

Simulación de sistemas discretos: Intersección vial con semáforos en doble sentido

Alexsander Coronado Valbuena¹ and Ximena Briceño Arenas¹

¹Ingeniería en Sistemas
Corporación Universitaria Minuto de Dios

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es presentar el modelo de intersección vial con semáforos de doble sentido y simularlo en el software Arena®, el cual tendrán que funcionar los semáforos en horarios de 24/7, además que estos solo tendrán luz verde para avanzar y luz roja para detenerse. Se tendrá en cuenta las deferentes afluencias de cada carril y posibilidades de automóviles varados. El modelo que se obtenga dará solución a un sistema donde el tiempo de cola de automóviles sea mínimo.

Keywords: Simulación, intersección vial, sistemas discretos, tráfico, colas

Simulation of discrete systems: Road intersection with two-way traffic lights

Abstract

The main objective of this work is to present the road intersection model with two-way traffic lights and simulate it in the Arena® software, which will have to work the traffic lights in 24/7 hours, besides these will only have green light to advance and red light to stop. The different affluences of each lane and possibilities of stranded cars will be taken into account. The model obtained will give solution to a system where the car queue time is minimal.

I. INTRODUCCIÓN

Un sistema se puede definir como un conjunto de elementos unidos por relaciones de interacción o interdependencia, en el sistema discreto cambian los estados instantáneamente de valor en ciertos instantes de tiempo, es un sistema de cierta complejidad puede ocurrir que existan simultáneamente variables de estado continuas y discretas. [1] Se mostrará la simulación de un sistema discreto, el cual se trabajara la intersección vial con semáforos en doble sentido, se utilizara el software Arena® para realizar la simulación ya que en el modelado de eventos discretos es el proceso de describir el comportamiento de un sistema complejo como una serie de eventos bien definidos y ordenados, y funciona bien en prácticamente cualquier proceso donde haya variabilidad, recursos limitados o limitados o interacciones complejas del sistema. [2]

Al pasar el tiempo se ha incrementado los automotores en las vías del mundo en los últimos años, causando congestión en las vías y diferentes inconvenientes como aumento de movilización de personas en el cumplimiento diario de sus labores, requieren el desarrollo de sistemas de semaforización cada vez más robustos, que permitan una oportuna detección y notificación de fallas, que conlleva primero, a lograr una reducción en la contaminación (auditiva y atmosférica) al minimizar el tiempo adicional que un vehículo permanece en las vías por fallas, sin ser detectadas en las redes de semaforización; segundo, evitar congestiones al reducir el tiempo de traslado de automotores y peatones de un lugar a otro; tercero, disminuir

el tiempo de no funcionamiento de los semáforos de la intersección; cuarto, reducir los accidentes causados por la imprudencia de vehículos y peatones cuando los semáforos no funcionan de forma adecuada.[3]

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Con los cambios propuestos en la programación de los tiempos de ciclos y desfases de los semáforos se busca mejorar en al menos un 5 por ciento el proceso de movilidad vehicular, esto comprende una reducción del tamaño de las colas y una reducción en los tiempos de recorrido de los usuarios de este tramo vial. [4] Se han realizado diferentes estrategias de solución desde diferentes puntos de vista.

II-A. Adaptive traffic lights using car-to-car communication

Trata sobre La coordinación del tráfico en las intersecciones ha sido un tema muy estudiado y discutido. Este documento presenta una adaptación de los semáforos que se basan en un sistema inalámbrico de comunicación, entre los vehículos y los 17 controladores fijos de las intersecciones, que son los que manipulan el funcionamiento de los semáforos. Este se presenta en un entorno de simulación integrada que se ha desarrollado para el sistema de estudio. Se argumenta que este sistema prueba significativamente el flujo en las intersecciones y tiene claras ventajas con respecto a otras arquitecturas en cuanto a costos y rendimiento se refiere. En la siguiente ilustración podemos observar gráficamente como es el funcionamiento de esta tecnología:

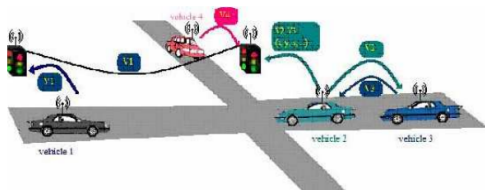


Ilustración 1 Adaptive traffic lights using car-to-car communication

Teniendo en cuenta los siguientes aspectos como lo son la teoría la duración del ciclo óptimo

puede ser aproximada con la conocida ecuación de Webster¹ como una función de tiempos perdidos y proporción de flujos críticos.

Co: es la duración del ciclo óptimo.

L: es la suma de los tiempos perdidos para todas las fases. (Tiempos de amarillo y rojo).

n: es el número de los grupos de carriles críticos. Un grupo de carril crítico es un grupo de movimientos que pueden entrar a la intersección al mismo tiempo.

vi/si: es la proporción de flujo máximo por grupo de carril.

1/Xc: es el rango deseado de la intersección.

$$C_o = \frac{1.5 \cdot L + 5}{1 - \frac{1}{X_c} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{v_i}{s_i}} \quad (1)$$

El volumen de la demanda de cada llegada es calculada una vez por ciclo antes de programar la duración del ciclo y este es considerado para el periodo de análisis. Teniendo en cuenta la duración del ciclo el tiempo de verde se asigna para cada fase para producir un rango igual de saturación sobre cada intersección.

$$G_i = (C - L) \cdot \frac{\frac{v_i}{s_i}}{\sum \frac{v_j}{s_j}} \quad (2)$$

G: es el tiempo de la fase de verde i.

C: es la duración del ciclo.

L: el tiempo total perdido.

vi/si: proporción de volumen crítico para el flujo de saturación del movimiento de la fase i. [5]

Herramientas con las que utilizaron para esta simulación:

- The Network Simulator - ns-2 - www.isi.edu/nsnam/ns
- JiST / SWANS simulator - jist.ece.cornell.edu/index.html
- R.Wiedemann, "Simulation des Straßenverkehrsflusses," Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8 (1974).

- R.Wiedemann, “Modeling of RTI-Elements on multi-lane roads”. In: Telematics in Road Transport edited by the Commission of the European Community, DG XIII, Brussels (1991).
- VISSIM

II-B. Simulación microscópica del tráfico urbano y su aplicación en un área de la ciudad de Zaragoza.

Obtener una herramienta para simular tráfico urbano con el fin de observar el comportamiento de la red, ante las variaciones de los parámetros que configuran su funcionamiento, de forma que se pueda:

- Experimentar con las distintas políticas de control antes de ponerlas en Funcionamiento en la red semafórica.
- Observar el comportamiento del tráfico ante posibles incidentes en la vía, como puedan ser cortes de calles, obras, acontecimientos festivos, etc.

La simulación se realizó con el software Arena 6.0 debido a su adecuación al paradigma de eventos discretos, también porque este software aporta distintos módulos que se adaptan a una multitud de situaciones posibles del mundo real y la posibilidad de interactuar con un lenguaje de programación como Visual Basic que le permite al ingeniero programar los parámetros del modelo sin tener que entrar al entorno gráfico. Las variables objetivo a analizar son “Tiempos perdidos en la cola” y “Tiempo de recorrido”. Además de esto también se midió en cada línea la longitud media de la cola. Los siguientes son los aspectos que influyen en la simulación:

- Línea de parada: Esta, es un lugar dentro del circuito donde se generan las colas y cada una tiene un sentido y puede tener varias direcciones.
- Opción de paso: Se tienen 2 opciones: que el vehículo pueda pasar o no. Si puede pasar, el vehículo está listo para entrar en servicio o ser atendido por el semáforo.

- Tiempo de paso: Es el tiempo que le toma al vehículo cruzar la línea de parada. Este se denomina tiempo de saturación y es el tiempo que se toma cada uno para reaccionar al cambio de luz roja a verde. A partir del tercer vehículo se supone que el tiempo es el mismo para todos y se haya dividiendo el total del tiempo por el número de vehículos que pasan la línea de parada.

- Selección de carril: Esta es la opción que tiene cada vehículo de escoger el carril que los lleve a su destino. También se le denomina reparto.

- Regulación semafórica: Esta funciona según el plan de tráfico establecido y está compuesta por el ciclo, reparto y desfase.

Algunas hipótesis que se hicieron antes de realizar la simulación son:

- Entre intersecciones la velocidad es constante y se toma el valor promedio despreciando el efecto de desaceleración.
- Los semáforos solo tienen rojo y verde. [6]

II-C. Análisis de los factores de ajuste por utilización de carril en intersecciones semaforizadas de Bogotá D. C.

Este artículo está basado en el planteamiento metodológico desarrollado en el Manual de Capacidad de Carreteras de Estados Unidos (HCM - Highway Capacity Manual), de la Transportation Research Board (TRB), para el análisis de capacidad y niveles de servicio en intersecciones semaforizadas, asociado al factor de ajuste por utilización de carril (fLU), que corresponde a uno de los once factores de ajuste propuestos en la metodología de cálculo, en el módulo de intensidades de saturación.

La estimación del factor fLU plantea la definición de una metodología teniendo en cuenta las condiciones operacionales de intersecciones semaforizadas en Bogotá D. C. a partir del análisis de las corrientes vehiculares, que incluye caracterización vial y del tránsito, con base en

muestreos estadísticos, toma y procesamiento de información de campo y análisis de datos.

El estudio establece, entre otros aspectos, ecuaciones que permiten obtener datos referenciales para la determinación de factores de ajuste por utilización de carril en vías de Bogotá en función de las tipologías de los accesos y el volumen vehicular prevaleciente para el análisis de intersecciones semaforizadas; por ejemplo, para el caso específico de vías con accesos de dos carriles directos (2CCD) la ecuación básica determinada fue $y = -3,03E-08X^2 + 3,44E-05X + 0,888988$, con coeficiente de correlación igual a 1,0, donde la variable dependiente y corresponde al factor fLU y la variable independiente X es el volumen en vehículos mixtos/hora, ecuación considerada estadísticamente significativa.

Finalmente, se presenta el análisis comparativo de los factores de ajuste por utilización de carril estimados en el estudio, comparando los valores recomendados por el HCM, sustentándose así las conclusiones y recomendaciones, de las cuales se extrae la validación de los factores recomendados por el HCM, y se propone utilizar para los proyectos de diseño y planeamiento semafórico los valores obtenidos en el estudio. El factor de ajuste por utilización de carril que propone el HCM versión 20002 toma como referencia el flujo de carril con el volumen vehicular más alto en función de la evaluación con los volúmenes vehiculares presentes en el grupo de carriles, basado en la siguiente formulación matemática:

$$f_{LU} = \frac{v_g}{(v_{g1} * N)} \quad (3)$$

En donde:

vg : volumen vehicular sin ajustar para el grupo de carriles (veh/hora).

vg1: volumen vehicular sin ajustar en el carril con el volumen vehicular más alto del grupo de carriles (veh/hora).

N: número de carriles en el grupo de carriles. [7]

II-D. Simulación De Escenarios De Tráfico Vehicular Para La Ciudad De Bogotá

Los habitantes de Bogotá constantemente sufren debido a la incomodidad en el servicio de transporte público y los largos tiempos requeridos para su desplazamiento. La poca efectividad de las soluciones que actualmente se establecen para mejorar la movilidad es evidente Simulación Microscópica.

La simulación microscópica es aquella que pretende entender y simular individuos particulares dentro de un ambiente macroscópico. Entre más detallado es el comportamiento que se simular aumentan las variables a que afectan a este. Simular este tipo de escenarios exige que el comportamiento de cada individuo sea constante y de baja entropía, ya que al haber mayor probabilidad de cambio entre los individuos el ambiente será caótico e inestable.

Cada entidad definida en los simuladores microscópicos tiene su modelo matemático que logre modelar de forma precisa su comportamiento. Estos modelos pueden ser, lineales, exponenciales o logarítmicos.

$$\frac{dv}{dt} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s * (v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right]$$

$$s * (v, \Delta v) = s_0 + \max \left[0, \left(vT + \left(\frac{v \Delta v}{2\sqrt{ab}} \right) \right) \right] \quad (4)$$

La simulación Macroscópica a diferencia de la simulación microscópica, este tipo de simulación no precisa de tantos parámetros para calcular los datos que requiere para simular. Este método de simulación, a pesar de la escases de contenido e información del individuo, logra a través de promedios dar solución al mismo problema, simular un flujo de tráfico vehicular. Se observa que, para describir un modelo macroscópico, es necesario sustentarse en los modelos microscópicos para poder hallar los valores promedio de las variables. Para esto es posible utilizar método de estimación estadística.

Entre los modelos de simulación macroscópica se encuentra el modelo de asignación de equilibrio, este modelo pretende analizar dentro de todo el

ambiente la ruta más económica desde un punto **a** hasta un punto **b**.

Convertida para el flujo vehicular en:

$$v = \frac{x}{t} \quad (5)$$

Donde:

$$\bar{v}_e = \frac{\bar{x}}{\bar{t}} \quad (6)$$

ve: Es la velocidad media espacial

t: Es el intervalo de tiempo promedio en el flujo.

x: Es el espaciamiento promedio en el flujo Es la relación de espacio que recorre un vehículo en un intervalo de tiempo.

Densidad (p) Es el inverso del espaciamiento promedio: La cantidad de vehículos que se concentran en un lugar.

$$\rho = \frac{1}{\bar{x}} \quad (7)$$

Flujo (q) Es el inverso del intervalo promedio del tiempo

$$q = \frac{1}{\bar{t}} \quad (8)$$

III. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Diferentes métodos de simulación propuestos por los autores y muchos más se podrán encontrar, a continuación se mostrara el modelo seleccionado. Basados en la teoría de colas es el estudio de una técnica basada en la Investigación de operaciones para solucionar problemas que se presentan en las situaciones en las cuales se forman turnos de espera o colas para la prestación de un servicio o ejecución de un trabajo [8] Una Cola es una línea de espera y la teoría de colas es una colección de modelos matemáticos que describen sistemas de líneas de espera particulares o de sistemas de colas. Los modelos sirven para

encontrar un buen proceso entre costes del sistema y los tiempos promedio de la línea de espera para un sistema dado. Se debe tener claro los conceptos para así poder definirlo en una intersección vial con semáforos de doble sentido.

Clientes: Término usado en un sistema de colas para referirse a elementos en cola, en este caso automóviles.

Llegadas: Es el número de clientes que llegan a las instalaciones de servicio. Que en el caso que estamos trabajando serían los semáforos los cuales son donde llegan los automóviles.

El tiempo que transcurre entre dos llegadas sucesivas en el sistema de colas se llama tiempo entre llegadas, este tiempo tiende a ser muy variable.

La cantidad de llegadas por unidad de tiempo se denomina tasa media de llegadas.

$$\lambda$$

El tiempo de llegadas de los automóviles es

$$1 = \lambda$$

- Si la tasa media de llegadas es automóviles por hora

$$\lambda = 12$$

- El tiempo de llegada es Horas o minutos.

$$1 = \lambda \frac{1}{12} = 0,08$$

(9)

- Tiempos de servicio: Este término se usa para designar la capacidad de servicio, el servicio puede ser brindado por un servidor o por servidores múltiples. Duración del tiempo de verde en cada semáforo. Esta depende de los ciclos de programación de cada semáforo.
- Línea de espera: Es la cola formada en cada una de las intersecciones del circuito.
- Servidor: Es la cantidad de servidores de que disponemos. Cada uno de los Semáforos que existen en el circuito. Se determina también que las ocurrencias aleatorias de un tipo especial como este caso ya que la cantidad

de carros que llegan es aleatoria, pueden describirse a través de una distribución discreta de probabilidad bien conocida, la distribución de Poisson.

El cual se llama así por su creador el Francés Simeón Dennis Poisson Esta distribución de probabilidades fue uno de los múltiples trabajos matemáticos que Dennis completó en su productiva trayectoria. Esta distribución es muy frecuente en los problemas relacionados con la investigación operativa, sobre todo en el área de la gestión de colas. [9]

$$P(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (10)$$

Donde:

- $P(k)$: probabilidad de k llegadas por unidad de tiempo.
-

λ : *tasamediadellegadas*

- $e = 2,7182818$

Para este caso de la intersección:

$$P(k) = \frac{0,08((2,718)^{0,08})}{20!} = 2,432,902,008 \quad (11)$$

IV. DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN

El modelo de la simulación se implemento en el software Arena®, Por su gran versatilidad y amplitud en herramientas a la hora de diseñar y modelar sistemas estocásticos, desarrollado y distribuido por Rockwell Automation Technologies, Inc.










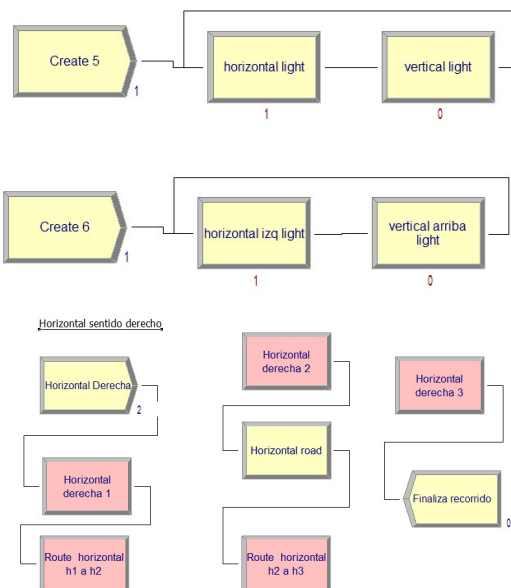
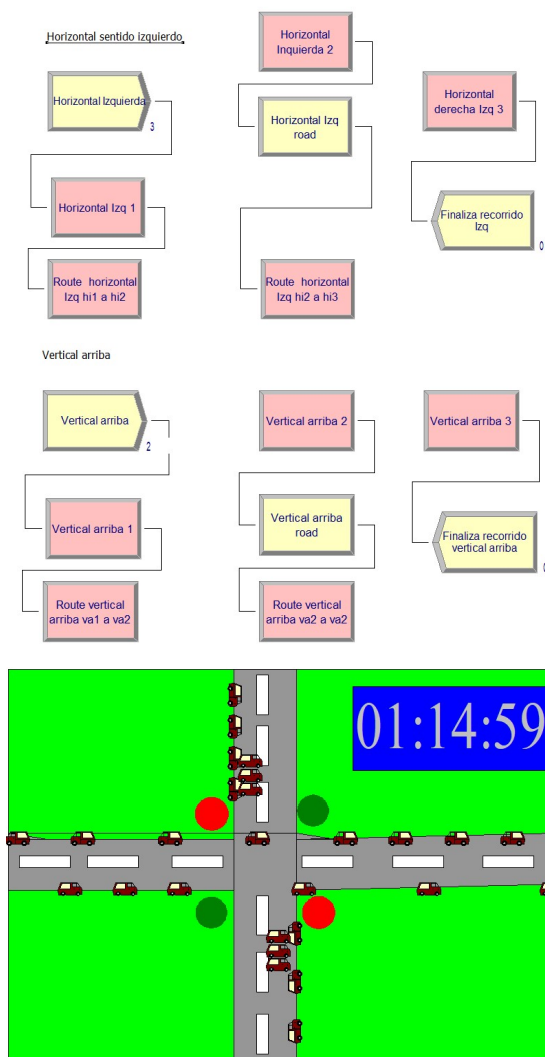
Elemento	Imagen	Descripción
Create module		Punto de partida de toda simulación. Permite crear entidades en base a un tiempo definido de llegada/salida.
Dispose module		Punto final de la simulación del sistema. En este punto se depositan las entidades al final de la simulación.
Process		Representa un proceso, incauta, procesa y libera las entidades.
Decide		Toma de decisiones de las entidades las cuales pueden estar basadas en una o más condiciones.
Assign		Este módulo se utiliza para asignar nuevos atributos a las entidades entrantes.
Hold		Genera una cola hasta que una condición específica se cumpla.
Signal		Este módulo envía un valor de señal a cada módulo de retención para liberar un número específico de entidades.
Route		El módulo Route transfiere una entidad a una estación específica en un tiempo determinado.
Station		Define una estación o conjunto de estaciones que corresponde a una ubicación física o lógica donde se produce el procesamiento.

Ilustración 2 Elementos del software Arena® utilizados en el sistema Modelo y simulación de una intersección Sebastian Puerto Hernández, Sergio Forero Forero.





Fuente: imagen Propia.

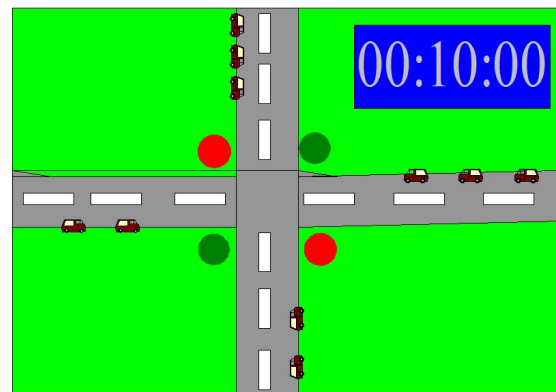
V. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

El primer experimento realizado fue dejar el tipo de variable random(Exp), donde enviaba una cantidad de carros diferente cada minuto y segundo por lo que dio un tiempo aproximado de 20 segundos en luz verde y roja, ya que existía un encolamiento muy notorio.

El segundo fue dejar el tipo de variable tomando como valor de críticos durante la hora de máxima demanda de tránsito en las calles A y B son de 300 y 250 vehículos, respectivamente, para ello se tomaron 50 segundos de 60, $T_a + T_b = 50$

segundos (tiempo total de la luz verde de ambos sentidos) entonces $T_a = 31$ segundos y $T_b = 50 - 31$ segundos = 19 segundos.

Lo que nos llevó a una tercer prueba $60/5 = 12$, para un total de 720 carros por hora. Cada 2,5 Seg se encola un carro. Y el mismo tiempo es utilizado para salir con luz verde.



Se encontró un principal detenimiento en la implementación haciendo simulaciones cuando existen carros varados, o causa que hace tener el tráfico, hace falta un modelo de análisis macroscópico y una simulación de alto costo computacional

VI. CONCLUSIONES

En los diferentes proyectos de investigación se usan modelos de simulación los cuales permiten conocer los de promedios de los posibles resultados que se obtendrían en estas, sin la necesidad de realizar inversiones de mayor presupuesto para la finalidad del proyecto.

Permite la identificación de modelos con posibles soluciones el cual se pueden evaluar en distintos escenarios que nos enfrentamos diariamente. El aprendizaje de nuevas herramientas diferentes a las convencionales para hacer estudios en proyectos que lo requieran.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- 1 Á. G. Sánchez, «Introducción a la simulación,» Noviembre de 2006 .
- 2 Arena, «Arena Software de Simulación,» Rockwell Automation, 2017. [En línea]. Available:

<https://www.arenasimulation.com/what-is-simulation/discrete-event-simulation-software>.

- 3 H. S. C. A. L. S. D. A. Pedraza Martínez Luis Fernando, «Sistema de comunicación TCP/IP para el control de una intersección de tráfico vehicular,» Ingeniería, Investigación y Tecnología Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, October–December 2013. [4] E. J. S. A. MAURICIO GONZÁLEZ RESTREPO, «APLICACIÓN DE TEORIA DE COLAS EN LOS SEMAFOROS PARA,» UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA , PEREIRA, RISARALDA, Noviembre 2010.
- 5 C. G. R. D. V. C. Victor Gradinescu, «Adaptive Traffic Lights Using Car-to-Car Communication,» IEEE, Dublín, Irlanda, 22-25 de abril de 2007.
- 6 J. A. C. Cáceres, «Simulación microscópica del tráfico urbano y su aplicación en un área de la ciudad de Zaragoza.,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2004.
- 7 R. J. P. Lindarte1, «● Análisis de los factores de ajuste por utilización de carril en intersecciones semaforizadas de Bogotá D. C.,» INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN VOL. 30 No. 1, Bogotá, ABRIL DE 2010.
- 8 A. R. Rodriga Barbosa, «Adaptado de Teoría de colas de espera Modelo integral de aplicación para la toma de decisiones».
- 9 W. Lopez, «Modulo sobre la distribución de Poisson».