

1974
FACULTAD DE QUIMICA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA



APLICACION DE LA SIMULACION EN LA PROGRA-
MACION DE LA PRODUCCION EN UNA PLANTA
QUIMICA

JOEL SABINO CASTILLO ELIZONDO

MONTERREY, N. L.

1971



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA

APLICACION DE LA SIMULACION EN LA PROGRA-
MACION DE LA PRODUCCION EN UNA PLANTA
QUIMICA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A

JOEL SABINO CASTILLO ELIZONDO

MONTERREY, N. L.

1971

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE

PRESIDENTE: ING. NAUL MEYER STOFFEL.
VOCAL: ING. PABLO BARRONETA GONZALEZ.
SECRETARIO: ING. ENRIQUE VILLENSE RUIZ.
1er. SUPLENTE: ING. ENRIQUE BARRONETA GUSMAN.
2o. SUPLENTE: ING. GERARDO BARRONETA GONZALEZ.

SITIO DONDE SE DEBEABAN DE REALIZAR EL TRABAJO:

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

ESTUDIOS OPERACIONES DE

MONTEPERIT

SUBSECRETARÍA DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

ASESOR DEL SECRETARIO GENERAL DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Con profundo cariño, reconocimiento,
admiración y respeto, a mis padres

SABINO CASTILLO SANCHEZ

MARIA IGNACIA ELIZONDO DE CASTILLO

y

a mis queridos hermanos

JORGE HOMERO

QUELO

RAUL

MENCA RUTH

A mis familiares

A mis amigos

Capitulo		Pág
IV	RESULTADOS	47
V	CONCLUSIONES	50
	APENDICE	51
	REFERENCIAS	61

CAPITULO I

INTRODUCCION

I.1 Definición de Simulación

Puesto que la definición de simulación es muy amplia, se debe operar con una definición de simulación más estrecha y para poder hacerlo hay que considerar:

Primero, aunque se pueda hablar de simulación en muchos campos, como Psicología, Medicina, Ingeniería, se restringirá a las áreas de la Industria, o algún componente de ellas.

Segundo, se hablará de Simulación para experimentar solo con modelos lógicos y matemáticos. Por lo tanto se excluirán los modelos físicos, orales, etc. Esto se hace debido a que la tesis tratará sobre un modelo matemático.

Tercero, el interés principal es el de realizar experimentos de simulación que se pueden llevar a cabo en una computadora digital. Sin embargo esto no excluye la posibilidad de usar una computadora analógica.

Cuarto, no interesan los experimentos tales como los que se encuentran en la teoría microeconómica, los cuales se realizan bajo condiciones de certeza, de equilibrio estático y producen soluciones determinísticas, sino aquellos que se lleven a cabo sobre grandes períodos de tiempo, bajo condiciones estocásticas o dinámicas y cuyas soluciones no son necesariamente, de-

terminísticas y obtenidas por medios analíticos.

Habiendo impuesto estas cuatro restricciones, se puede formular la definición que se tomará como válida en la presente tesis.

"Simulación es una técnica numérica para conducir experimentos con el auxilio de una computadora digital, que implica ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de un sistema de negocios o económico (o algún componente de ellos), sobre grandes períodos de tiempo real".

En los alcances del presente estudio no se incluirán el, ¿cuándo?, ¿cómo?, ¿dónde?, ¿porque?, llevar a cabo un experimento de simulación.

Quien esté interesado en profundizar deberá consultar las referencias.

I.2 Descripción de Simulación

La técnica de simulación ha sido una herramienta muy importante para el diseñador, sea que se esté simulando el vuelo de un avión en un túnel de viento, distribuciones físicas de plantas con modelos de máquinas a escala o líneas de comunicación con un diagrama de organización. Con el advenimiento de las computadoras digitales es posible conducir experimentos simulados, esta técnica se ha vuelto de gran importancia para el investigador de operaciones.

En consecuencia la simulación se ha transformado en un bra

zo experimental de la Investigación de Operaciones.

Un enfoque muy importante es el de formular y resolver modelos matemáticos que representan sistemas reales.

Una de las principales características de este enfoque es que extracta la esencia del problema y revela su estructura fundamental, proporcionando de este modo conocimientos en las relaciones "causa y efecto", dentro del sistema.

Por esta razón, si es posible construir un modelo matemático que además de ser una idealización razonable del problema -- sea de solución sencilla, este enfoque analítico generalmente es superior a la simulación. Sin embargo, muchos problemas son tan complejos que no pueden resolverse analíticamente. En consecuencia no obstante que la simulación tiende a ser un procedimiento costoso proporciona generalmente el único enfoque práctico del problema.

Dentro de la investigación de operaciones, la simulación -- también implica la construcción de un modelo el cuál en esencia es bastante matemático.

Antes de describir directamente la conducta total del sistema, el modelo de simulación describe su operación en términos de eventos individuales de sus componentes.

En particular, el sistema se divide en elementos cuya conducta puede predecirse, al menos en términos de distribuciones de probabilidad, para cada uno de sus diferentes estados posi--

bles.

Las interrelaciones entre los elementos también se construyen dentro del modelo. De esta forma, la simulación proporciona un medio de dividir la tarea de construir el modelo en partes - pequeñas y entonces combinar estas partes en su orden natural y permitir a la computadora presentar el efecto de la interacción de unas con otras.

Después de construir el modelo, se activa (generando datos de entrada) para simular la operación actual del sistema y re-- registrar su comportamiento total. Repitiendo esto para las dife-- rentes configuraciones alternativas diseñadas y comparando sus-- funcionamientos, se pueden identificar las configuraciones más-- prometedoras. Debido al error estadístico, es imposible garanti-- zar que la configuración que obtenga el mejor funcionamiento si mulado sea desde luego la óptima, pero debe ser al menos casi - óptima si el experimento simulado fué diseñado apropiadamente.

En consecuencia, la simulación no es más que la técnica de realizar experimentos de muestreo sobre el modelo del sistema.-- Los experimentos se hacen sobre el modelo en lugar que sobre el sistema real debido a que esto último generalmente resulta in-- conveniente, costoso y consume mucho tiempo. De otra manera, -- los experimentos simulados deben verse como virtualmente indis-- tinguibles de los experimentos ordinarios estadísticos, por lo-- tanto deben basarse solidamente en la teoría estadística. No --

obstante que los experimentos simulados generalmente se ejecutan en computadoras digitales, esto se debe a la gran cantidad de cálculos requeridos.

La simulación es desde luego una herramienta muy versátil.

Sin embargo, no significa que sea la panacea. La simulación es una técnica imprecisa en forma inherente. Proporciona solamente estimaciones estadísticas en vez de resultados exactos, y solo compara alternativas en lugar de generar la óptima.

Además, la simulación es un medio lento y costoso de estudiar un problema. Generalmente requiere una gran cantidad de tiempo y costo para analizar y programar, además de un gran tiempo de computadora. Los modelos de simulación tienden a volverse difíciles de manejar, por lo que el número de casos que se pueden manejar y la exactitud de los resultados obtenidos generalmente resultan ser inadecuados. Finalmente la simulación obtiene solo datos numéricos acerca del funcionamiento del sistema de tal forma que no proporciona un conocimiento adicional en las relaciones "causa y efecto", dentro del sistema excepto para los indicios que pueden ser recogidos de los números (y del análisis requerido para construir el modelo de simulación). Por esta razón es muy costoso conducir un análisis de sensibilidad de los valores del parámetro considerado por el modelo. El único camino posible debe ser conducir nuevas series de corridas de simulación con diferentes valores del parámetro, el cuál

debe tender a proporcionar relativamente poca información a un costo relativamente grande.

A pesar de estas limitaciones, la simulación tiene un lugar indiscutible e importante en la teoría y práctica de la Investigación de Operaciones. Es una herramienta invaluable para aquellos problemas donde las mejores técnicas de análisis han fallado.

El Capítulo de Verificación de los resultados de Simulación, (Cap. 3) se ha incluido en el presente estudio debido a que, no existe mucha literatura sobre este tópico, que es sumamente importante ya que ayuda a resolver uno de los principales problemas a los que se enfrenta cuando se realiza un estudio de Simulación que es el de ¿Cuántos ciclos hay que Simular para obtener buenos resultados?.

CAPITULO II

APLICACION DE LA SIMULACION EN LA PROGRAMACION DE LA
 PRODUCCION EN UNA PLANTA QUIMICA.

II.1 El Problema

El propósito de este estudio es investigar un modelo con el cuál se determina un programa de producción para maximizar la ganancia y el efecto de varias políticas de inventario de seguridad. La planta descrita aquí se asemeja a una planta química en sus detalles esenciales.

La planta fabrica cinco productos, cada producto está sujeto a una distribución normal de demanda con media conocida. La planta tiene cuatro máquinas (1, 2, 3, y 4), cada una puede producir solo un producto a la vez, pero no todas son capaces de producir todos los productos. La velocidad de producción se indica por "Rik", y está dada en número de horas máquina necesarias para producir 10^3 kilos del producto "i" en la máquina "k". La tabla 1 contiene los valores de "Rik" y también muestra cuáles máquinas no pueden usarse para producir ciertos productos. Cada máquina tiene una capacidad de producción de 168 horas por semana.

El cambiar de un producto a otro en una máquina dada requiere un tiempo de preparación, como se muestra en la tabla 2; este tiempo "s" depende principalmente de cuál producto esta

TABLA 4
Costos de Operación

Máquina	CK Costo/hs.	Capacidad (hrs/sem.)
1	500	168
2	450	168
3	400	168
4	550	168

TABLA 5

Tres casos de Demanda Promedio \bar{D} (en miles)

Caso	Coeficiente de V.	Producto				
		1	2	3	4	5
A1	0.3	25.0	44.0	6.0	22.5	28.0
A2	0.5					
B1	0.3	31.0	55.0	7.0	28.0	35.0
B2	0.5					
C1	0.3					
C2	0.5	37.0	66.0	8.0	33.5	42.0

TABLA 1

Velocidades de Producción (hrs.(1000 Kgs.)Rik

Máquina.K	Producto i				
	1	2	3	4	5
1	6.28	4.21	4.95	-	-
2	3.02	-	-	3.31	-
3	-	4.95	-	-	3.29
4	6.02	5.05	4.95	6.28	4.90

TABLA 2

Tiempos de preparación (hrs.)

Máquina	Produc- to	De				
		1	2	3	4	5
1	a					
	1	0	3	24	-	-
	2	4	0	24	-	-
	3	6	5	0	-	-
2	1	0	-	-	3	-
	4	3	-	-	0	-
3	2	-	0	-	-	2
	5	-	3	-	-	0
4	1	0	4	25	3	5
	2	0	0	24	4	5
	3	5	6	0	5	4
	4	5	3	26	0	3
	5	3	5	25	4	0

TABLA 3

Precio de Venta/Kg.

Producto i	Precio Gi
1	23
2	27
3	26
4	21
5	25

siendo reemplazado y en menor grado sobre que máquina.

La tabla 3 muestra los precios de venta "G" para cada producto; la tabla 4 muestra los costos de operar "C" cada una de las máquinas durante una hora. Una investigación de los costos de los tiempos de preparación en esta planta dió como resultado que se puedan tomar como "sc", (donde "S" y "C" se dan en las tablas 2 y 4 respectivamente). El costo de la materia prima es "c" = 10 por Kg. para todos los productos.

La planeación se lleva a cabo por medio de programas semanales y la producción en cualquier semana está disponible para satisfacer la demanda en esa semana. Si la demanda excede al inventario disponible, las órdenes pendientes se registran como "demanda insatisfecha". La demanda insatisfecha no puede retrasarse; por ejem. una orden que no puede satisfacerse en la misma semana se pierde.

El tener inventario hace que se incurra en costos de llevarlos a la razón de 15%, de su valor por año.

Para estudiar el funcionamiento de los procedimientos de programación se toman, tres niveles de demanda promedio, como se muestra en la tabla 5:

A.- La demanda se encuentra a un nivel de 20% o menos que la capacidad disponible de la planta.

B.- La demanda es aproximadamente igual a la capacidad de la planta.

siendo reemplazado y en menor grado sobre que máquina.

La tabla 3 muestra los precios de venta "G" para cada producto; la tabla 4 muestra los costos de operar "C" cada una de las máquinas durante una hora. Una investigación de los costos de los tiempos de preparación en esta planta dió como resultado que se puedan tomar como "sC", (donde "S" y "C" se dan en las tablas 2 y 4 respectivamente). El costo de la materia prima es "c" = 10 por Kg. para todos los productos.

La planeación se lleva a cabo por medio de programas semanales y la producción en cualquier semana está disponible para satisfacer la demanda en esa semana. Si la demanda excede al inventario disponible, las órdenes pendientes se registran como "demanda insatisfecha". La demanda insatisfecha no puede retrasarse; por ejem. una orden que no puede satisfacerse en la misma semana se pierde.

El tener inventario hace que se incurra en costos de llevarlos a la razón de 15%, de su valor por año.

Para estudiar el funcionamiento de los procedimientos de programación se toman, tres niveles de demanda promedio, como se muestra en la tabla 5:

A.- La demanda se encuentra a un nivel de 20% o menos que la capacidad disponible de la planta.

B.- La demanda es aproximadamente igual a la capacidad de la planta.

C.- La demanda excede a la capacidad de la planta en un 20%.

La demanda de cada producto sigue una distribución normal y para cada nivel se consideran dos casos.

1.- El coeficiente de variación "v" (razón de la desviación estándar σ a la demanda promedio \bar{D}) = 0.3.

2.- El coeficiente de variación $v = 0.5$

En el caso 1, debe esperarse que el 98 % de los datos de demanda caiga entre 0.4 y 1.6 veces la media, mientras que en el caso 2 se espera que caiga dentro de "cero" y dos veces la media.

Una comparación de los resultados para los dos casos debe servir para indicar el efecto de la variabilidad de la demanda sobre el funcionamiento del sistema.

El procedimiento utilizado para encontrar el pronóstico de la demanda para cada producto se hace mediante la generación de números al azar que siguen una determinada distribución de probabilidad ya sea discreta o continua, para el caso presente se utilizó una subrutina que genera números al azar que siguen una distribución normal, esta subrutina tiene como primer número al azar el 0.98719, y ha sido probada con buenos resultados en lo que respecta a los ciclos.

No se piensa que este procedimiento de pronóstico sea el más apropiado para este caso, pero los términos del estudio han requerido que dicho procedimiento sea empleado en la investigación.

Se consideran dos políticas alternativas para el inventario de seguridad q_0 , así que puede investigarse, el efecto del inventario de seguridad sobre el funcionamiento del sistema.

1.- Inventario de seguridad No planeado, $q_0 = 0$

2.- $q_0 = 0.1$ de la demanda promedio semanal para cada producto.

II.2 Variables y Ecuaciones del Método

1.- Si programamos X_{ik} horas para el producto "i" que es fabricado en la máquina "k" en cualquier semana dada y si el tiempo de preparación no se considera aún, entonces la cantidad producida (en 10^3 Kgs.) es X_{ik}/R_{ik}

el costo de los materiales es CX_{ik}/R_{ik}

las ventas son $G_i X_{ik}/R_{ik}$

el costo de la producción es $C_k X_{ik}$

(1) y la ganancia es $Z_{ik} = X_{ik} \left[10^3 (G_i - c)/R_{ik} - C_k \right]$

2.- Se formula un modelo de programación lineal para resolver el siguiente problema de asignación: Encontrar los valores de X_{ik} que maximicen la función ganancia.

$$(2) \quad Z = \sum_i \sum_k Z_{ik}$$

sujeta a las restricciones.

$$(3) \text{ de demanda: } \sum_k X_{ik}/R_{ik} \leq a_i$$

por ejem. la cantidad total producida de producto "i" no debe exceder la necesidad " a_i " para el producto "i" en la semana pa-

ra la cuál se construye el programa, (puesto que Z es una función que se va a maximizar), y

$$(4) \text{ de capacidad: } \sum x_{ik} \leq 168$$

por ejem. el tiempo total programado para la máquina "k" no debe exceder a 168 horas;

3.- Estas restricciones de capacidad no toman en cuenta el tiempo de preparación. La primera solución al problema de programación lineal muestra cuales productos deben producirse en cada máquina y estos productos se arreglan luego en una secuencia que minimice el tiempo total de preparación, y finalmente este tiempo se deduce, de 168 horas, para producir las nuevas restricciones de capacidad las cuales deben especificarse en la ecuación (4). El problema de programación lineal puede entonces resolverse para proveer una nueva asignación de productos a máquinas.

Al cambiar de un programa de una semana a la próxima, es posible ahorrar tiempo en el tiempo de preparación haciendo reversible la secuencia de productos en el programa. Este ahorro es importante cuando la demanda es igual a o excede la capacidad total de la planta. Si por ejemplo, los productos 1 y 4 se asignan a la máquina 1, entonces en una semana se producen en la secuencia 1 - 4 y en la próxima semana la secuencia se vuelve 4 - 1, así que no se incurre en tiempo de preparación al final de la primera semana y se necesita deducir solo un cambio -

de la capacidad semanal para definir la restricción apropiada en la ecuación, (4).

II.3 Método de Programación

Cuando se considera un solo producto y tomando en cuenta que la demanda es constante, la cantidad óptima para la producción (costo mínimo por unidad) puede calcularse por la fórmula.

$$(5) \quad Q = \sqrt{\frac{s}{k}}$$

donde s = los costos de los cambios (setup) para la mezcla.

k = factor de costos de llevar el inventario = $I(I + \gamma)/2a$

a = demanda/ semana

I = carga de interés / semana; en nuestro ejemplo ningún otro costo de almacenaje ocurre y las cargas de intereses se calculan como (costos de procedimiento costos de los materiales) veces del interés semanal.

γ = razón de demanda a producción.

Este método obtendrá las cantidades óptimas cuando cada producto se considere como uno solo, pero no toma en cuenta el problema de programación, produciendo con esto el que si se programan estas cantidades ciclicamente en una secuencia de producción, algunos productos tendrán inventario excesivo mientras que a otros les faltará.

Para resolver el problema de programación se sugiere un procedimiento de optimización para varios productos, para el ca

so donde se programan "n" productos para producirse en una máquina. El método intenta optimizar la ganancia para el ciclo -- completo de producción. Los productos se arreglan en alguna secuencia arbitraria y el tamaño óptimo para el primer producto -- se encuentra por,

$$(6) \quad Q_i = \sqrt{\frac{\sum_1^n S_i}{\sum_1^n K_i} \alpha_i^2}$$

donde $\alpha_i = a_i/a_1$, (relación de la demanda del producto "i" a la -- del producto 1). y la cantidad óptima para el producto "i" es --

$Q_i = \alpha_i Q_1$. El ciclo de producción "T" se obtiene por $T = Q_i/a_i$, así que cuando el ciclo se completa se termina y comienza un -- nuevo ciclo con la producción de ese producto, la secuencia de -- productos durante el ciclo permanece sin variar.

¿Que nos asegura que el ciclo de producción T es compati-- ble con la capacidad de producción?. El ciclo tiene que cubrir-- todas las corridas de producción para los "n" productos así co-- mo los tiempos per cambios requeridos. Si T es muy grande, sig-- nifica que se debe aumentar la velocidad de producción o dismi-- nuir el número de productos en el programa; si T es pequeña, se incurre en tiempo ocioso.

Este modelo para programar varios productos está de acuer-- do con el caso de una sola máquina; también es básicamente un -- modelo dinámico en el cuál se considera a la demanda variable.

Para aplicar el modelo a nuestro problema debemos primero--

asignar los productos a las máquinas disponibles, antes de proceder con el cálculo del programa para cada máquina, y segundo, debe estipularse al final de cada ciclo la longitud del ciclo - de nuevo (que tome en cuenta el último dato disponible de deman da).

A continuación se describe, el procedimiento;

1.- La demanda promedio para cualquier producto en un pe-- ríodo de "n" semanas se calcula por medio de la subrutina generadora de números al azar que siguen una distribución normal.

2.- Se obtiene una asignación inicial de productos a máqui-- nas para resolver el problema de asignación definido por las -- ecuaciones (2), (3) y (4). Esta solución inicial solo especifica cuales productos deben ser producidos en cada máquina y sir-- ve para convertir el problema de varias máquinas a varios pro-- blemas de una máquina. También indica si tenemos capacidad dis-- ponible o alternativamente cuales productos no pueden ser abas-- tecidos debido a una falta de capacidad de producción.

3.- Ahora consideremos cada máquina en si. Si a una máqui-- na se le asignan varios productos, las cantidades de cada pro-- ducto se encuentran por la ecuación (6) y el tiempo total de -- producción de la máquina es entonces.

$$T = \sum Q_i \cdot R_i$$

Si el tiempo T excede la capacidad disponible, entonces la demanda para todos los productos no puede satisfacerse y se les

dá preferencia a los productos con mayores márgenes de contribución (el margen de contribución por hora - máquina, se calcula por la ecuación (1)). Las restricciones de capacidad y la secuencia de productos en el ciclo se manejan en forma similar a la descrita en la sección 2.3, para el método.

4.- Con la solución al programa de varios productos se obtiene el tiempo del ciclo para cada máquina; el programa para el ciclo especifica los productos que se deben producir en la máquina así como las longitudes de las corridas de producción para cada producto.

CAPITULO III

VERIFICACION DE LOS RESULTADOS DE SIMULACION.

III.1.- Naturaleza del Problema

Con la introducción de variables estocásticas en una simulación, las variables utilizadas para medir el funcionamiento del sistema se vuelven aleatorias.

Debe considerarse el problema del nivel de significancia de los resultados. Los valores medidos no son más que una muestra, y deben usarse para estimar los parámetros de la distribución de la cuál fueron extraídos.

Un estudio de simulación generalmente se planea como una serie de corridas dirigidas a comparar un número de sistemas alternativos o condiciones de operación. Para aclarar la discusión, el término "experimento" se usará para probar un conjunto de condiciones. El término "corrida de simulación" significará una ejecución de una configuración experimental. Una "observación" será una medida particular de una variable del sistema. Un experimento es el conjunto de todas las corridas con una configuración -- del sistema y el estudio es el conjunto de todos los experimentos.

Los problemas estadísticos asociados con un estudio de simulación han sido convenientemente clasificados por Conway (2) en dos clases fundamentales:

(a).- Problemas de planeación Estratégica, concerniente con el diseño de un conjunto de experimentos.

(b).- Problemas de Planeación Táctica, concerniente específicamente con la manera en que debe conducirse cada experimento.

La planeación estratégica debe determinar las medidas, por medio de las cuales se juzga el sistema y la manera de probar el significado de diferencia en esas medidas. La planeación táctica debe decidir de que manera se toman las medidas en cada corrida y cuantas corridas deben hacerse para cada experimento.

El problema de planeación estratégica no se discutirá aquí, puesto que este es un problema, en su mayor parte, independiente de técnicas de simulación.

Existe gran cantidad de literatura sobre "Diseño de Experimentos". En particular Burdick y Naylor (1) han revisado los métodos disponibles en el caso de estudios de simulación y dan un conjunto de referencias disponibles para estos trabajos. Se han desarrollado específicamente unos cuantos métodos para aplicación a experimentos de simulación, y muchos de los métodos clásicos no son particularmente adecuados para este propósito, porque consideran la existencia de datos independientes sobre los cuales se basen las pruebas estadísticas. Como se verá, los datos de simulación con frecuencia no cumplen con esta condición.

Sin embargo se ha discutido por Conway (2) y Naylor (10) algo de los métodos más recientemente desarrollados, tales como el "Análisis Secuencial", y los "Métodos de Orden", que tienen muchas posibilidades de éxito en aplicaciones de simulación.

III.2.- Métodos de Estimación

Antes de discutir el problema de planeación táctica en el contexto de corridas de simulación, revisaremos algo de los métodos estadísticos comunmente usados para estimar parámetros de observaciones sobre variables aleatorias. Normalmente, una varia-

ble aleatoria X_i se extrae de una población que tiene una distribución de probabilidad estacionaria con media finita μ y varianza σ^2 . Si se hacen "n" observaciones independientes de la variable, la medida de la muestra $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ es también una variable aleatoria. El teorema del Límite central establece que la distribución de \bar{X} tiende a una distribución normal con media μ y varianza σ^2/n y la cantidad, $Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}}$

está aproximadamente distribuida en forma normal, con media "cero" y una varianza de 1.

Esta distribución, es la normal estándar. La integral de la distribución desde $-\infty$ a un valor " μ " es la probabilidad de que Z sea menor o igual a μ . La integral se denota generalmente por $\Phi(\mu)$ y se tienen disponibles tablas de este valor. Suponiendo que el valor de " μ " se escoga de tal forma que $\Phi(\mu) = 1 - \alpha/2$, donde $\alpha/2$ es una constante menor que 1, y denotando este valor de " μ " por $\mu\alpha/2$, la probabilidad de que Z sea mayor que $\mu\alpha/2$ es entonces $\alpha/2$.

La distribución normal es simétrica respecto a su media, así que la probabilidad de que Z sea menor que $-\mu\alpha/2$ es también $\alpha/2$. Consecuentemente, la probabilidad de que Z caiga entre $-\mu\alpha/2$ y $\mu\alpha/2$ es $1 - \alpha$.

Esto es,

$$\text{Prob.} \left\{ -\mu\alpha/2 \leq Z \leq \mu\alpha/2 \right\} = 1 - \alpha$$

En términos de la media de la muestra, este postulado de Probabilidad puede escribirse,

$$\text{Prob.} \left\{ \bar{x} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \mu\alpha/2 \leq \mu \leq \bar{x} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \mu\alpha/2 \right\} = 1 - \alpha$$

La constante $1 - \alpha$ (usualmente expresada como un porcentaje) es el nivel de confianza y el intervalo.

$$\bar{x} \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \mu_{\alpha/2}$$

es el intervalo de confianza. La medida del intervalo de confianza depende del nivel de confianza escogido. Típicamente, el nivel de confianza puede ser 90% en tal caso $\mu_{\alpha/2}$ es 1.65. Del postulado se obtiene que μ estará dentro del intervalo de confianza $\bar{x} \pm 1.65 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ con probabilidad 0.9; significando que si el experimento se repite muchas veces, puede esperarse que la media caiga dentro del intervalo de confianza en un 90% de las repeticiones.

En la práctica, generalmente no se conoce la variancia de la población; en tal caso se reemplaza por una estimación calculada con la fórmula,

$$(7) \quad S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

La variable aleatoria normalizada Z basada en la estimación de σ^2 no está, distribuida de acuerdo a la distribución normal estándar; en lugar de ella tiene una distribución "t de Student". La cantidad $\mu_{\alpha/2}$ usada en la definición de un intervalo de confianza debe entonces derivarse de la integral de la distribución t de Student.

La desviación entre las dos distribuciones disminuye conforme "n" aumenta, y para una "n" suficientemente grande (≤ 30) puede usarse la distribución normal.

Expresando el intervalo de confianza para μ en términos del valor estimado de la variancia de la población,

$$\bar{x} \pm \frac{S}{\sqrt{n}} \mu_{\alpha/2}$$

donde $\mu_{\alpha/2}$ está basada en la "Distribución t de Student" cuando "n" es pequeña, y sobre la distribución normal cuando "n" es grande.

III.3.-Estadísticas de la corrida de simulación.

El método de establecer un "intervalo de confianza" descrito en la sección anterior estaba basado en dos consideraciones.

La distribución de la cuál, se extrajeron las observaciones era estable, y además las observaciones eran independientes. Desafortunadamente, muchas estadísticas de interés en una simulación no cumplen estas condiciones.

Para ilustrar los problemas que se tienen al medir estadísticas de corridas de simulación, se discutirá un ejemplo específico.

Considerese un sistema de una sola estación de servicio en el cuál las llegadas ocurren de acuerdo a una distribución Poisson y el tiempo de servicio tiene una distribución exponencial. La disciplina de la cola, es el que llega primero, sale primero sin prioridad. Suponiendo que el objetivo del estudio es medir el tiempo promedio de espera, definido como el tiempo que espera una unidad, hasta recibir servicio (excluyendo el tiempo que dura recibiendo servicio), el problema se puede resolver analíticamente.

En una corrida de simulación, lo más sencillo es estimar el tiempo promedio de espera, acumulado el tiempo de espera de "n" unidades secuenciales y dividiendo por n.

Esta medida se llamará el "Promedio de la Muestra" y se reconocerá como $\bar{X}(n)$, para enfatizar el hecho de que este valor depende del número de observaciones tomadas. Si X_i ($i=1, 2, \dots, n$) son los tiempos individuales de espera (incluyendo el valor "cero" para aquellas unidades que no tengan que esperar) entonces,

$$(8) \quad \bar{X}(n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Los tiempos de espera medidos de esta forma no son independientes. Siempre que se forme una cola, el tiempo de espera de cada unidad en la cola depende de los tiempos de espera de sus predecesores. Cualquier serie de datos que tenga la propiedad de tener un valor que afecta a otros valores se dice que está autocorrelacionada.

El grado de "autocorrelación" de los datos, se puede medir en diferentes formas, las cuales serán discutidas brevemente en las secciones, 3.6 y 3.7. En el problema particular discutido, la "autocorrelación" aumenta rápidamente si se incrementa la utilización de servicio de la instalación.

Bajo condiciones generales, normalmente puede esperarse tener lo anterior en una corrida de simulación. Se puede demostrar que el promedio de la muestra de datos autocorrelacionados, se aproxima a una distribución normal, conforme el tamaño de la muestra aumenta. La fórmula usual para estimar el valor promedio de la distribución, es (8), da un estimado satisfactorio para la "media" de datos autocorrelacionados. Sin embargo, la variancia de los datos autocorrelacionados no se relaciona como la variancia de la población por la simple expresión σ^2/n , como ocurre

re para datos independientes. Se debe agregar un término para el caso de autocorrelación. El término es positivo en situaciones que normalmente ocurre en un experimento de simulación de tal forma que si se ignora, la variancia se subestima y se calcula un intervalo de confianza excesivo y demasiado optimista.

Otro problema que debe encararse es que las distribuciones pueden no ser estables. En particular, una corrida de simulación se comienza cuando el sistema se encuentra en algún estado inicial, frecuentemente el "estado vacío", en el cuál no se da servicio y no hay unidades que estén esperando. Las primeras llegadas tienen una probabilidad normal mayor de obtener servicio rápidamente, de tal forma que la media de la muestra que incluye las primeras llegadas estará "sesgada". Conforme la longitud de la corrida de simulación se extiende y el tamaño de la muestra aumenta, el efecto del "sesgo" se extingue. Para un tamaño de la muestra, dado y comenzando con una condición inicial dada, la distribución de la media de la muestra es estable; pero si las distribuciones pueden ser comparadas para diferentes tamaños de la muestra deben ser ligeramente diferentes. Las soluciones analíticas previamente citadas son para valores en "estado estable" para las cuales las distribuciones convergen conforme el tamaño de la muestra aumenta.

Para ilustrar estos problemas, la Fig. 1 muestra los resultados de medir el tiempo promedio de espera de la muestra, para el sistema de una sola estación de servicio. Se muestran resultados de 3 corridas, cada uno para el caso en que la utilización del sistema es 0.3.

Tiempo Promedio de Espera
 Tiempo Promedio de Servicio

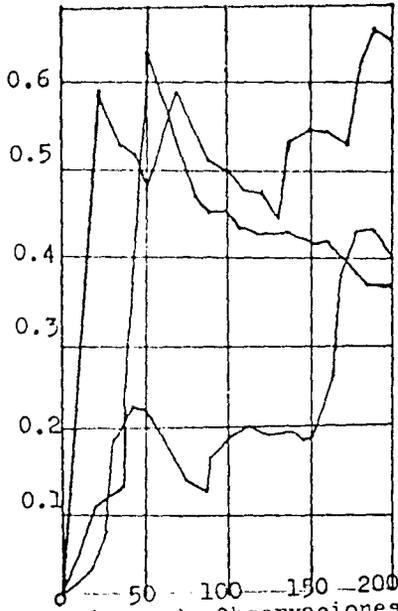


Fig. 1.- Variabilidad de los resultados de la Simulación.

Tiempo Promedio de Espera
 Tiempo Promedio de Servicio

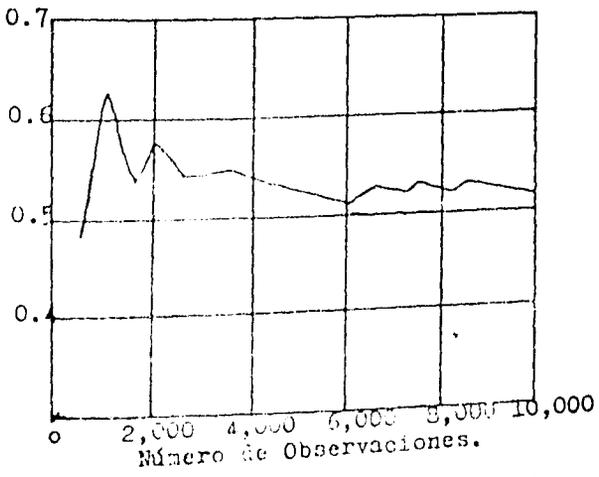


Fig. 2.- Estabilización del tiempo promedio de espera acumulado.

las corridas difieren solo en el hecho de que, se usaron diferentes números aleatorios. Las observaciones se hicieron cada vez que la 10a. unidad fué servida (es decir cada 10 unidades servidas). Se muestra la relación del tiempo promedio de espera al tiempo de servicio; en este caso la razón debe ser 0.5. La variabilidad del promedio de la muestra aparece inmediatamente y también es evidente el "sesgo" inicial causado debido a que el sistema comenzó en "estado vacío". La media de la muestra será tomada como un valor constante porque es una estadística acumulada. La Fig. 2, por ejemplo, muestra los resultados para el mismo experimento conducido para 10,000 unidades con muestras a cada 500.

De la misma manera aquí, se pueden ver fluctuaciones significativas después de que muchas unidades han sido medidas. El hecho de que la media de la muestra acumulada tiene a un "estado estable" no significa por supuesto que el tiempo de espera tienda a un "valor constante".

Los tiempos de espera continuarán, para mostrar su variabilidad inherente sin importar cuantos sean pero, con la acumulación de observaciones, las variaciones de la media de la muestra se equilibrarán.

III.4.- Repetición de Corridas.

La Fig. 1 sugiere una forma de derivar una medida de la variancia de la "media de la muestra". Repitiendo el experimento con diferentes números aleatorios para el mismo tamaño de la muestra "n" da un conjunto de determinaciones independientes de la media de la muestra $\bar{X}(n)$.

Igualmente se piensa que la distribución de la media de la

muestra depende del grado de autocorrelación, estas determinaciones independientes de la media de la muestra pueden usarse apropiadamente para estimar la variancia de la distribución. Suponiendo que el experimento se repite "p" veces con series de números aleatorios independientes, siendo X_{ij} la observación "i" en la corrida "j", y siendo el valor de la media de la muestra para la corrida "j" $\bar{X}_j(n)$. Entonces el estimado del tiempo promedio de espera y su variancia son,

$$m(n) = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \bar{X}_j(n) = \frac{1}{np} \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n X_{ij} \quad (9)$$

$$s^2(n) = \frac{1}{p-1} \sum_{j=1}^p [X_j(n) - m(n)]^2 \quad (10)$$

Las dos estimaciones pueden usarse para establecer un intervalo de confianza.

La Fig. 3, muestra el resultado de aplicar el procedimiento para el sistema de una sola estación de servicio. Se muestran -- los resultados para utilizaciones de 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 y 0.6.

En cada caso, el experimento se ha repetido desde un estado inicial de ocio, y se han utilizado diferentes números aleatorios en cada repetición. Los resultados muestran el tiempo promedio de espera estimado, calculado con la ecuación (9) como una -- función del tamaño de la muestra, "n".

Se tomaron medidas para distintos casos para $n=5$, $\rho = 0.2 - 0.3$, y 0.4 y $n=10$ para $\rho = 0.5$ y 0.6 . Cada caso es de 100 repeticiones ($p=100$). También se muestran los intervalos con un 90% de confianza calculados para el valor más grande de "n" usado en cada caso, y los verdaderos valores de los tiempos promedio de -- espera. Se notará que los valores reales en todos los casos, de

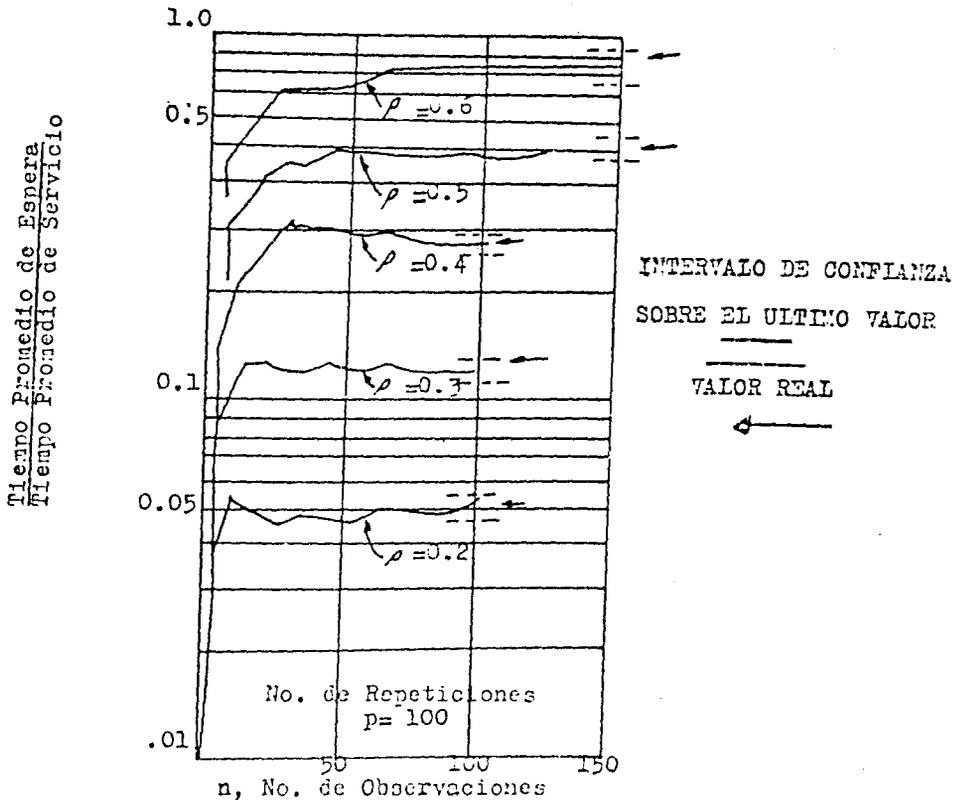


Fig. 3.- Tiempo promedio de espera acumulado para el sistema, comenzando en el estado vacio.

hecho caen dentro de los intervalos de confianza.

La media sobre la cuál está basado el intervalo de confianza, depende de \sqrt{np} . En la ausencia de sesgo inicial, se puede esperar que un mismo aumento proporcional ya sea en "n" o "p", - tenga efectos equivalentes sobre el tamaño del intervalo de confianza. Puede esperarse también que gasten aproximadamente el mismo tiempo de computadora para su ejecución. Sin embargo, es preferible aumentar la probabilidad de reducir el sesgo inicial hasta un punto donde se pueda considerar despreciable, a extender las corridas, manteniendo el número de repeticiones a un nivel en el cuál el tamaño de la muestra sea suficientemente grande para justificar la aproximación a una distribución normal. Para un volumen de cálculos dados, el tamaño de la corrida puede entonces maximizarse, reduciendo el efecto del sesgo inicial a un mínimo.

Los criterios para hacer tales preferencias se discuten más ampliamente en la referencia (6).

III.5.- Eliminación del Sesgo Inicial.

Los resultados de la Fig. 3 claramente muestran los efectos del sesgo inicial. El hecho de que los valores reales caigan dentro de los intervalos de confianza estimados, indica que las corridas fueron lo suficientemente grandes como para hacer al sesgo inicial despreciable. Los resultados teóricos usados para establecer este hecho, se están generalmente disponibles. Se pueden tomar dos aproximaciones generales para reducir el efecto del sesgo inicial. El sistema puede comenzar en la condición inicial más representativa o se puede ignorar la primera parte de cada corrida de simulación.

En algunos estudios de simulación, particularmente de sistemas existentes, puede haber información disponible sobre las condiciones esperadas que haga factible seleccionar condiciones iniciales mejores que el "estado vacío". Sin embargo, debe utilizarse un rango de valores para las condiciones iniciales, para poder escoger un estado inicial diferente en cada repetición. Usar la misma condición inicial para cada corrida puede reducir el sesgo sacando una condición inicial no-usual, pero dejará --- algún grado de correlación entre las corridas. Desgraciadamente, este enfoque requiere un gran conocimiento sobre el funcionamiento del sistema antes de comenzar la simulación. Hay casos donde puede utilizarse este enfoque. Además es posible usarlo para revisar la exactitud de una simulación por reiteración.

Teniendo resultados derivados por un método u otro, las condiciones predichas por ellos pueden usarse para indicar condiciones iniciales razonables.

Si los resultados originales son realmente independientes - del sesgo inicial, la repetición de alguna de las corridas con - las nuevas condiciones iniciales no debe producir diferencias -- significativas.

El método más común para eliminar el sesgo inicial es eliminar una sección de la corrida inicial.

La corrida se comienza en "estado vacío" y se detiene después de un cierto período de tiempo. Las unidades que existen en el sistema en ese momento se dejan como están.

Entonces se vuelve a empezar la corrida y las estadísticas se obtienen desde el punto de reinicio. Como algo práctico, es usual programar la simulación de tal forma que las estadísticas-

se obtengan desde el comienzo, y simplemente eliminar las estadísticas obtenidas desde el punto de reinicio. No hay reglas sencillas para decidir que tanto de un intervalo debe ser eliminado. Es conveniente usar algunas corridas piloto comenzando desde el "estado vacío" para juzgar que tanto permanece el sesgo inicial. Esto se puede hacer graficando la estadística medida, contra la longitud de la corrida como se hizo en la Fig. 3.

Se desea que la investigación piloto se haga repitiendo corridas como se hizo en la Fig. 3. Un examen de las tres corridas individuales de la Fig. 1, demostrará que es difícil juzgar a partir de una sola corrida, cuando el valor medido ha alcanzado su estado estable. Con un poco más de cálculo se puede examinar la presencia del sesgo inicial, estudiando con el comportamiento de la desviación estándar. En la ausencia de sesgo inicial la desviación estándar puede esperarse que sea inversamente proporcional a $(n^{1/2})$.

Examinando la manera en que cambia la desviación estándar con el tamaño de la muestra, es posible ver si se puede tener una relación. Por ejemplo, la Fig. 4, muestra la desviación estándar obtenida en el momento en que se derivaron los resultados de la Fig. 3.

El logaritmo de la desviación estándar, derivado de la ecuación (10), se grafica contra el logaritmo de "n".

El resultado debe aproximarse a una línea recta cuya pendiente es hacia abajo con una velocidad de 1 en n para ejes con una igual escala. Se puede ver que las curvas inicialmente aumentan pero eventualmente declinan como es de esperarse.

Juzgando por los resultados de la Fig. (4), deben esperarse--

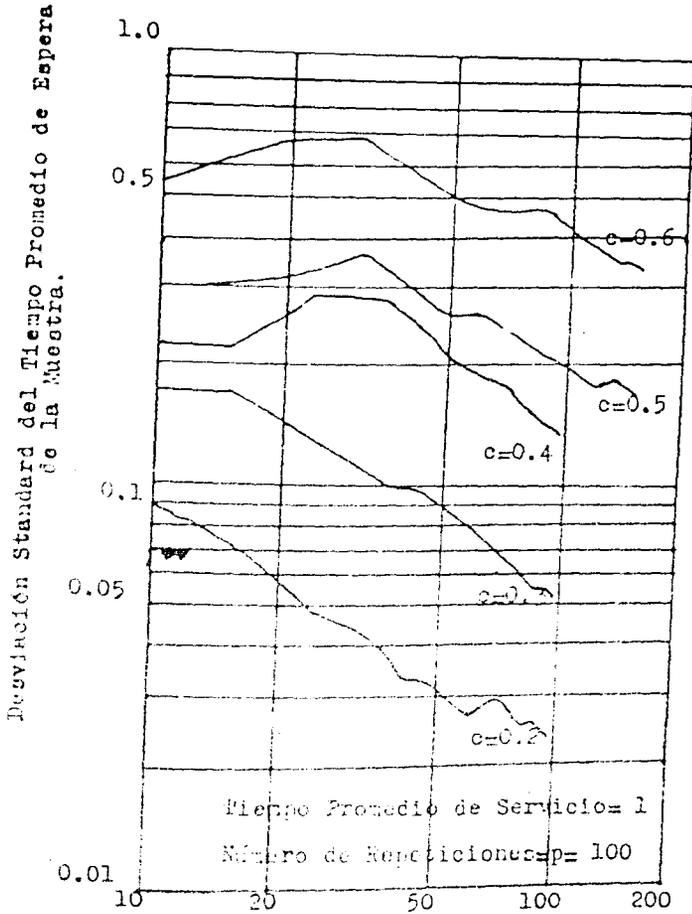


Fig. 4.- Variación de la Desviación Standard con el Tamaño de la Muestra, comenzando en el estado vacío.

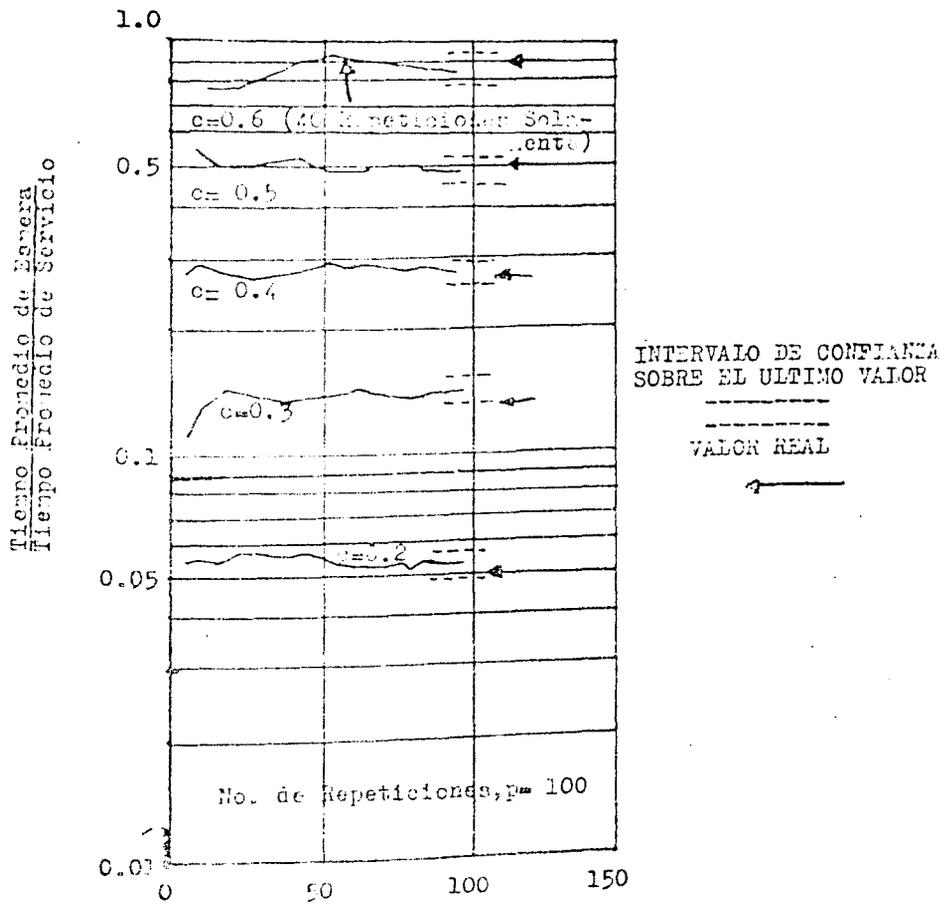


Fig. 5.- Tiempo Promedio de Espera Acumulado
Para el Sistema, con periodo Inicial Elimina-
do.

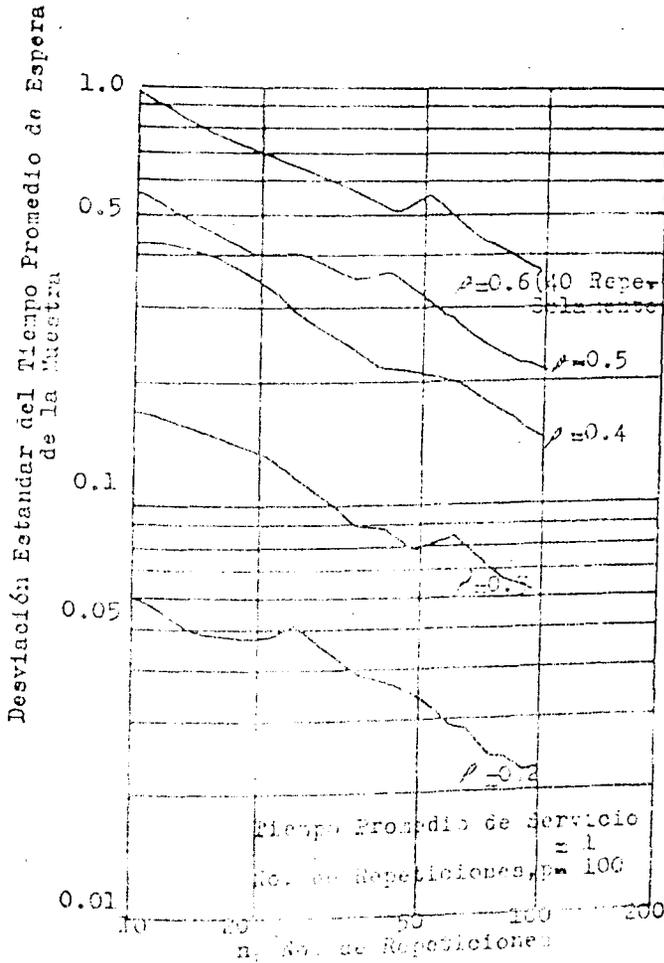


Fig. 6.- Variación de la Desviación Estándar con el tamaño de la muestra, con periodo inicial Eliminado.

se deducciones razonables para un período inicial:

Utilización	Punto de Paro
0.2	7
0.3	14
0.4	30
0.5	60
0.6	120

Los valores escogidos son probablemente conservadores porque son estadísticas acumuladas. Usando los valores anteriores para un período inicial de paro, se obtienen en las Figs. 5 y 6, que muestran los resultados de repetir los experimentos de las Figs. 3 y 4.

III.6.- Mezcla de Medias.

Otro procedimiento para abordar el problema de estimar la -- precisión de los resultados de simulación no se basa en la repetición, sino que utiliza una sola longitud de corrida, preferiblemente aquella con la cuál el sesgo inicial se elimina.

La corrida se divide en un número de segmentos del mismo tamaño. Se toma media de cada segmento y se observan las medias individuales de la mezcla como observaciones independientes. El valor estimado de la variable que es medida, es la media de la mezcla de medias. Ésta por supuesto, es exactamente, la media de todas las observaciones.

Sin embargo, la consideración de que la mezcla de medias es independiente, junto con la aplicación del teorema de límite central, permite a las observaciones de la media de la mezcla, ser tratada como normalmente distribuida.

La fórmula usual puede entonces aplicarse para estimar la -- variación de la media y así calcular el intervalo de confianza.

El método no puede aplicarse a una estadística acumulada, tal como el tiempo promedio de espera acumulado, discutido en la sección anterior, debido a que la distribución de la media, de la muestra depende de la longitud de la corrida y las medias de la mezcla sucesivas no pueden tratarse como observaciones de la misma población. Típicamente el método puede usarse para medir la longitud de la cola donde el experimento es conducido por muestreo de la longitud de la cola a intervalos uniformes de tiempo, de tal forma, que cada observación es una medida individual de la misma variable aleatoria.

Una corrida completa consiste de N observaciones las cuales se separan en " p " mezclas de medida " n ", así que $N = np$. (Se considera que N es exactamente divisible por " p "). En efecto, el experimento es equivalente a repetir un experimento de longitud " n " un número total de " p " veces, con el estado final de una corrida que se vuelve el estado inicial de la siguiente corrida.

Esta forma de repetir una corrida es preferible a comenzar cada corrida desde un "estado vacío", puesto que el estado al final de una corrida es un estado inicial más razonable que el estado vacío. Sin embargo la conexión entre las mezclas presenta correlación. Algunas veces, las mezclas son separadas por intervalos en los cuales las medidas no se toman en cuenta para poder eliminar la correlación. En claramente, esto elimina la información útil.

Conway (2) demuestra que la variancia que se espera usar para todos los datos y que acepta la correlación entre mezclas, es menor que la obtenida de una cantidad reducida de datos que

se obtiene al separar las mezclas. Se ve que es preferible, por esta razón trabajar con mezclas contiguas.

El método de la mezcla promedio tiene la ventaja de la repetición del método sin la necesidad de eliminar el sesgo inicial en cada repetición. Sin embargo es necesario considerar que las mezclas promedio individuales son independientes. Esta consideración puede justificarse si la longitud de la mezcla es suficientemente grande. El efecto de autocorrelación se presenta cuando el valor de un dato afecta el valor del siguiente.

El efecto disminuye a medida que la separación entre los datos aumenta y más allá de algún intervalo cuyo tamaño sea razonable se puede ignorar. Si el tamaño de la mezcla es mayor que este intervalo, la mezcla promedio puede tratarse como independiente. Todavía resta el como escoger el tamaño apropiado de la mezcla. Puede especularse razonablemente que el intervalo sobre el cuál se mide la mezcla, debe ser al menos tan grande como el intervalo excluido desde el principio de una corrida para eliminar el sesgo inicial. Si ese valor se ha determinado, puede usarse como una medida de la mezcla. Sin embargo, el único procedimiento seguro es hacer una corrida de prueba en la cuál se intenta una medida de la mezcla -- probar la presencia de correlación en los resultados -- otra forma de repetir los cálculos con varias medidas de la mezcla y probar la consistencia de los resultados. Haciendo múltiples corridas de cada uno de los tamaños de la mezcla es posible llevar a cabo la operación en una sola corrida.

Al discutir el método repetitivo, se puntualizó que hay una relación entre el número de repeticiones y la longitud de la corrida. En la medida que la mezcla hay una relación similar-

entre el tamaño de la mezcla y el número de mezclas.

Puesto que el número de mezclas corresponde al número de muestra de una distribución normal considerada, es conveniente de nuevo mantener este número en un límite razonable para tener dicha relación y maximizar el tamaño de la mezcla, para poder reducir la correlación entre ellas.

Un aspecto práctico importante del método de la mezcla, es que no implica la presencia simultánea de todos los datos para realizar los cálculos. Las mezclas promedio pueden calcularse a medida que la corrida de simulación avanza. Solo se requiere memoria de computadora para acumular la suma de las mezclas promedio y la suma de sus cuadrados, junto con una acumulación de los números que forman la mezcla promedio actual. Si se unen tamaños múltiples de la mezcla, es necesario un conjunto de 3 números para cada tamaño de la mezcla.

III.7.- Análisis de Autocorrelación.

El método más recientemente desarrollado para estimar la precisión de los resultados de la simulación es estimar la variancia de la media de la muestra, incluyendo efectos de autocorrelación, de los resultados derivados en el estudio de autocorrelación. El experimento de simulación se conduce como una sola corrida con el sesgo inicial eliminado. Sin embargo, las observaciones individuales se preservan y tratan, como los datos de una autocorrelación.

Por conveniencia hay que suponer que las observaciones se hacen a intervalos de tiempo unitario y se toman valores para un período de tiempo "T", así que hay T observaciones.

serie de coeficientes de

autocovariancia, los cuales muestran hasta donde se afectan uno a otros, los valores separados por un intervalo de τ unidades de tiempo. Los coeficientes son definidos por la fórmula:

$$R(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \sum_{t=1}^{T-\tau} (X_t - \bar{X})(X_{t+\tau} - \bar{X}) \quad (\tau=0, 1, 2, \dots, T-1)$$

donde X_t es la observación en el tiempo t y,

$$\bar{X} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T X_t$$

El caso particular de $\tau=0, R(0)$, es una estimación de la variancia σ^2 de la distribución de la cuál se obtiene X_t .

La estimación de la variancia de la media de la muestra de los coeficientes de autocovariancia, necesita algo de destreza computacional, pero una fórmula aceptable es (9):

$$V(\bar{X}) = \frac{1}{T} \left\{ R(0) + 2 \sum_{\tau=1}^M \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) R(\tau) \right\} \quad (11)$$

El primer término corresponde a la variancia de la población de la cuál se extrae X_t , y el término $R(0)/T$ estima la variancia de la media de la muestra que debe esperarse, si las observaciones fueran independientes. El término adicional representa la contribución de la autocorrelación.

Se notará que la ecuación (11), solo incluye los primeros M coeficientes de autocovariancia (excluyendo $R(0)$).

Normalmente los valores de los coeficientes disminuyen conforme τ aumenta. El valor de M debe ser lo suficientemente grande que incluya los coeficientes que son significativos, porque debido a que el tamaño de la corrida de simulación es finito,

M no puede aumentar indefinidamente sin pérdida de exactitud. El escoger un valor apropiado de M representa una decisión similar a la de escoger el tamaño de la mezcla.

El método escogido por Fishman (5), es realizar los cálculos para un número de valores diferentes de M . El producto $TV(\bar{X})$ debe ser independiente de M , y se puede encontrar un valor apropiado de M , observando que este producto no varíe significativamente con M . Una aplicación detallada de este método está dada en la referencia (4) en la cuál se estudia un caso con $\epsilon = 0.5$. Para esta utilización se encontró que M debe ser de un tamaño tal como 200 o 300.

A diferencia del método de repetir corridas o mezcla de medias, el análisis de autocorrelación requiere que una gran cantidad de datos sean preservados y analizados después de la corrida de simulación.

III.8.- Análisis Espectral.

El análisis de autocorrelación está íntimamente relacionado con otro punto de vista.

La autocorrelación puede verse como la suma de oscilaciones de diferentes frecuencias. Las frecuencias del espectro y las amplitudes de las oscilaciones pueden formalmente relacionarse a la autocorrelación (6). Esencialmente los mismos cálculos necesarios en la estimación de autocorrelación pueden aplicarse para realizar un análisis espectral de una corrida de simulación. Los generadores se pueden usar para probar la precisión de una medida por parte del cálculo de las varianzas de la media de la muestra. (5)

Un análisis espectral, sin embargo puede proveer más información que la que está contenida en el estimado de un valor promedio.

Comparar dos sistemas sobre la base de valores promedio de

factores tales como el tiempo de espera o longitud de la cola - es una comparación bastante incorrecta.

Dos sistemas pueden no mostrar diferencias significativas - en sus valores promedio, pero su comportamiento, transiente puede ser significativamente diferente. Un sistema puede responder lentamente a desviaciones de sus valores promedio mientras que otro puede responder rápidamente.

Dependiendo del propósito del sistema, un funcionamiento - puede ser preferible al otro. Una simple comparación de medias - disimula la diferencia, pero un análisis espectral puede distinguir la diferencia si el espectro muestra frecuencias altas - o bajas.

La técnica de ejecutar un análisis espectral sobre corridas - de simulación y la prueba de diferencias significativas se discuten en la referencia (5). Como en el caso del cálculo de autocorrelación, hay varios problemas, en la aplicación de métodos - numéricos computacionales, y debe guardarse una gran cantidad -- de datos para hacer el análisis.

El conocimiento del comportamiento de un sistema que se obtiene es muy significativo.

Resultados para el Caso A₁Capacidad excede a la demanda $v = 0.3$ Demanda Total = 1.0×10^6

	Producto				
	1	2	3	4	5
Demanda Promedio $\times 10^4$	24.1	44.9	6.0	22.1	28.6

Política de Inventario de Seguridad	1	2
Máquinas Trabajando hrs./semana	474.0	474.2
Tiempo de Preparación hrs./semana	26.2	26.2
Tiempo Ocioso hrs./semana	171.6	171.4
Venta Perdida Total $\times 10^3$	0	0
Ganancia Total $\times 10^6$	12.82	12.81

Resultados para el Caso A₂Capacidad excede a la demanda $v = 0.5$ Demanda Total = 1.000×10^6

	Producto				
	1	2	3	4	5
Demanda Promedio $\times 10^3$	24.9	46.7	6.0	22.3	29.1

Política de Inventario de Seguridad	1	2
Máquinas Trabajando hrs./semana	484.7	484.9
Tiempo de Preparación hrs./semana	24.5	24.5
Tiempo Ocioso hrs./semana	162.6	162.4
Venta Perdida Total $\times 10^3$	0	0
Ganancia Total $\times 10^6$	12.90	12.91

Resultados para el Caso B₁

Capacidad excede a la demanda $\rho = 0.3$
 Demanda Total = 1.12×10^7

	Producto				
	1	2	3	4	5
Demanda Promedio $\times 10^7$	10.4	54.1	7.0	27.5	35.7

Porción de Inventario de Seguridad		1	2
Máquina - Trabajando	hrs. semana	75.1	382.6
Tiempo de Preparación	hrs. semana	4.9	4.9
Tiempo total	hrs. semana	80.0	84.4
Costo de Seguridad Total $\times 10^3$		4081	3456
Costo Total $\times 10^3$		14.60	14.7

Resultados para el Caso B₂

Capacidad excede a la demanda $\rho = 0.5$
 Demanda Total = 1.01×10^7

	Producto				
	1	2	3	4	5
Demanda Promedio $\times 10^7$	10.4	57.1	7.0	27.4	36.3

Porción de Inventario de Seguridad		1	2
Máquina - Trabajando	hrs. semana	575.3	575.1
Tiempo de Preparación	hrs. semana	4.3	3.9
Tiempo total	hrs. semana	92.2	92.9
Costo de Seguridad Total $\times 10^3$		5437	5194
Costo Total $\times 10^3$		14.5	14.5

Resultados para el Caso C₁Capacidad excede a la demanda $v = 0.3$ Demanda Total = 1.80×10^6

	Producto				
	1	2	3	4	5
Demanda Promedio $\times 10^3$	36.3	67.4	8.0	33.0	42.9

Política de Inventario de Seguridad	1	2
Máquinas Trabajando hrs./semana	643.7	649.9
Tiempo de Preparación hrs./semana	4.3	4.4
Tiempo ocioso hrs./semana	23.7	17.6
Venta Perdida Total $\times 10^3$	9904	9222
Ganancia Total $\times 10^6$	20.9	21.0

Resultados para el Caso C₂Capacidad excede a la demanda $v = 0.5$ Demanda Total = 1.81×10^6

	Producto				
	1	2	3	4	5
Demanda Promedio $\times 10^3$	36.3	68.5	8.0	32.1	43.6

Política de Inventario de Seguridad	1	2
Máquinas Trabajando hrs./semana	638.7	647.6
Tiempo de Preparación hrs./semana	4.3	3.7
Tiempo ocioso hrs./semana	19.7	20.5
Venta Perdida Total $\times 10^3$	10186	10297
Ganancia Total $\times 10^6$	20.9	21.0

CONCLUSIONES

1.- En el caso de la máquina No. 4 se encontró que casi siempre se le asignaba los productos 2,3 y 4, y cuando la demanda excedía a la capacidad solo los productos 2 y 3.

2.- El hecho de que los resultados sean casi iguales se debe a que las políticas de inventario de seguridad contienen un elemento de asignación en su primera etapa y además las mismas reglas de secuencia.

3.- Una política de inventario de seguridad alto reduce obviamente las ventas perdidas, pero aumenta los costos y algunas veces mejora las ganancias; el efecto de cambiar la política de inventario de seguridad tiene solo un efecto marginal sobre la ganancia.

4.- Ninguna de las políticas de inventario de seguridad demostrado superioridad en lo que se refiere a sus criterios y objetivos.

PROGRAM

SABIN FORTRAN EXTENDED VERSION 2.0

7/108/13

15.37.33.

PAGE NO. 1

```

PROGRAM SABIN(INPUT,OUTPUT,TAFFS=INPUT)
C PROGRAMACION DE PRODUCTOS EN UNA PLANTA QUIMICA QUE CONSTA DE CUATRO
C MAQUINAS Y FABRICA CINCO PRODUCTOS CON LA LIMITACION DE QUE CADA
C UNA DE LAS MAQUINAS NO ES CAPAZ DE PRODUCIR CUALQUIERA DE LOS CINCO
C PRODUCTOS.
C A= VARIABLE PARA LA MATRIZ ORIGINAL
C S= VARIABLE PARA LA MATRIZ DE SUSTITUCION, Y= VARIABLE QUE INDICA
C EL ORDEN DE LOS COSTOS DE LAS VARIABLES BASICAS
C X= VARIABLE QUE INDICA EL ORDEN DE LOS COSTOS DE LAS VARIABLES EN
C LA FUNCION OBJETIVO, PREC= VARIABLE PARA LOS VALORES DE LOS COSTOS EN
C LA FUNCION OBJETIVO, XSOL= VALORES DE B, PREB= VARIABLES PARA LOS
C VALORES DE LOS COSTOS DE LAS VARIABLES BASICAS, TETA= VALORES DE TETA
C DOTIO= COSTO DE OPORTUNIDAD
C M= NUMERO DE ECUACIONES, N= NUMERO DE VARIABLES
C VB= VALORES DE B
C MI= MATRIZ INICIAL
C PP= PRECIOS
C SD= SOLUCION DEGENERADA
C SNF= SOLUCION NO FACTIBLE
C SI= SOLUCION ILIMITADA
C T= TABLAS
C YB= VALORES DE Y Y DE B
C LND= NUMERO DE LA MAQUINA OCIOSA
C TOMI= TIEMPO OCIOSO DE LA MAQUINA I EN HORAS
C VE= VALOR ESPERADO DE LA DEMANDA E IGUAL A LA DEMANDA PROMEDIO
C STOX= DESVIACION ESTANDAR ESTA EN FUNCION DE LA DEMANDA PROMEDIO
C YY(IM)= VECTOR AUXILIAR PARA PODER OBTENER LA POSICION DE LAS VARIABLES
C EN LA BASE EN FORMA DE MAQUINA I PRODUCTO J
C XX(I, J)= VALORES DE LAS VARIABLES EN LA BASE EN FORMA DE MAQUINA I PRO-
C DUCTO J
C SKALFA(I)= A LA SUMATORIA DESDE J IGUAL A 1 HASTA N DONDE N ES EL NUMERO DE
C RG DE PRODUCTO ASIGNADOS EN LA MAQUINA I EN DETERMINADO PERIODO DEL
C PRODUCTO CK(I, J)*ALFA(I, J)**2
C ALFA(I, J)= RAZON DE LA DEMANDA DEL PRODUCTO J AL PRODUCTO QUE SE HAYA
C FORMADO COMO BASE (PUEDE SER CUALQUIERA DE LOS ASIGNADOS A LA MAQUINA I)
C CK(I, J)= UN FACTOR DE COSTOS DE LLEVAR EL INVENTARIO  $I(I+GAMMA)/A$  DONDE
C A= DEMANDA/SEMANA, I= INTERES/SEMANA, GAMMA= RAZON ENTRE LA VELOCIDAD
C DE DEMANDA Y LA VELOCIDAD DE PRODUCCION.
C KALFA(I, J)= SUMATORIA DEL PRODUCTO DE CK(I, J)*ALFA(I, J)**2
C HMAX(I)= VECTOR QUE GUARDA EL VALOR DEL PRODUCTO BASE DE LA MAQUINA I
C SETUP(I)= SETUP TIME (HRS) PARA LA MAQUINA I SI CAMBIAMOS DEL PRODUCTO
C I2 AL PRODUCTO I1 DONDE I2=MM(I+1), Y I1=MM(I) Y L VA DESDE 1 HASTA KKK
C DONDE KKK=K-1, Y K ES EL NUMERO DE PRODUCTOS ASIGNADOS A LA MAQUINA I
C EN UN PERIODO DETERMINADO
C STUPP(I)= SETUP TIME (HORAS) PARA LA MAQUINA I SI CAMBIAMOS DEL PRODCU
C TO I1 AL PRODUCTO I2 Y LO DEFINICION PARA SETUP(I) TAMBIEN SE APLICA A
C STUPP(I)
C HMK(K)= VECTOR QUE GUARDA QUE PRODUCTO DEBE FABRICARSE EN LA MAQUINA I
C CM(I, J)= CANTIDAD DEL PRODUCTO J QUE DEBE FABRICARSE EN LA MAQUINA I
C PRV(I, J)= VELOCIDAD DE PRODUCCION (HORAS/1000 LIBRAS) DE LA MAQUINA I PARA
C EL PRODUCTO J.
C Q(I, J)= ALFA(I, J)*Q(I, HMAX(I)), DONDE ALFA(I, J) YA SE DEFINICION Q(I, HMAX(I))
C ES LA CANTIDAD QUE DEBE FABRICARSE DEL PRODUCTO BASE AL OBTENER

```

```

55 C LA EQUIVALENCIA QUE HAY ENTRE UNA UNIDAD DEL PRODUCTO BASE CON CADA
C UNIDAD DE LOS DEMAS PRODUCTOS ASIGNADOS A LA MAQUINA I EN UN PERIODO
C DETERMINADO EN FORMA PALANCAES EQUIVALE APODR. CUANTAS UNIDADES DEL
C PRODUCTO BASE DEBERN FABRICARSE DESPUES DE HABER SACADO LAS EQUIVALEN-
C CIAS CON LOS DEMAS PRODUCTOS.
60 C RR(I,J,K)=SETUP TIME(MARSA) PARA LA MAQUINA I SI CAMBIAMOS DEL PRODUCTO
C J AL PRODUCTO K O VICEVERSA.
C SHIN(I)=SUMA TOTAL DE SETUP TIME PAR LA MAQUINA I
C SS(I)=SHIN(I)*C(I) PARA LA MAQUINA I,C(I)=RUNNING COSTS(COSTO DE OPER
C AR LA MAQUINA I EN 1/HORA)
65 C XCAL(I)=TIEMPO QUE PUEDE DISPONER PARA FABRICACION PARA LA MAQUINA I
C DESPUES DE HABER PASADO LOS SETUP TIMES. AL TIEMPO QUE LA MAQUINA PUE
C DE OPERAR/PERIODO QUE SON 168 HORA SEMANA
C CYCLE(I)=TIEMPO DEL CICLO DE LA MAQUINA(I) EN SEMANAS.
C TOCD(I)=TIEMPO QUE QUIERO DISPONER DEL CICLO DE LA MAQUINA I PARA SA-
C TISFACER LA DEMANDA(ESTA DADO EN SEMANAS).
70 C SIDLE(I)=SI ES POSITIVO SU VALOR(QUE DEBE ESTAR EN HORAS)SIGNIFICA QUE
C TENEMOS TIEMPO OCIOSO, PERO SI ES NEGATIVO SIGNIFICA QUE NO VAMOS A PO
C DER SATISFACER LA DEMANDA Y ENTONCES TENDREMOS VENTAS PERDIDAS.
C SIDLE(I)=CYCLE(I)-TOCD(I), TIEMPO QUE ME SOBRA DEL CICLO (TIEMPO OCIO
C SO) SI ES POSITIVO, PERO SI ES NEGATIVO ES TIEMPO QUE ME FALTA PARA PODER
75 C DER SATISFACER LA DEMANDA. ESTE TIEMPO ESTA EN SEMANAS.
C IZ(I)=VECTOR AUXILIAR PARA PODER DETERMINAR LA POSICION DE LA GANANCIA
C A POR HORA MAYOR CUANDO NOS ENCONTRAMOS EL LA SITUACION DE QUE NO PODE-
C MOS SATISFACER LA DEMANDA.
80 C B(I),MMAX(I)=SS(I)/SKALFA(I) YA DEFINIDOS, R(61)=NUMERO CASUAL Y CERTE
C DO A QUE SE NECESITAN 61 NUMEROS POR PERIODO POR ESO SE DIMENSIONO HASTA
C STA61
C DIMENSION A(9,29),S(9,29),Y(10),X(30),PRES(30),XSOL(9)
C DIMENSION RE(30)
85 C DIMENSION VE(9)
C DIMENSION STD(9)
C DIMENSION PREC(30),TETA(15),COSTO(30)
C DIMENSION YY(29),XX(4,5),SKALFA(4),MMAX(4),SETUPA(4),SETUPB(4)
C DIMENSION DEN(4,5),RRP(4,5),ALFA(4,5),CK(4,5),CKALFA(4,5),MH(5)
90 C DIMENSION Q(4,5),RQ(4,5,5),SHIN(4),SS(4),XCAL(4),B(4,5)
C DIMENSION SIDLE(4),CYCLE(4),TOCD(4),IZ(29),C(4),SIDLE(4)
C DIMENSION R(61)
C COMMON NC2
C DO 2000 NCASO=1,22
C PRINT 5001,NCASO
95 C 5001 FCMPAT(1H1,/,/,1X,131(1H*),/,/,40X,*NUMERO DE CASO =*,
C 13,/,/,1X,131(1H*),/)
C NC2=NCASO
C REAC 1,NTAR
100 C 1 FCMPAT(14)
C REAC 11, M,N
C 11 FCMPAT(2I3)
C PRINT 8
C A FORMAT( 3H PR)
C READ 21, (PREC(J), J=1, N)
105 C 21 FCMPAT(7F10.5)
C REAC 22, (VE(I), I=5, 9)

```

```

IF(NC2.NF.3.A .NC2.NE.4.A .NC2.NE.19.A .NC2.NE.16) GO TO 8400
VF(5)=31.SVE(16)=99.SVE(7)= 7.SVE(8)=28.SVE(9)=35.SC2=2.89E-6
GC TC #41C
110 8400 IF(NC2.NF.7.A .NC2.NE.8.A .NC2.NE.19.A .NC2.NF.20) GO TO 8420
VF(5)=37.SVE(16)=66.SVE(7)=8.SVE(8)=33.58SVE(9)=42.SC2= 3.18E-6
GC TC #41C
8420 IF(NC2.NE.1.A .NC2.NE.2.A .NC2.NE.11.A .NC2.NE.12) GO TO 8410
VF(5)=75.SVE(16)=44.SVE(7)=6.SVE(8)=22.58SVE(9)=28.SC2= 2.6E-6
115 8410 CONTINUE
22 FORMAT(5F10.5)
READ 999,((RRR(I,J),J=1,5),I=1,4)
999 FORMAT(5F10.5)
120 READ 999,(((RRR(I,J,K),K=1,5),J=1,5),I=1,4)
READ 1500,(C(I),I=1,4)
1500 FORMAT(4F10.5)
NPER=0
IF(NC2.NE.(NC2/2)*2) R(61) =0.98719
125 350 XCAL(1)=1E8.
IF(NPER.EC.9) GO TO 8100
XCAL(2)=1E8.
XCAL(3)=1E8.
XCAL(4)=1E8.
NPER=NPER+1
130 PRINT #26,NPER
886 FORMAT( 5X,13HNUM. PERIODC=,I2)
R(1)=R(61)
NN=1
351 DO 355 I=1,4
135 355 XSOL(I)=XCAL(I)
PRINT 18
18 FORMAT( 3H NI)
DO 5000 I=1,N
140 READ 41,(A(I,J),J=1,N)
5000 CONTINUE
41 FORMAT (7F11.9)
PRINT 28
28 FORMAT( 3H VRI)
CALL NORMAL(VE,STDY,XSOL,R)
145 PRINT #1,(XSOL(I),I=1,M)
51 FORMAT(// 3X,9(F11.6,2X))
DO 10 I=1,M
PRES(I)=PREC(I)
Y(I)=I
150 10 CONTINUE
DO 20 J=1,N
X(J)=J
20 CONTINUE
C CALCULO DEL VECTOR A ENTRAR
155 4 DO 30 J=1,N
SUMPR=0.
DO 40 I=1,M
PR=PRS(I)*A(I,J)
SUMPR=SUMPR+PR

```

```
160      40 CONTINUE
        CCSTC(J)=FREC(J)-SUMPR
        30 CONTINUE
        GO TO 14
165      14 ZMAX=0.
        DO 50 J=1,N
        IF (CCSTC(J)-ZMAX) 50,50,5
        ZMAX=CCSTC(J)
        K1=(J)
        50 CONTINUE
170      IF (ZMAX) 255,255,15
        C CALULO DEL VECTOR QUE SALE
        15 A=0
        L=0
        DO 60 I=1,M
        IF (NSOL(I)) 35,29,45
175      25 PRINT 68
        68 FORMAT( 3H SD)
        IF (A(I,K1)) 55,65,65
        65 IF (A(I,K1)) 105,195,105
180      195 TETA(I)=-1.
        GO TO 60
        105 TETA(I)=0.
        K=K+1
        GO TO 60
185      55 TETA(I)=-1.
        GO TO 60
        35 PRINT 88
        88 FORMAT( 4H SNF)
        L=L+1
        GO TO 60
190      45 IF (A(I,K1)) 75,75,85
        75 TETA(I)=-1.
        GO TO 60
        85 TETA(I)=XSOL(I)/A(I,K1)
195      60 CONTINUE
        IF (L) 105,105,295
        105 IF (K) 115,115,205
        C SE ESCOGE EL MAYOR A(I,K) PARA ROMPER EMPATES
200      209 DO 190 I=1,M
        IF (TETA(I)) 215,225,215
        225 RE(I)=A(I,K1)
        GO TO 190
        215 RE(I)=-1.
        GO TO 190
205      190 CONTINUE
        REMAX=0.
        DO 200 I=1,M
        IF (RE(I)-REMAX) 200,200,235
210      235 REMAX=RE(I)
        K2=1
        TMIN=0.
        200 CONTINUE
```

```

      GO TO 7000
219 115 ZMIN=1.E+40
      DC 70 I=1,M
      IF (TETA(I)) 70,70,125
125 125 IF (TETA(I)-ZMIN) 135,70,70
135 135 ZMIN=TETA(I)
      K2=I
220 70 CONTINUE
      7000 K2=0
      DC 80 I=1,M
      IF (A(I,K1)) 145,145,80
145 145 K3=K3+1
225 80 CONTINUE
      IF (K3-M) 1450,155,1450
155 155 PRINT 98
      98 FORMAT( 3H SI)
      GO TO 255
230 C SE SACA EL VECTOR Y(K2)
1450 Y(K2)=X(K1)
      PRES(K2)=PREC(K1)
      C CALCULO DE NUEVOS VALORES DE PRODUCCION
      CC 110 I=1,M
235 110 XSOL(I)=XSOL(I)-ZMIN*A(I,K1)
      110 CONTINUE
      XSOL(K2)=ZMIN
      C CALCULO DE LA NUEVA TABLA
      DO 120 J=1,M
240 120 DO 120 I=1,M
      S(I,J)=A(I,J)-A(K2,J)*(A(I,K1)/A(K2,K1))
      120 CONTINUE
      DO 130 J=1,N
245 130 S(K2,J)=A(K2,J)/A(K2,K1)
      130 CONTINUE
      DO 140 J=1,N
      DO 140 I=1,M
      A(I,J)=S(I,J)
250 140 CCNTINUE
      CC TC 4
      C CALCULO DE Z OPTIMA
255 255 ZCPT=0.
      DO 310 I=1,M
      ZCPT=ZOPT+XSOL(I)*PRES(I)
259 310 PRINT 168, ZOPT
168 168 FORMAT( 6H ZOPT=F16.3)
      310 CONTINUE
      DO 311 I=1,4
260 311 DO 311 J=1,5
      IN=4+5*I+J
      XX(I,J)=0.
      YY(IN)=XX(I,J)
      311 CONTINUE
265 400 JO=1,4
      STOLE(JC)=0.

```

```

400 CONTINUE
   DO 312 L=1,6
   IF (XSOL(L)) 313,312,313
313  Y=Y(L)
   IF (IN=4) 314,314,315
314  SIOLE(IN)=SIOLE(IN)+XSOL(L)
   PRINT 797,XSOL(L)
797  FORMAT(// 6X,94HVALOR DE LAS VARIABLES EN LA BASE EN HORAS Y UNIO
10F5.2,F14.2)
315  IF (IN=14) 316,316,317
317  IF (IN=18) 340,340,319
318  IF (IN=24) 341,341,342
342  IF (IN=29) 343,343,343
316  I=1
   GO TO 344
340  I=2
   GO TO 344
341  I=3
   GO TO 344
343  I=4
344  Z=IN-(4*5*I)
   YX(IN)=YY(IN)+XSOL(L)
   XX(I,J)=YY(IN)
312  CONTINUE
   I=0
346  I=141
   SNALEP(I)=0.
   MPA(I)=0
   SETLPA(I)=0.
   SETUPP(I)=0.
   IF (SIOLE(I)) 401,402,402
401  PRINT 403,I,SIOLE(I)
403  FORMAT( 5H NMO=,I1 /
1 5H 6H TQMI=,F7.2 )
387  K=0
   DO 323 J=1,5
   IF (XX(I,J)) 322,322,318
322  CEM(I,J)=0.
   GO TO 323
318  CEM(I,J)=XX(I,J)/RRR(I,J)
   PRINT 156
156  FORMAT(// 6X,74HMAQUINA,6X,8HPRODUCTO,6X,29HHORAS MAQ,I PRODUCE PTC
1,J,6X,16HVLOC.PRODUCCION,6X,27HUNIDADES DEPTO.JFAB,ENMAQ,I)
   PRINT 796
316 796  FORMAT(// 7X,110H.....)
1.....
   PRINT 400,I,J,XX(I,J),RRR(I,J),CEM(I,J)
400  FORMAT(//10X,I3,2X,I3,4X,F10.3,9X,F10.3,9X,F10.3)
   IF (J-MNAX(I)) 323,323,320
320  MPA(I)=J
   MPAK=MNAK(I)
323  CONTINUE
   DO 383 J=1,5

```



```

796 FORMAT(/ / 10X,55HTIFMPC CCIOSO DE LA MAQ. I EN SEMANAS DURANTE FL
1CICLCO,F7,2)
346 IF(SI0LE(1)) 112,352,352
375 352 IF(I-4)356,350,350
112 JI=10*5*(I-1)
      JF=JI+4
      GANNAI=0.
      VENPER=0.
380 00 316 I1=10,29
      I2(I1)=I1
336 CONTINUE
      00 337 I1=JI,JF
      SM=PREC(I1)
385 00 336 JJ=I1,JF
      IF(PREC(IJJ)-SM)338,339,339
338 NP=JJ
      SM=PREC(IJJ)
390 336 CONTINUE
      I=PREC(I1)
      PREC(I1)=PREC(NP)
      PREC(NP)=I
      I1=I2(I1)
395 I2(I1)=I2(NP)
      I2(NP)=I1
      IF(YY(NP))337,337,901
901 IF(YY(NP)-XCAL(I))888,889,898
889 GANNAI=GANNAI+YY(NP)*PREC(NP)
      PRINT 996,GANNAI
488 996 FORMAT(/ / 25X,25HGANANCIA EN LA MAQUINA I=,F14.2)
      GO TO 386
890 GANNAI=GANNAI+XCAL(I)*PREC(NP)
      VENPER=VENPER+(YY(NP)-XCAL(I))*PREC(NP)
      GANPER=Z0FT-VENPER
405 PRINT 799
799 FORMAT(/ / 10X,13HVENTA PERCICA,8X,16HGANANCIA PERDIDA)
      PRINT 901,VENPER,GANPER
903 FORMAT(/ / 10X,F14.1,9X,F14.1)
      GO TO 386
418 888 GANNAI=GANNAI+YY(NP)*PREC(NP)
      PRINT 996,GANNAI
      A=XCAL(I)-YY(NP)
      XCAL(I)=A
337 CONTINUE
415 386 IF(I-4)356,350,350
8100 CL TINUE
      REMTNC 1
8000 CONTINUE
      CALL EXIT
420 ENC

```

```

05      SUBROUTINE NORMAL (VE, STDX, YSOL, R)
        DIMENSION SUM(10)
        DIMENSION VE(9), STDX(9), R(11), YSOL(9)
        COMMON NCZ
        CI=0.3
        IF(NCZ.EQ.(NCZ/2)+Z) CI=0.5
        C=1.
        IF(NCZ.EQ.11.OR.NCZ.EQ.12.OR.NCZ.EQ.13.OR.NCZ.EQ.16.OR.NCZ.EQ.19
        *.OR.NCZ.EQ.20) C3=1.1
        DO 6 I=2,61
        6  R(I)=RANUR(I-1)
        DO 7 I=9,9
        7  SUM(I)=0.
        DO 12 I=2,61
        12 J=(I-2)/12 + 9
            SUM(J)=SUM(J)+R(I)
        PRINT 777, R(61)
        777 FORMAT(1X,F9.5)
        DO 19 I=9,9
        19 CONTINUE
        YSOL(I)=C1*VE(I)
        RETURN
        END

```

FUNCTION RANUM (R)

IF (R) 700, 701, 705

700 R--R

GC TC 708

701 R=.13479

705 RENT=R*.1.ES

RENT=R*.110317.

RANUM=RENT*.E-5

I=RANUM

RT=I

RANUM=RANUM-RT

RETURN

END

05

10

REFERENCES

1. L. Gordon, Donald G. and Naylor, Thomas H., "Design of Computer Simulation Experiments for Industrial Systems", *Comm. ACM*, 8, No. 5, (May), 1965, pp. 517-524.

2. Zelen, M., J. W. Gribble, and R. E. Proffitt, "On Digital Simulation of a Batch Process", *Trans. A.S.M.E.*, 79, (1957), pp. 47-51.

3. Ross, S. M., J. G. Johnson, and W. L. Maxwell, "Some Problems in the Simulation of Manufacturing Machines", *AIIE Trans.*, VI, No. 1, (Jan.), 1974.

4. R. L. Fishelson, "Modeling of an Industrial System for Simulation", *Plant Simulation and Control*, pp. 102-104, (1969).

5. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.

6. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.

7. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.

8. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.

9. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.

10. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.

11. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.

12. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.

13. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.

14. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.

15. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.

16. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.

17. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.

18. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.

19. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.

20. J. G. Johnson, "The Simulation of a Plant", *The Design and Operation of Industrial Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968, pp. 107-124.