Estudio de Viabilidad en Términos de Teoría de Colas de una Estación de Peaje Mediante Simulación de Montecarlo.

Resumen– - La simulación es una herramienta muy utilizada en ingeniería para realizar estudios económicos basados en modelos estadísticos, matemáticos y de cualquier otra índole. El objetivo del presente estudio de simulación en particular, fue la evaluación del comportamiento actual de la estación de peajes Las Flores ubicada en la Autopista de la Sabana en la vecindad de la ciudad de Sincelejo (Colombia) y que ha venido registrando en su sistema de atención tres tipos de usuarios distintos (transporte liviano, transporte semipesado y pesado) con llegadas estadísticamente diferentes. En el estudio se incluye una nueva alternativa de atención, la caseta electrónica. La cual tiene muy poco tiempo de instalación y se requiere evaluar su comportamiento comparándolo con las dos casetas tradicionales. Se concluye mediante el estudio de simulación, que las casetas manuales no reportan normalmente altas densidades de flujos en colas, mientras que la caseta electrónica si presenta esta dificultad debido al poco conocimiento y capacitación de la herramienta software, la poca cultura ciudadana al respecto y que la solución temporal sería que la caseta electrónica funcione como manual mientras se superan las dificultades logísticas.

Palabras claves— Simulación, Montecarlo, Optimización, Modelamiento.

I. INTRODUCCIÓN

La simulación es una herramienta muy eficaz en la toma de decisiones [1], tanto así que su espectro de trabajo y de aplicación, prácticamente está definido por la robustez del equipo computacional del que se cuenta. Sus campos de aplicación han trascendido a la física [2], la química [3], las finanzas [4], administración [5], la teoría de colas [6] y tantas áreas más [7].

Es común que para muchas de las labores cotidianas nos encontremos con una cola o fila a la espera de adquirir un producto o servicio. Al suceder, normalmente nos enfrentamos a la dinámica de éstas, que por lo general suelen ser poco gratas y en ocasiones fastidiosas e improductivas. Teniendo en cuenta que el tiempo es una de las variables más importante, y que la espera por colas y demoras es una de las peores experiencias que podemos enfrentar como usuarios, se hace importante evaluar las posibles causas de éste fenómeno.

Por lo anterior, es necesario buscar un equilibrio entre la capacidad de atención y el tiempo de servicio; constantemente quien brinda el servicio debe estar evaluando las distintas variables asociadas a las colas para tomar decisiones enfocadas a la optimización del sistema. Es así como qué en el siguiente escrito se plantea un estudio de simulación aplicado a una caseta de peajes en la ciudad de Sincelejo, utilizando técnicas probabilísticas de Montecarlo, encontrando los modelos estadísticos para cada función de probabilidad utilizando software estadístico y aplicando las teorías de validación de datos para la simulación [8] de modo que se pueda establecer si la capacidad que se posee la caseta de peaje es suficiente para ofrecer un servicio eficiente, y estudiar los comportamientos llamados cuellos de botella presentando insatisfacción de los clientes por los excesivos tiempos de espera.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para desarrollar el modelo de simulación, primero se definió el sistema a evaluar [9]. Para ello se realizaron algunas visitas técnicas a la estación de peaje, donde se tomaron los datos relacionados con el número de vehículos por unidad de tiempo que eran atendidos en cada caseta y sus respectivos tiempos de atención.

En total se tomaron 560 horas registradas en los documentos históricos como muestra de evaluación, más 140 horas de trabajo de campo, donde se consignaron en los formatos establecidos los tiempos de llegada y de atención por cada vehículo de forma rigurosa. Estos tiempos luego fueron cargados en dos software estadísticos: Stat Fit y XLSTAT, los cuales arrojaron las siguientes distribuciones de probabilidad como soluciones, que más tarde se utilizarían para modelar el sistema completo y verificar su comportamiento y futuros cambios.

TABLA I. MODELOS DE LAS VARIABLES

Tipo de horario	**Variable Modelada**	**Media**
Horas Pico	Tasa de llegadas carros livianos	Exponencial (55 carros/día)
	Tasa de llegadas carros semipesados	Exponencial (3.4 minutos/carro)
Hora Valle	Tasa de llegadas carros livianos	Exponencial (3.4 minutos/carro)

En cuanto a la llegada de los carros pesados, los técnicos adscritos al peaje entregaron una matriz de datos de 28x20, con el número de carros pesados por hora que eran atendidos en cada caseta de peaje. El modelo estadístico ajustado a estos datos pertenece a una distribución normal con media de 4,358 minutos/carro y una desviación estándar de 2,863. El modelo matemático establecido sería [8]:

$$X = \mu + \sigma * \left(\sum_{i=1}^{12} R_i - 6 \right) \qquad (1)$$

Donde μ es la media, σ la deviación estándar y R es un número aleatorio entre 0 y 1 que ha pasado las pruebas estadísticas de aleatoriedad. [10].

En cuanto al modelado de la distribución de probabilidad que representa los tiempos de atención de las casetas con pago electrónico, se realiza el mismo procedimiento de la distribución anterior, esta vez encontrando que la distribución que más se ajusta a los 280 datos muéstrales es la distribución logística, utilizando el modelo matemático:

$$X = \mu + s + Ln\left(\frac{R}{1-R} \right) \qquad (3)$$

Donde μ es la media y s la deviación estándar.

Con el modelamiento de las variables de interés, se procedió a generar los escenarios correctos que permitiesen emular el comportamiento dinámico de la caseta de peajes, de modo que se pudiesen plantear nuevas posibilidades de mejora. Estos escenarios se generan para un servicio de 24 horas del día y 30 días al mes, debido a que una estación de peaje siempre se encuentra en funcionamiento. Por lo que se determina que para cada escenario se requieren por lo menos 720 números aleatorios para modelar una sola variable aleatoria, es decir, que la muestra total de los números generados para alimentar el modelo completo supera los cien mil datos, a sabiendas que el modelado de la distribución normal (2) requiere doce datos por cada variable generada en cada uno de los posibles escenarios. Esto ya refleja la necesidad de utilizar máquinas potentes para la realización de la simulación y la utilización además de software abierto (Excel, por ejemplo), ya que se puede modelar para una mayor cantidad de escenarios.

La validación de los escenarios y sus datos aleatorios se hicieron a través del test de Kolmogorov Smirnov y la prueba de bondad de ajuste (rachas o series), tomando un máximo valor de significancia de 0.05 para ambas pruebas, para verificar que los números provienen de una muestra uniforme y estadísticamente independiente, de modo que puedan ser válidos para un estudio de simulación emulando escenarios aleatorios a través de modelos determinísticos.

Los horarios considerados picos, por los mismos técnicos de la caseta de peaje, fueron definidos para los horarios de 7 a 9 am, 12 a 2 pm y 6 a 7 pm, horario que concuerda con la mayor capacidad de tránsito en la zona.

Luego se calcula la capacidad del servicio de las casetas de la estación de peaje, teniendo en cuenta que existen 5 casetas, 3 de pago con modalidad manual y 2 de pago con modalidad electrónica y sabiendo que el tiempo de servicio de las 3 casetas manuales se modelan con la misma variable aleatoria exponencial y la misma tasa de atención.

Al igual que sucede para las casetas de pago electrónico, sus tiempos de servicio para ambas casetas se modelaron con la misma variable aleatoria logística definida con parámetros iguales en ambas casetas. Por lo que para cada caseta se modelan, en primera, instancia los números aleatorios que se utilizaran para el modelamiento de la función de probabilidad representativa de cada caseta, sabiendo que la variable aleatoria se encuentra en minutos por cliente. Luego se calculó la cantidad de vehículos que puede atender cada estación de peaje en cada hora del día representado en clientes por hora.

Ya calculadas las capacidades de atención por hora de cada caseta sean manuales o electrónicas, se calcula el total de clientes agregados que pueden atender las casetas manuales y las casetas electrónicas respectivamente. Luego se compara el total de vehículos que llegan a la estación de peaje por hora que no tienen tarjeta de pago electrónico con la capacidad de atención de las casetas por hora para determinar si existiría cuello de botella en cada hora respectivamente. De igual forma se realiza con el total de vehículos que llegan a la estación de peaje y que poseen tarjeta de pago electrónico con la capacidad de servicio por hora de las casetas de pago electrónico.

Incluso, al modelo de simulación se le incluyeron las tarifas implantadas, de manera que se calcula el recaudo de dinero por tipo de vehículo y por hora, multiplicando el número total de cada tipo de vehículo que llega a la estación de peaje por su respectivo valor según sea dicho tipo. De manera que podríamos utilizar éste mismo modelo para realizar proyecciones a futuro y definir la viabilidad en términos financieros del sistema.

Por último, Para la realización del análisis de sensibilidad y estimar el número de corridas óptimas que son necesarias para que el sistema se estabilice, es necesario, en primera instancia determinar en cada muestra de las variables aleatorias que representan las características del sistema, su correspondiente valor paramétrico, utilizando el modelo matemático:

$$n = \frac{\sigma^2 \left(Z_{\alpha/2} \right)^2}{k^2} \qquad (3)$$

Utilizado para estimar el número de corridas óptimas para la estabilización del sistema, para muestras mayores a 30 [11]. Siendo σ_2 la varianza de la distribución a simular, $Z_{\alpha/2}$ el estadístico normal estándar para cierta α, en este caso α=97.5% para mayor exactitud, y k la desviación absoluta máxima permitida sobre la media de la distribución a simular, que en este caso se estima en 5-sigmas.

Se obtuvo como mayor resultado entre todas las distribuciones de la que componen la simulación del sistema, que deben realizarse 125 corridas como mínimo para lograr la estabilización del sistema.

III. Resultados y discusiones

Con los resultados finales de la simulación fue posible confirmar que las casetas electrónicas no son suficientes para abordar la demanda de clientes que llegan a la estación de peaje y poseen tarjeta para pago electrónico, ya que aproximadamente el 25% de las horas de servicio durante cada mes existe un cuello de botella o hay demoras en el sistema. Ahora en relación con las casetas manuales es posible decir que si son suficientes porque solo cerca del 3% de las horas del mes existe cuello de botella en estos servidores. Es decir, es 8 veces más probable que se presenten colas demasiado grandes en las casetas electrónicas que en las manuales, esto se debe sobre todo a que los tiempos de atención siguen siendo elevados para los servicios electrónicos. Por lo que se sugiere que a través de entrenamiento personalizado, o de turnos más cortos, o de utilizar más de un servidor o incluso estudiar más profundamente los comportamientos de los servidores para intentar reducir de manera importante los tiempos de atención. En la figura 1 se muestran los tiempos de atención luego de 20000 horas de trabajo continuo, la cercanía de los puntos muestra el área de tiempos de cada caseta. Los escasos puntos azules pertenecen a la caseta manual, esto quiere decir que los tiempos de la caseta electrónica son muy superiores a la manual, contrario a lo que esperaba la administración.

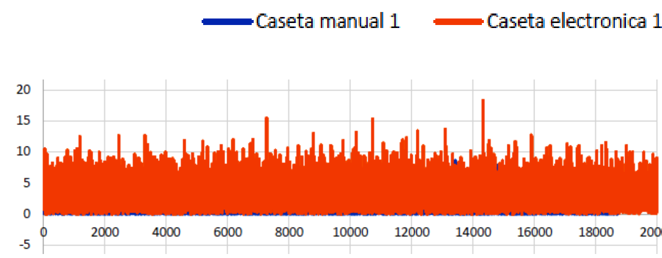

Fig. 1 Tiempos promedios de atención de las casetas manuales y electrónicas

Los tiempos de atención de las casetas manuales frente a los tiempos de atención de las casetas electrónicas pueden confirmar lo planteado anteriormente, dado que los tiempos de atención de las casetas manuales tienen una media inferior a la de los tiempos de atención de las casetas electrónicas, lo cual no debería presentarse en forma ideal. En la figura 2 se observa la comparación de los cuellos de botella electrónicos y manuales, y el área bajo la curva es cuatro veces mayor, por lo que evidentemente la caseta electrónica depara los principales problemas de movilidad y de retrasos por la presencia de colas excesivas.

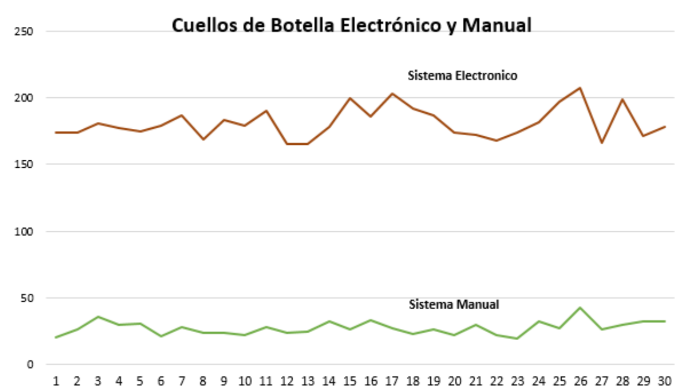

Fig. 2 Comparación de los cuellos de botella para los sistemas electrónicos y manuales.

En la figura tres, se muestra el número de carros atendidos durante un mes de simulación, para los diferentes tipos de vehículos: livianos, semipesados y pesados.

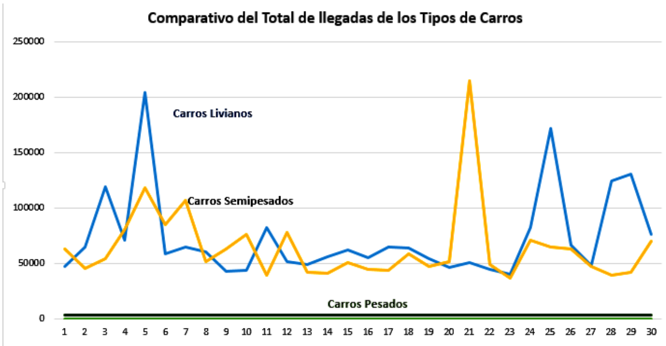

Fig. 3 Comparación mensual de las llegadas para los sistemas electrónicos y manuales

IV. CONCLUSIONES

En el estudio de simulación se evidencia que las técnicas probabilísticas de Montecarlo son ideales para éste tipo de aplicaciones, debido a su robustez computacional, fácil utilización y óptimos resultados basados en datos históricos. En las casetas de peajes, se muestra con mucha precisión que las casetas manuales tienen un comportamiento óptimo, y que no requieren reestructuración o variaciones. Mientras que las casetas electrónicas tienen muchos problemas en los tiempos de atención, dichos tiempos son muy altos y provocan altas colas, que a la postre podrían representaría problemas muy serios a futuro, pues la comunidad y los usuarios podrían manifestar su molestia.

Éste estudio representa una de las principales ventajas de la simulación como herramienta, pues al contrastar la información histórica contenida en las fichas técnicas y al utilizar modelos determinísticos para representar escenarios aleatorios futuros, se pueden generar distintos escenarios como solución al problema actual.

V. REFERENCIAS

[1] Andres, B., Sanchis, R., & Poler, R. (2016). Modelado y simulación de la cadena de suministro con AnyLogic®. Modelling in Science Education and Learning, 9(1), 57-72.

[2] Rummukainen, K. (2008). Monte Carlo simulations in physics. Department of physical sciences, University of Oulu.

[3] Alas, S. J. (2014). effect of inert sites in CO+ O-2 reaction on Pt (100) surface by dynamic montecarlo simulation. Revista mexicana de ingeniería química, 13(3), 811-821.C. Serdio Sánchez, “Educación y envejecimiento: Una relación dinámica y en constante transformación”. Educación XXI, vol. 18 no. 2, pp. 237-255, 2015.

[4] Urzúa, M. I. G. (2015). Proyección del ratio de pago de dividendos a través de la simulación de Montecarlo. Horizontes empresariales, 8(1), 9-22.

[5] Machain, L. (2016). Simulación de modelos financieros. Alfaomega.

[6] Brémaud, P. (2013). Markov chains: Gibbs fields, Monte Carlo simulation, and queues (Vol. 31). Springer Science & Business Media.

[7] Barbat, A. H., Vargas, Y. F., Pujades, L. G., & Hurtado, J. E. (2016). Evaluación probabilista del riesgo sísmico de estructuras con base en la degradación de rigidez. Revista Internacional de Métodos Numéricos para cálculo y diseño en Ingeniería, 32(1), 39-47.

[8] Bú, R. C. (1996). Simulación: un enfoque práctico. Editorial Limusa.

[9] Esfandiari, R. A., & Dunna, M. G. (1996). Simulación y analísis de modelos estocásticos/por Mohammad Reza Azarang Esfandiari y Eduardo García Dunna (No. 519.5 R3.).

[10] C Nieves Hurtado, A., & DOMÍNGUEZ SÁNCHEZ, F. C. (2009). Probabilidad y Estadística para Ingeniería: Un enfoque moderno. Mexico: Mc Graw Hill..

[11] Avelló, A. J., Gil, M. C., & García, J. M. G. (2015). Simulación de procesos y aplicaciones. Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid.