li>•Alternativas mas efectivas o exactas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Personal capacitado.</li> <li>•Intervención directa en el sistema, con los recursos que esto conlleva.</li> <li>•Tiempo prolongado.</li> <li>•Costos de implementación elevados</li> </ul>	

**Tabla 1. Cuadro comparativo de características principales de Simulación y DOE**

La metodología para la implantación de estas técnicas corresponde a los métodos recomendados en los cursos de *Simulación Discreta* y *Diseño de Experimentos* del Magíster en Ingeniería Industrial, de la Guía de Entrenamiento del software ARENA y los autores Law y Kelton [20], para la simulación, y de los libros de Montgomery y Hicks sobre *Diseño de Experimentos* [2][3][4], y en general artículos disponibles en la literatura sobre implementaciones reales de Simulación y Diseño de Experimentos. A continuación se presenta el detalle de las actividades del proyecto en el flujograma anexo, que básicamente incluye una etapa inicial de recolección y manejo de datos y ajuste de distribuciones estadísticas con ayuda del

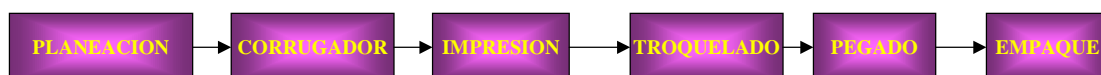
paquete Bestfit 2.0a, elaboración y validación del modelo con Arena 3.0, y la recolección de muestras sobre el modelo y posterior análisis DOE con el software Statsgraphics Plus 3.0.



**Figura 1. Flujograma de Actividades desarrolladas en el Proyecto.**

#### 4 IMPLEMENTACIÓN

El proceso bajo estudio comprende la transformación de rollos de papel de distintos grosores y características en cartón corrugado en la forma de cajas, con tamaños e impresiones diversas, en un sistema genérico por procesos de formación de cajas de cartón, que comprende básicamente 14 etapas por las que transcurre la transformación hasta el producto terminado, de acuerdo con las 16 variantes en las rutas de fabricación de las 11.000 referencias principales consideradas en este estudio. A continuación se aprecian las etapas principales del proceso mediante un diagrama del flujo genérico de los productos:



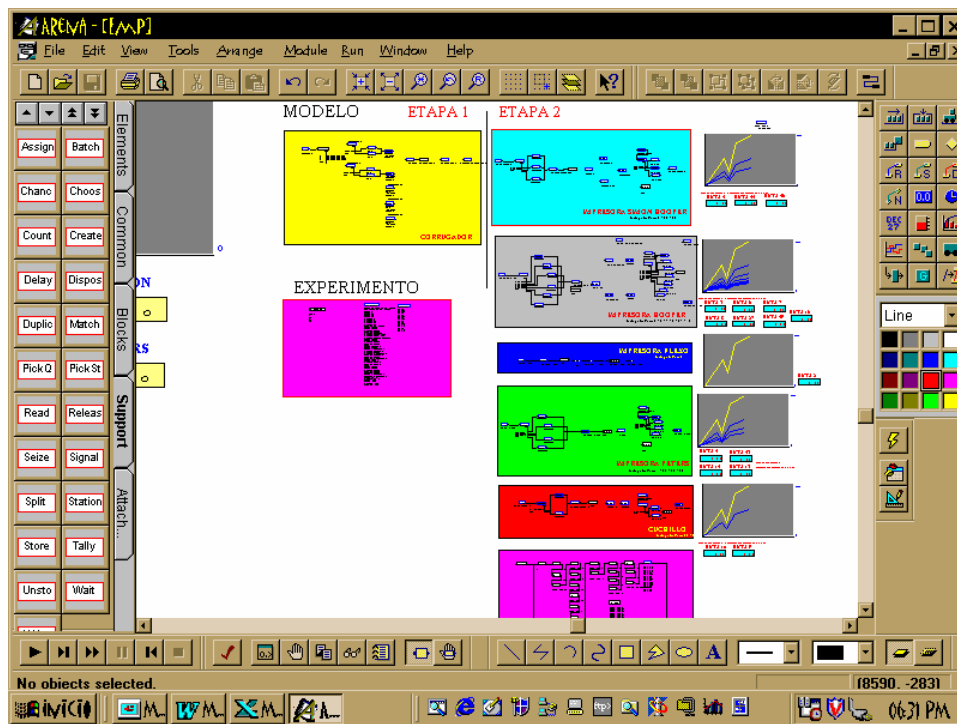
**Figura 2. Etapas Principales del Proceso bajo estudio.**

Los objetivos a los que se dirigía este proyecto comprendían específicamente el mejoramiento de la productividad de los procesos, a través de la identificación de los principales problemas observados en el flujo del proceso, entre los que se identificaron básicamente dificultades relacionadas con la programación de la producción y etapas críticas en cuanto a capacidad del proceso.

#### **4.1 Simulación**

En esta sección se describirán los aspectos mas relevantes del proyecto de simulación realizado, los resultados obtenidos se discutirán en la siguiente sección.

En el Anexo 1 se encuentra un resumen de las distribuciones estadísticas con las que se modelaron variables importantes referentes al proceso por cada estación, como tiempos entre llegadas de ordenes de producción, unidades por pedido, tiempos de montaje, operación y muertos por cada máquina.



**Figura 3. Bloques básicos del modelo en Arena 3.0**

Al observar el modelo de simulación creado en Arena, se pueden apreciar agrupaciones de bloques lógicos encerrados en rectángulos de color, que están dispuestos de forma semejante a la organización dispuesta en el Anexo 2, como ramales que se desprenden de las estaciones principales. Se consideran como estaciones principales aquí, el corrugador y las impresoras, y se incluyen dentro de éstas las máquinas que por afinidad en su funcionamiento y rutas son más cercanas

El modelo de simulación está dividido en dos secciones principales, que están vinculadas por una zona de almacenamiento temporal. Estas etapas comprenden por una parte el inicio desde la oficina de Planeación de Producción, incluyendo el corrugador, hasta una zona de almacenamiento temporal. La segunda sección comprende las restantes máquinas y procesos del modelo.

Se ha encontrado conveniente esta división por razones que comprenden por una parte la lógica del funcionamiento real del sistema modelado, y por otra parte limitaciones en los datos de entrada del modelo y su funcionamiento. En el sistema real se tiene como entrada del proceso para todas las rutas de fabricación el corrugador, cuya capacidad de producción excede la demanda de láminas de las siguientes estaciones, por lo que su producción se acumula en una zona adyacente de almacenamiento temporal; esto desfasa en continuidad el flujo del proceso, al iniciarse después de éste punto un nuevo punto de ordenamiento de pedidos, con criterios aplicables al aprovechamiento de las máquinas subsecuentes.

De lo anterior se desprende que la parte crítica del proceso, en cuanto a flujo se refiere, se concentra en la segunda etapa, razón por la que no se concentró mucho esfuerzo de modelaje en la primera, y para efectos del problema se pueden considerar independientes.

Con base en lo anterior se modela esta segunda etapa a partir del almacén después del corrugador, considerando para cada etapa principal tasas de llegada independientes, cada una con atributos diferentes adecuados a estas máquinas.

Se tomaron en cuenta como parámetros para la determinación del tiempo de transición y longitud de corrida del modelo, las variables de tiempo flujo de proceso, que al ser las de más difícil estabilización, determinan de forma robusta la condición de estado estable del modelo, así como la obtención de longitudes de corridas suficientes para la obtención de intervalos de confianza para las variables de desempeño de interés en el modelo, que consecuentemente con los objetivos de medición de productividad del proceso, son tasa de producción horaria, tiempo de flujo del proceso, y longitudes promedio de cola por estación.

Para la validación del desempeño del modelo se ha recurrido básicamente a valoración por parte de expertos, por intermedio del análisis de los reportes de salida de Arena y la observación directa de las características de la animación del sistema modelado.

C o m p a r a t i v o		
estacion	dif	%
flexo	398.1	18.7 %
hooper	148.762	13.2 %
peters	123.865	14.2 %
simon	179.16	8.0 %
troq	105.259	56.1 %
Total general	955.146	14.6 %

**Tabla 2. Cuadro comparativo de valores reales y del modelo para la variable tasa de producción por hora de la estaciones principales del proceso**

## 4.2 Diseño de Experimentos

En esta sección se entrará a desarrollar una metodología de Diseño Experimental para identificar los factores más representativos que afectan la actual capacidad productiva del proceso, seleccionando para esto un grupo de factores que se someterán a prueba en forma sistemática a un análisis de sensibilidad conjunto, que permitirá evaluar en forma estadísticamente significativa su impacto sobre la(s) variable(s) de respuesta seleccionada(s), y adicionalmente una selección óptima de éstos.

Para la realización de los experimentos, se han seleccionado cinco características de interés, con base en información a priori tomada de EIC, y al análisis preliminar realizado con la simulación.

Como estrategia inicial para la preselección y separación de factores críticos (screening), se realizará un experimento factorial  $2^4 \times 3^1$ , y con posterioridad de acuerdo con los resultados se empleará en una serie de pruebas de profundización otro diseño con mas niveles sobre los efectos significativos

identificados. De acuerdo con [17],[18] y [3], esta estrategia es conveniente debido a la existencia de numerosos factores iniciales preseleccionados, de los que generalmente solo unos pocos con sus interacciones son significantes en la variable de respuesta.

A continuación se presentan cada uno de los factores mencionados, con los respectivos niveles seleccionados de acuerdo con alternativas viables al proceso. Para este efecto se han identificado como de mayor relevancia dos alternativas relacionadas con la programación de la producción, y tres relativas a incremento en la capacidad del proceso, como sigue:

1. **Prioridad de Procesamiento:** este factor será designado en el experimento como **Políticas**, y está referido al ordenamiento que siguen los pedidos para su transformación en el proceso. Se tomarán para este factor tres niveles cualitativos, para establecer si existe una diferencia importante en criterios para el procesamiento. Estos son:

- Prioridad en Plazo de Entregas (lvf entregas)
- Menor Tiempo de Procesamiento (lvf proceso)
- Orden de Llegada (prioridad FIFO)

2. **Adquisición de Impresora Nueva:** este factor se denomina **Simon**, debido a que esta compra estaría dirigida a reforzar la capacidad de la estación en mención. Con una disposición en paralelo de ambas máquinas para las rutas de pedidos de dicha estación, podría esperarse un aumento neto en la capacidad marginal del orden de un 150%, de tal forma que los niveles escogidos para este factor serán dos, con la situación actual y propuesta.

3. **Aumento en la Capacidad de Impresora Hooper:** esta máquina sobrelleva una carga de trabajo considerable sobredimensionada a su capacidad y tiempo de servicio. Se propone la instalación de un juego de cilindros

rotativos rectificadas, que podrían eventualmente incrementar la velocidad de procesamiento por unidad en un 45% de su capacidad. Se proponen dos niveles con la situación actual y propuesta.

4. Incremento del Número de Operarios de la estación de Pegado **Manual**. Identificada como un cuello de botella en las rutas de la estación Hooper. Como medida de mejora, y teniendo en cuenta su directa proporcionalidad con el número de operarios asignados, se trabajará en dos niveles con doble asignación de operarios.

5. Variación del **Flujo** de Pedidos: esta medida se impone para analizar la existencia de un efecto neto en el aumento/disminución neta de llegadas de pedidos a todas las estaciones, compensando con una variación en el número de unidades procesadas por pedidos. Para no incurrir en alteraciones del sistema que no podrían ser controlables (mayor demanda de producto), se contrarresta llegadas contra unidades por pedido. Debido a restricciones en la capacidad del modelo del número de entidades presentes, las tasa de llegada de los pedidos no se cargan sino en pequeños márgenes de variación, utilizando mayor variación en el número de pedidos. Adicional a esto se realizan estas pequeñas variaciones para no abusar del estimado de linealidad en este factor, al usar sólo dos niveles de variación. Si se considera el flujo del sistema como la tasa de llegada de pedidos multiplicada por el número promedio de unidades contenido en cada pedido, se observa que éste se mantiene constante, no así las variaciones que se realizan en las variables que lo afectan.

El detalle de los niveles utilizados en los experimentos se muestra en el Anexo 3.

El procesamiento para el Análisis de Varianza de los datos de este experimento fue realizado con la ayuda del paquete estadístico Statsgraphics 6.0, y los resultados se muestran a continuación:

Analysis of Variance for DESIGN.TASA - Type III Sums of Squares

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
-----					
MAIN EFFECTS					
A:DESIGN.Políticas	5578.4	2	2789.2	2.372	0.1125
B:DESIGN.Simon	357.5	1	357.5	0.304	0.5917
C:DESIGN.Flujo	5228388.1	1	5228388.1	4445.945	0.0000
D:DESIGN.Hooper	238.5	1	238.5	0.203	0.6608
E:DESIGN.Manual	0.0	1	0.0	0.000	1.0000
INTERACTIONS					
AB	3314.5117	2	1657.2558	1.409	0.2617
AC	204.1350	2	102.0675	0.087	0.9171
AD	8256.6717	2	4128.3358	3.511	0.0441
AE	0.0000	2	0.0000	0.000	1.0000
BC	455.1008	1	455.1008	0.387	0.5457
BD	6.3075	1	6.3075	0.005	0.9429
BE	0.0000	1	0.0000	0.000	1.0000
CD	2685.0208	1	2685.0208	2.283	0.1424
CE	0.0000	1	0.0000	0.000	1.0000
DE	0.0000	1	0.0000	0.000	1.0000
RESIDUAL	31751.741	27	1175.9904		
-----					
TOTAL (CORRECTED)	5281236.0	47			
-----					

0 missing values have been excluded.

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Press Esc, Cursor keys or Page Number:

Page 2.1 of 2.1

ANOVA 06/14/99 19:18 || PRTOPT || GO || TOOLS || QUIT ||  
 INPUT STATGRAPHICS Plus 6.0 || (F5) || (F6) || (F10) || (Esc) ||

**Tabla 3. Resultados de Statsgraphics 6.0 – ANOVA de Diseño Inicial  $3^1 \times 2^4$  para la Variable de Respuesta Tasa de Producción por Hora**

De la Tabla ANOVA se puede apreciar que solo los efectos principales correspondientes a factores Políticas y Flujo son significativos. De hecho se aprecia una fuerte influencia de Flujo, al tener a un nivel de significancia del 100% efecto sobre la variable de respuesta. Por otra parte el factor Políticas, aun que no tan representativo en su efecto como el anterior, tiene una

significancia estadística del 88.8%, que lo convierte en un factor con alta incidencia en la respuesta.

Contrario a lo que cabría esperarse, los factores relacionados con aumentos de capacidad del sistema no tienen un efecto importante por sí solos, y solo cuando son aplicados en conjunción con los factores de programación alcanzan significancia estadística, encontrándose que el factor de Pegado Manual puede descartarse del análisis; en su orden de importancia se encuentran respectivamente las interacciones correspondientes a los factores Políticas-Hooper, Flujo-Hooper, y Políticas-Simon.

Para la realización del ANOVA se desprecian las interacciones de mayor orden, lo cual deja 47 g.l. suficientes para el error.

Los anteriores resultados son la base para la realización de la segunda ronda experimental de profundización de resultados, ya que son determinantes para escogencia de los factores a introducir y la selección de sus niveles respectivos.

A continuación se presentan los resultados de un ronda confirmatoria de experimentos, que se realizó para profundizar en las conclusiones obtenidas en el diseño anterior. En este se corrieron nuevas variantes de los efectos significativos obtenidos anteriormente, bajo un escenario de la Política que se encontró como la predominante en la ronda anterior, es decir, criterio de orden de menor tiempos de proceso.

Se corrió un diseño  $3^3$  con dos replicaciones, de forma de encontrar posibles efectos no lineales entre las interacciones de los efectos y para suficiencia estadística de la prueba.

En el anexo 4 se muestran los niveles escogidos y sus resultados.

Enseguida se muestra la tabla del ANOVA de los resultados obtenidos sobre la segunda corrida de experimentos.

Analysis of Variance for FINAL.TASA - Type III Sums of Squares

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
MAIN EFFECTS					
A:FINAL.Flujo	6792536.8	2	3396268.4	31.578	0.0000
B:FINAL.Simon	214368.0	2	107184.0	0.997	0.3823
C:FINAL.Hooper	113412.8	2	56706.4	0.527	0.5962
INTERACTIONS					
AB	432473.67	4	108118.42	1.005	0.4220
AC	99579.45	4	24894.86	0.231	0.9183
BC	230087.78	4	57521.94	0.535	0.7113
ABC	466318.87	8	58289.86	0.542	0.8144
RESIDUAL	2903885.7	27	107551.32		
TOTAL (CORRECTED)	11252663	53			

0 missing values have been excluded.

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Press Esc, Cursor keys or Page Number: Page 1.1 of 1.1  
 ANOVA 06/15/99 06:11 || PRTOPT || GO || TOOLS || QUIT ||  
 INPUT STATGRAPHICS Plus 6.0 || (F5) || (F6) || (F10) || (Esc) ||

**Tabla 4. Resultados de Statsgraphics 6.0 – ANOVA de Experimento Central 3<sup>3</sup> para la Variable de Respuesta Tasa de Producción**

Aquí es de notar que nuevamente el factor Flujo tiene altísima significancia para los resultados de la prueba, e igualmente aunque en un menor grado los factores de capacidad del proceso, que en este nuevo análisis aparecen con un grado de importancia menor frente al factor flujo. Las interacciones entre factores son insignificantes, y se excluyen por ende del análisis.

Para cada una de las corridas realizadas en este experimento se ha tomado como herramienta de validación de los resultados obtenidos el análisis de residuales, lo que ha arrojado como resultado conclusiones robustas sobre el estudio realizado al encontrar patrones de residuales sin correlación observable, y que presentan un ajuste bastante bueno al supuesto de normalidad de éstos.

## 5 CONCLUSIONES

- Del uso conjunto de éstas técnicas surgen alternativas que en este caso indican que de la primera configuración “evidente” del sistema en la que se incurriría en costo, no es la que más afecta, y como en este caso puede ser económicamente más viable la implementación de medidas como cambios en la secuenciación y programación de pedidos. En este Proyecto se buscaba evaluar sobre el factor políticas los efectos que puede tener en el sistema en estudio la implementación de un sistema de ‘halar’, mas que del tradicional ‘empujar’ la producción, con la planificación de grandes volúmenes buscando economías de escala.
- Para la configuración de factores del sistema, se deduce de este análisis que la mejor opción para el procesamiento de pedidos corresponde al criterio de pedidos con menor tiempo de proceso, estadísticamente significativo y el más influyente de los factores estudiados.
- Además es importante el efecto de la variable flujo, con los resultados alcanzados aquí se deberían probar valores de flujo mayores a los permitidos por el desempeño del modelo. En particular se recomienda una ampliación de los resultados de este estudio, para una región experimental que incluya tasas de llegada en un rango de disminución de un 5% a un 20% (aumento de tasas de llegadas con disminución de tamaño de lotes) como medida inicial, teniendo en cuenta que este es un factor con una relación que aunque no lineal, todo indica que es una curva que maximiza los valores inferiores de este factor.

- Por lo pronto no se recomienda a la empresa la implementación de los cambios propuestos en la capacidad de las maquinas, sin antes haber ensayado los dos factores de programación que se han expuesto antes. Seria interesante una vez implementado esto, el estudio y corrida de nuevos experimentos para determinar resultados.
- En cuanto a los resultados obtenidos para la experimentación, se puede anotar que la condición de aleatorización del orden de las pruebas realizadas pierde sentido, teniendo en cuenta las corridas correspondientes para cada factor y nivel son obtenidas de un modelo inmutable en sus resultados, que incorpora ya la variabilidad del sistema real pero no está expuesto a variaciones entre diferentes corridas a un mismo tratamiento.
- Es importante la confirmación de resultados obtenidos por el modelo directamente en el sistema real cuando se pretende obtener resultados robustos sobre el procedimiento iterativo de profundización de resultados para la optimización, ya que se puede llegar a inexactitudes teniendo en cuenta las limitaciones inherentes al modelo respecto a su representación del detalle del sistema real, y el alcance de la validación de resultados inicial. De otra forma se puede incurrir en una sobrestimación de la capacidad real del modelo de reproducir resultados sobre una región experimental reducida, que conlleve a conclusiones erróneas.
- La Simulación es una herramienta poderosa para el análisis de sistemas complejos, mayormente compuestos por relaciones causa-efecto no tan evidentes, o de alguna forma escondidas detrás de la acción del tiempo u otros factores que componen su acción; una de sus características más valiosas es que permite generar y capturar la variación inherente a los sistemas bajo observación, mediante métodos relativamente sencillos de

observación directa y captura de datos de entrada y salida, bajo el enfoque de caja negra, sin tener que ahondar más de lo necesario en la dinámica interna del sistema simplificando así el abordaje del problema. Sin embargo esta misma característica de recreación eficiente de la variación de un sistema no es suficiente para un conocimiento profundo sobre éste, en el peor de los casos una buena emulación sin una buena comprensión probablemente lleve a afectar negativamente el sistema por medidas inadecuadas, o al desperdicio de recursos en estudios que no conducen a hacia respuestas satisfactorias. Es en este sentido que más que un *generador* de soluciones la Simulación es un *evaluador* de soluciones [14]. En este orden de ideas, es apenas evidente la contribución que se obtiene de un método sistemático diseñado para el estudio de la varianza y el conocimiento de las causas detrás de ella, de forma que se obtiene de la experiencia realizada el conocimiento de primera mano sobre como de la integración de estas herramientas se pueden obtener mejores resultados, de alguna manera se puede afirmar que la fase de análisis que se realiza con DOE enfoca los esfuerzos y capacidad de la simulación.

- Es muy importante para la parte de planificación de este tipo de proyectos el que se tenga en un plazo razonable de tiempo identificada muy bien la recursión y nivel de detalle en que se va a profundizar en el problema en cuestión, porque otro tanto se hace necesario con la Simulación. Es una medida muy saludable para evitar el desperdicio de esfuerzo necesario en el intento de modelar un sistema, el no perder el enfoque adecuado de detalle imprescindible, validando los datos de interés.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ÖZDEMIREL, N y KÖKSAL, G.,1998. "Computer-Aided Planning and Design of Manufacturing Simulation Experiments". *Simulation*. vol.67, no. 3, pp..171-191.
- [2] SYSTEMS MODELING CORPORATION, 1997. *ARENA Training Guide*. Systems Modeling Corp. 504 Beaver St, Sewickly
- [3] MONTGOMERY, D.,1976. *Design and Analisis of Experiments*. John Wiley and Sons, Inc. New york
- [4] HICKS, Ch., 1964. *Fundamental Concepts in the Design of Experiments*. Holt, Reinhard and Winston, Inc. Lafayette, Indiana.
- [5] GREGOR, M y KÖSTURIAK, J. 1997. "Simulation: Strategic Technique for the Factory's Future". *Simulation*, vol. 69, no.5, pp. 291-305.
- [6] BANKS, J. y CARSON, J., 1984. *Discrete-Event System Simulation*. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- [7] BANKS, Jerry y GIBSON, R., 1998. "Don't Discount History in Real-World Projects". *Industrial Engineering Solutions* , vol 29 , pp 28-37.
- [8] MAUER, J. y KELLER, L., 1998. "Myth is More Potent Than History". *Industrial Engineering Solutions* , vol 29 , pp 28-37.
- [9] BARTON, R. 1997. "Pre-Experimental Planning for Designed Experiments: Graphical Methods". *Journal of Quality Technology* 29, pp 307-316.
- [10] DAVIS, W., ., 1998. "Looking into the Future of Simulation". *Industrial Engineering Solutions* , vol 26 , pp 25-30
- [11] BOCKELMANN, Erick y LÓPEZ, Jaime 1997. "Informe Final del Trabajo en Tecnología Informática". Universidad de Los Andes, Bogotá D.C.

- [12] BONING, D. and MOZUMDER, P.K.,1993. "DOE/Opt: A System for Design of Experiments, Response Surface Modeling, and Optimization using Process and Device Simulation". <http://www-mtl.mi.,edu/edu/~boning/doe/doe.html>
- [13] FOWLKES, W. and CREVELING, C. 1995. *Engineering Methods for Robust Product Design*. Addison-Wesley Publishing Co.
- [14] PORCARO, Dino 1996. "Simulation Modeling and DOE". *Industrial Engineering Solutions*, pp 24-30.
- [15] HARRELL, Ch. Y TUMAY, K. 1997. "Simulation Made Easy". *Industrial Engineering Solutions*, vol.,38, pp, 39-41.
- [16] COCHRAN, W.G. y COX, G.M.,1957. *Experimental Designs*, 2daEd. John Wiley and Sons, Inc. New York
- [17] MAURO, C.A. y SMITH, D.E. 1984. "Factor screening in simulation: evaluation of two strategies based on random balance sampling". *Management Science*, vol.30, no. 2, pp. 209-221.
- [18] PLACKETT, R.L. y BURMAN, J.P., 1946. "The design of optimum multifactorial experiments". *Biometrika*, vol.33, pp. 305-325.
- [19] HUNTER, J.S., y NAYLOR, T.H., 1970. "Experimental Designs for Computer Simulation Experiments". *Biometrika*, vol.33, pp. 305-325.
- [20] LAW, A. M.y KELTON, W. D., 1991. *Simulation Modelling and Analisis*, 2da Ed. Mc Graw Hill Inc.New York.
- KELTON, W.D., SADOWSKI, R. y D. 1998. *Simulation with Arena*. Mc Graw Hill Inc.New York.

## **ANEXO 1.**

# **RESUMEN DE DISTRIBUCIONES AJUSTADAS**

## **ANEXO 2.**

# **FLUJOGRAMA DE UNIDADES PROCESADAS POR ESTACIÓN**

## **ANEXO 3.**

# **NIVELES DEL PRIMER EXPERIMENTO**

## **ANEXO 4.**

# **NIVELES DEL SEGUNDO EXPERIMENTO**