



LABORATORIO DE SIMULACIÓN DE REDES Y TELETRÁFICO

Profesor: J. Vozmediano
jvt@trajano.us.es



Índice

- Introducción a la simulación
- Modelado
- Generadores de números aleatorios
- Análisis de resultados
- Técnicas de reducción de varianza



Simulación

- ES una técnica que permite:
 - inferir las características de un sistema real
 - mediante el estudio de un modelo que imita su comportamiento
 - cuando la experimentación con el sistema real es más costosa o imposible
- NO ES un ejercicio de programación que da una respuesta exacta



Modelado

- Sistema: Conjunto de elementos o procesos relacionados objeto del estudio
- Modelo: Abstracción simplificada del sistema
 - No es una implementación: simplificar
 - Debe ser válido, a pesar de no representar todas las características del sistema real
 - Ejemplos:
 - Físicos: Maquetas de construcciones, Maniqués, Túnel de viento, Canales hidrodinámicos
 - Matemáticos: Relaciones lógicas y cuantitativas ($R=V/I$)



Solución a modelos matemáticos

- Analíticas: cálculo, álgebra, teoría de la probabilidad
 - Necesidad de simplificación para hacer el problema tratable
 - “Respuesta exacta a una pregunta potencialmente poco exacta”
- Simulación:
 - Necesidad de simplificación para hacer el modelo viable
 - “Respuesta aproximada a una pregunta potencialmente más exacta”



Tipos de modelos de simulación

- Dinámico/Estático: Su estado varía/no varía con el tiempo
- Estocástico/Determinista: Contiene/no contiene componentes aleatorios
- Discreto/Continuo: El estado del modelo cambia instantáneamente/contínuamente
- Modelos dinámicos, estocásticos y discretos analizados con la ayuda de simulador que se ejecuta en un ordenador



Otros tipos de simulación

- Simulación en tiempo continuo
- Simulación de tipo MonteCarlo
- Simulación determinista



Ejemplos de modelo

- Sistema: cola
 - Estado: Longitud Q
 - Transiciones:
 - Llegada: $Q, Q+1$
 - Salida: $Q, Q-1$
- Sistema: servidor
 - Estado: ocupado/libre
 - Transiciones:
 - Llegada: libre, ocupado
 - Salida: ocupado, libre



Ventajas e Inconvenientes

Inconvenientes

- Coste en tiempo de codificación y proceso
- Inexactitud, por simplificación, del modelo
- Inexactitud, por componentes aleatorios, del modelo
- Errores de programación
- Sensación de confianza en las respuestas

Ventajas

- El modelo puede ser muy complicado
- Los sistemas con elementos aleatorios se resisten a un modelo con solución analítica
- Mejor que experimentar con el sistema real
- Pueden explorarse soluciones alternativas
- Pueden controlarse las condiciones de contorno
- Puede variarse la escala de tiempo



El método de simulación

- Formulación del problema y del tipo de respuesta esperado
- Recolección de datos del sistema real
- Formulación de un modelo
- Validación del modelo
- Codificación
- Verificación del programa resultante
- Ejecuciones piloto del programa
- Diseño de experimentos
- Realización de los experimentos
- Análisis de resultados



Formulación del problema

- ¿Qué resultado se espera?
 - Estudiar un sistema con una configuración dada
 - Comparar varias configuraciones alternativas
 - Determinar la configuración óptima
- ¿Es conveniente simular?
 - Último recurso
 - Complementar con otras técnicas



Formulación de un modelo

- Determinar el nivel de detalle necesario
- Escoger el tipo de modelo a realizar
 - Modelos orientados a eventos
 - Modelos orientados a procesos
 - Modelos orientados a recursos
- Cada uno tiene una serie de **elementos y primitivas**

Modelos de eventos

- Bajo nivel: sólo un elemento, pocas primitivas
- Evento:
 - Suceso elemental que altera el estado del sistema
 - Cada evento:
 - Es de un tipo concreto
 - Ocurre en un instante dado
 - Puede tener parámetros asociados
 - Tiene un tratamiento que depende de su tipo
 - Varios eventos pueden ocurrir en al mismo tiempo
 - Los eventos pendientes esperan en una cola

Ejemplo

- Evento: Llegada de un cliente a una cola
- Tipo de evento: Llegada
- Instante asociado: El de la llegada
- Parámetro: Tiempo de servicio que requiere
- Tratamiento: Acceso al servidor si está libre o esperar si está ocupado

Modelos de eventos

Primitivas

- SIMTIME
 - Devuelve el instante actual
- SCHEDULE (ev, type, info, when)
 - Encola el evento ev de tipo type con la información asociada info para que se active en el instante futuro when.
- CANCEL (ev)
 - Anula el evento ev previamente programado

Simulador orientado a eventos

Planificador

- Encola eventos futuros y avanza el reloj hasta el siguiente evento
- Eficiencia: Array, Pila, Lista de calendario, Lista hash, ...

Reloj

- Marca el instante actual

Variables de estado

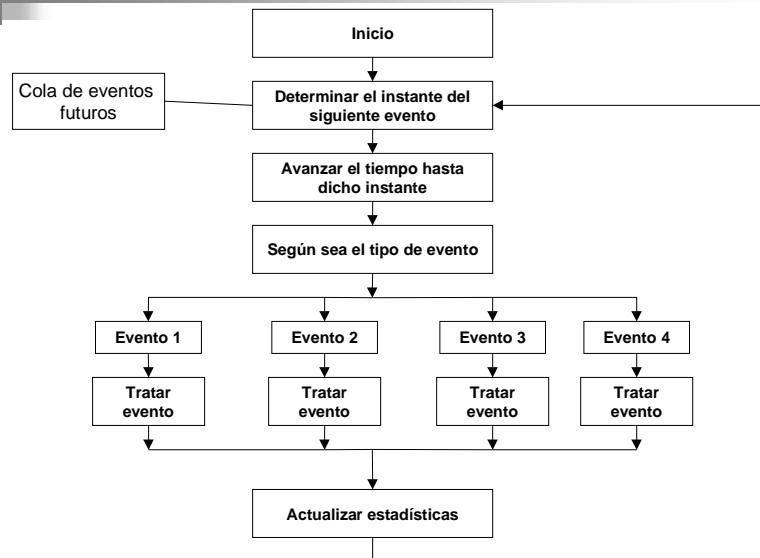
Rutinas de tratamiento de eventos

- Modifican las variables de estado y encolan nuevos eventos en respuesta al evento tratado

Rutinas de entrada de datos

Rutinas de inicio

Planificador de eventos



Modelo de procesos

- Alto nivel, más primitivas
- Proceso:
 - Entidades con comportamiento propio relacionadas entre sí
 - Cada proceso:
 - Es de un tipo concreto
 - Todos los procesos del mismo tipo tienen el mismo comportamiento
 - Tiene un conjunto de parámetros que describen su estado y que los distingue de otros procesos del mismo tipo
- Recursos:
 - Elementos pasivos por los que compiten los procesos
 - Si no hay unidades de recurso para un proceso, éste espera

Modelo de procesos

□ Estados posibles de un proceso

- Activo:
 - Tiene algo que hacer en el instante actual o en un instante futuro determinado
- Ejecución:
 - Proceso Activo en funcionamiento
- Pasivo:
 - Sin nada que hacer hasta que otro lo active
- Esperando:
 - A algún recurso no disponible
- Terminado:
 - Sin nada que hacer, y sin posibilidad de reactivación

Modelo de procesos

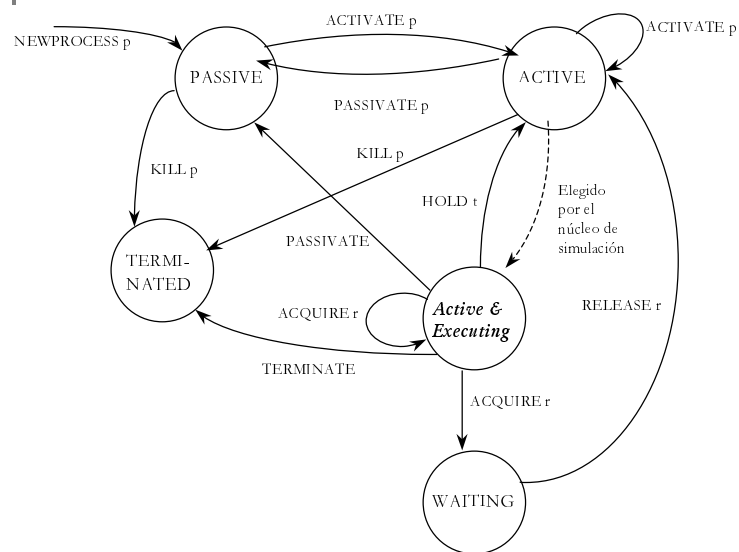
□ Primitivas

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">- STATUS<ul style="list-style-type: none">• Devuelve el estado del proceso- SIMTIME<ul style="list-style-type: none">• Devuelve el instante actual- NEWPROCESS(p, type, param)<ul style="list-style-type: none">• Crea un nuevo proceso del tipo indicado y con los parámetros que se indiquen- KILL(p)<ul style="list-style-type: none">• Pasa p a Terminado | <ul style="list-style-type: none">- TERMINATE<ul style="list-style-type: none">• Termina a sí mismo- ACTIVATE(p,delay)<ul style="list-style-type: none">• Activa a p en el futuro- PASSIVATE(p)<ul style="list-style-type: none">• Pasa p a Pasivo- HOLD (delay)<ul style="list-style-type: none">• Pasa de Ejecutándose a Activo en el futuro- CURRENT<ul style="list-style-type: none">• Indica el proceso en ejecución |
|--|---|

Planificador orientado a procesos

- Coordina el avance de los procesos
- Reloj de la simulación
- Lista de procesos activos
- Comprueba si alguna condición de espera se satisface

Primitivas y estados de un proceso





Validación del modelo

- Discutir con expertos o clientes
- Controlar el nivel de detalle
 - Coste del desarrollo del modelo vs. Grado de simplificación
- Adecuarlo al propósito inicial
 - El modelo puede contener simplificaciones que lo invaliden para propósitos diferentes
- Validar A LA VEZ que se desarrolla el modelo, y no después



Codificación

- Elección del entorno de simulación
- Componentes
 - Generador aleatorio
 - Distribuciones aleatorias
 - Tratamiento estadístico: medias, varianzas, etc...
 - Biblioteca de simulación de eventos o procesos
 - Componentes predefinidos
 - Interfaz gráfica
 - definición del modelo
 - animación del modelo
- Precio/Flexibilidad/Coste del modelo

Codificación

Generadores aleatorios

- Necesarios en los modelos estocásticos
- Incompatibles con un ordenador
- Se usan fórmulas que permiten generar números pseudoaleatorios (periódicos)
 - Semilla = punto de arranque
 - Permiten repetir el mismo el experimento
- Necesidad de periodo lo suficientemente grande
 - ¡!!! Muchos generadores presentes en sistemas operativos (ej.: rand()) o en paquetes de simulación tienen un periodo demasiado pequeño !!!!

Codificación

Generadores pseudoaleatorios

- Generadores Lineales Congruentes (LCG):

$$X[n] = (a X[n-1] + b) \text{ mod } m$$

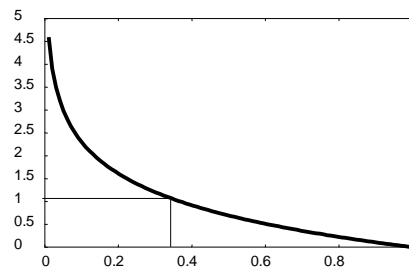
$$X[n] = (a^n X[0] + b(a^n-1)/(a-1)) \text{ mod } m$$

- Generador de Wichmann-Hill :
 - Combina 3 LCG
 - Periodo muy largo
- Generador de L'Ecuyer

Codificación

Generador de distribuciones

- Generadores pseudoaleatorios: $[0,1)$
- Distribuciones: Correspondencia función inversa
 - Ej: Exponencial $E = -\mu \ln U$
 - Si U es uniforme en $[0,1)$, entonces E es exponencial de media μ



Codificación

Tratamiento estadístico

- Funciones de
 - Recogida de estadísticas
 - Control de varianza
 - Determinación de intervalos de confianza



Codificación

Biblioteca de simulación

Incluye:

- Primitivas propias del modelo escogido:
 - eventos,
 - procesos,
 - recursos
- Planificador



Codificación

Componentes predefinidos

Adecuados al problema a modelar

Ejemplos:

- Fuentes de tráfico:
 - unidireccional, bidireccional, multicast
 - eco, asentimientos
 - aplicaciones: ftp, telnet, www
- Sumideros
- Paquetes/Tramas
 - fragmentación, ensamblado, encapsulado
- Redes locales y enlaces punto a punto
- Encaminadores y encaminamiento

Codificación

Interfaz gráfica

- Útil para:
 - Definir experimentos
 - Animación: depurar el modelo

- Inútil para:
 - Análisis de sensibilidad
 - Simulación por lotes
 - Experimentación definitiva

Codificación

Herramientas para la simulación

- Paquetes comerciales (OPNET, COMNET, Arena)
 - Describir el modelo
 - Biblioteca de elementos
- Paquetes no comerciales (ns2, nist, yats, swan...)
- Lenguajes de simulación (Simscrip, GPSS)
 - Programar el modelo
 - Biblioteca de primitivas de simulación y generación de informes
- Lenguajes de propósito general (C, C++, OTcl)
 - Programar el modelo
 - Programar la biblioteca de simulación



Verificación del programa resultante

- Depurar el programa por partes
- Revisión por terceros
- Ejecuciones piloto de configuraciones simples
 - Comparar con resultados analíticos o fácilmente computables
- Ejecuciones animadas



Diseño de experimentos

- Identificar parámetros relevantes
- Seleccionar combinaciones
 - Interpretación
 - Análisis estadístico de resultados
- Duración de los experimentos
 - Horizonte finito
 - Prefijada a algún recurso o límite temporal
 - Horizonte infinito
 - Se busca un régimen permanente del que nos interesan algunos parámetros
 - Se caracterizan por dos periodos
 - Transitorio inicial: debe eliminarse
 - Estacionario



Ejecución

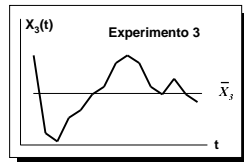
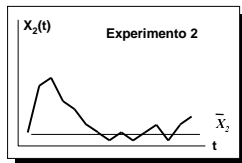
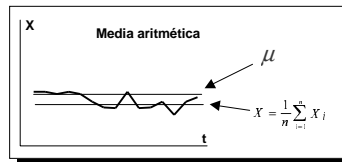
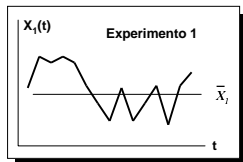
**Una única ejecución del modelo
no suele ser suficiente
para extraer inferencias fiables**



Análisis de resultados

- Las variables de entrada son aleatorias: los resultados también
- Es necesario
 - Repetir el mismo experimento varias veces con semillas diferentes
 - Analizar estadísticamente los resultados
 - Determinar la precisión con la que dichos resultados se acercan a la realidad

Precisión



¿Cuánto tiempo debe durar cada experimento?

¿Cuántos experimentos deben realizarse?

¿Cómo estimo cuán cerca está \bar{X} de μ ?

Conceptos

- Nivel de confianza (<100%)
 - Probabilidad de que el valor del estadístico (μ) se ubique dentro de un cierto intervalo
- Precisión
 - Cercanía del estimador al estadístico
- Cuantos más experimentos (n)
 - Más precisión
 - Más coste

Hipótesis

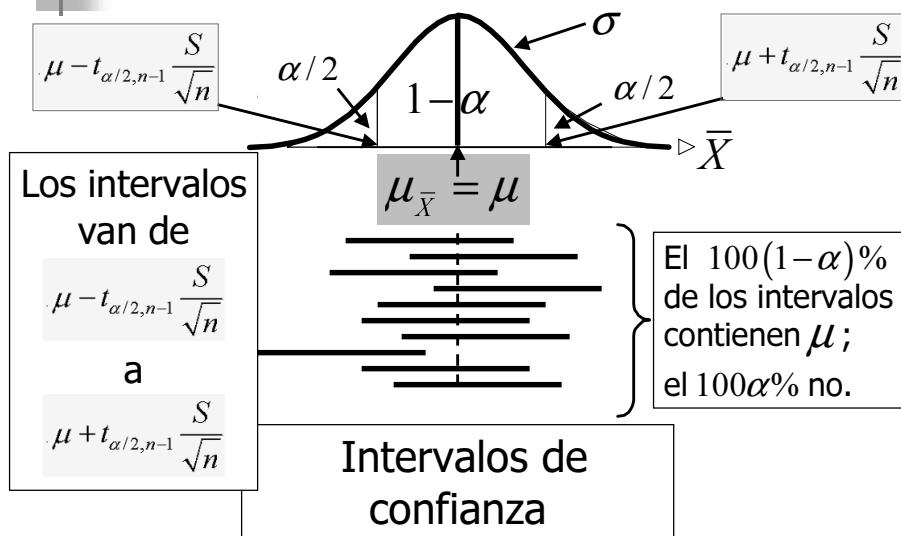
- Se desconocen la media y la varianza (μ, σ^2), pero se sabe que son finitas
- Las v.a. son normales e "independientes"
 - Si no normales, aumentar las muestras (T. límite central)
- Se usan los estimadores

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \cong \mu \quad S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

- Usar la distribución t-Student
- Intervalo de confianza:

$$\bar{X} - t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Intervalos y nivel de confianza



Análisis de resultados

Distribución t-Student

		alfa	0,200	0,150	0,100	0,050	0,020	0,010
		Prob	0,800	0,850	0,900	0,950	0,980	0,990
Número de Muestras	1-(alfa/2)	0,900	0,925	0,950	0,975	0,990	0,995	
	Grados de libertad							
1	1	3,0777	4,1653	6,3137	12,7062	31,8210	63,6559	
2	2	1,8856	2,2819	2,9200	4,3027	6,9645	9,9250	
3	3	1,6377	1,9243	2,3534	3,1824	4,5407	5,8408	
4	4	1,5332	1,7782	2,1318	2,7765	3,7469	4,6041	
5	5	1,4759	1,6994	2,0150	2,5706	3,3649	4,0321	
6	6	1,4398	1,6502	1,9432	2,4469	3,1427	3,7074	
7	7	1,4149	1,6166	1,8946	2,3646	2,9979	3,4995	
8	8	1,3968	1,5922	1,8595	2,3060	2,8965	3,3554	
9	9	1,3830	1,5737	1,8331	2,2622	2,8214	3,2498	
10	10	1,3722	1,5592	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693	
11	11	1,3634	1,5476	1,7959	2,2010	2,7181	3,1058	
12	12	1,3562	1,5380	1,7823	2,1788	2,6810	3,0545	
13	13	1,3502	1,5299	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123	
14	14	1,3450	1,5231	1,7613	2,1448	2,6245	2,9768	
15	15	1,3406	1,5172	1,7531	2,1315	2,6025	2,9467	
16	16	1,3368	1,5121	1,7459	2,1199	2,5835	2,9208	
17	17	1,3334	1,5077	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982	
18	18	1,3304	1,5037	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784	
19	19	1,3277	1,5002	1,7291	2,0930	2,5395	2,8609	
20	20	1,3253	1,4971	1,7244	2,0863	2,5278	2,8454	
25	24	1,3178	1,4871	1,7109	2,0639	2,4922	2,7970	
40	39	1,3036	1,4685	1,6849	2,0227	2,4258	2,7079	
50	49	1,2991	1,4625	1,6766	2,0096	2,4049	2,6800	
100	99	1,2902	1,4508	1,6604	1,9842	2,3646	2,6264	
500	499	1,2833	1,4418	1,6479	1,9647	2,3338	2,5857	
1000	999	1,2824	1,4406	1,6464	1,9623	2,3301	2,5808	

DISTR.T.INV(alfa,n-1)

Análisis de resultados

Ejemplo

Tras 25 experimentos se obtiene una media 50 y una varianza 64.
Determinar el intervalo de confianza del 95% para la media

$$\bar{X} - t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

$$50 - 2.0639 \frac{8}{\sqrt{25}} \leq \mu \leq 50 + 2.0639 \frac{8}{\sqrt{25}}$$

$$46.69 \leq \mu \leq 53.30$$

Análisis de resultados

Ejemplo

		alfa	0,200	0,150	0,100	0,050	0,020	0,010
		Prob	0,800	0,850	0,900	0,950	0,980	0,990
Número de Muestras	1-(alfa/2)	0,900	0,925	0,950	0,975	0,990	0,995	
	Grados de libertad							
1	1	3,0777	4,1653	6,3137	12,7062	31,8210	63,6559	
2	2	1,8856	2,2819	2,9200	4,3027	6,9645	9,9250	
3	3	1,6377	1,9243	2,3534	3,1824	4,5407	5,8408	
4	4	1,5332	1,7782	2,1318	2,7765	3,7469	4,6041	
5	5	1,4759	1,6994	2,0150	2,5706	3,3649	4,0321	
6	6	1,4398	1,6502	1,9432	2,4469	3,1427	3,7074	
7	7	1,4149	1,6166	1,8946	2,3846	2,9979	3,4995	
8	8	1,3968	1,5922	1,8595	2,3360	2,8965	3,3554	
9	9	1,3830	1,5737	1,8331	2,2822	2,8214	3,2498	
10	10	1,3722	1,5592	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693	
11	11	1,3634	1,5476	1,7959	2,2010	2,7181	3,1058	
12	12	1,3562	1,5380	1,7823	2,1788	2,6810	3,0545	
13	13	1,3502	1,5299	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123	
14	14	1,3450	1,5231	1,7613	2,1448	2,6245	2,9768	
15	15	1,3406	1,5172	1,7531	2,1315	2,6025	2,9467	
16	16	1,3368	1,5121	1,7459	2,1199	2,5835	2,9208	
17	17	1,3334	1,5077	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982	
18	18	1,3304	1,5037	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784	
19	19	1,3277	1,5002	1,7291	2,0930	2,5395	2,8609	
20	20	1,3252	1,4971	1,7245	2,0863	2,5278	2,8453	
25	24	1,3176	1,4871	1,7108	2,0639	2,4922	2,7970	
40	39	1,3036	1,4685	1,6849	2,0227	2,4258	2,7079	
50	49	1,2991	1,4625	1,6766	2,0096	2,4049	2,6800	
100	99	1,2902	1,4508	1,6604	1,9842	2,3646	2,6264	
500	499	1,2833	1,4418	1,6479	1,9647	2,3338	2,5857	
1000	999	1,2824	1,4406	1,6464	1,9623	2,3301	2,5808	

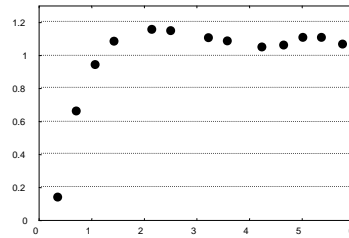
Análisis de resultados

Número de experimentos

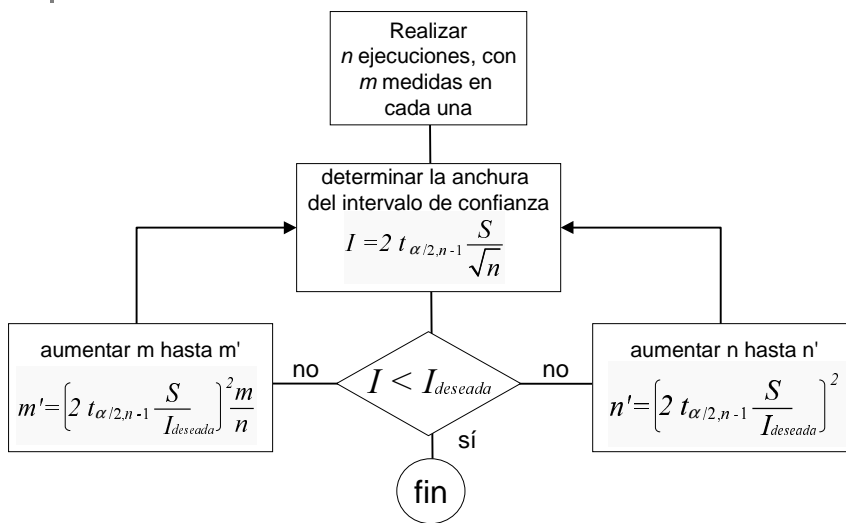
- Simulaciones de horizonte finito
 - Repetir n experimentos con semilla diferente
 - Escoger n para el nivel de confianza deseado
- Simulaciones de horizonte infinito
 - Repetir n experimentos con semilla diferente durante un periodo "largo" una vez alcanzado el estado estable
 - Realizar un solo experimento de duración superior y "trocear" el resultado

Eliminación del transitorio

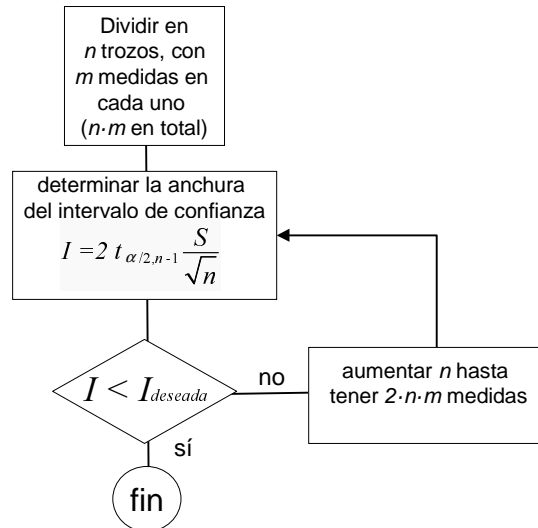
- Cuando interesen parámetros del estado estable
- Los datos que se recojan en el transitorio pueden distorsionar la estimación del estado estable
- Eliminación:
 - Simulación larga
 - Iniciación apropiada a un estado no vacío
 - Truncado del transitorio
 - (no hay solución general automatizable)



Duración de los experimentos



Duración de los experimentos



Presentación de resultados

- Credibilidad, claridad, precisión, eficiencia
- Casi siempre: gráficos 2D/3D...
- Huir de la verborrea pictórica
- No falsear los datos de entrada
- No falsear los resultados
 - No comprimir el eje vertical
 - Poner el origen (0) en el eje vertical
- No falsear las comparaciones

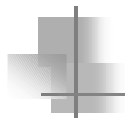
Credibilidad

- “*On credibility of simulation studies of telecommunication networks*”. IEEE Comm. Mag. , ene 2002. Pawlikowski, K., Hae-Duck Joshua Jeong, Jong-Suk Ruth Lee.

- Indicar siempre:
 - Nivel de confianza
 - Intervalo de confianza asociado al estimador
 - Número de muestras

Modelado de redes

- Elementos:
 - Nodos
 - Enlaces
 - Fuentes
 - Sumideros
 - Paquetes



Conmutador/Encaminador

- Capacidad (velocidad de procesado)
- Mecanismo de encaminamiento
- Disciplina de encolado
- Algoritmo de control con otros conmutadores
-



Enlaces

- Distancia
- Régimen binario
- Errores



Fuentes

- Siguiete instante de activación
- Mecanismo de generación de paquetes
- Tasa de generación de paquetes
- Algoritmo de control de tasa
- Destino de los paquetes
- Tipo de paquete



Paquetes

- Tipo de paquete
- Destino final o ruta
- Información de control
- Tiempo de servicio