
TRABAJO PRÁCTICO INTEGRADOR - CRITERIOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE TRÁFICO MEDIANTE CONFIGURACIÓN DE TIEMPOS DE SEMAFORIZACIÓN

María Luz Celiz
Cátedra Simulación
UTN - FRRO
Zeballos 1341, S2000
marialuzceliz888@gmail.com

Santiago Cancio
Cátedra Simulación
UTN - FRRO
Zeballos 1341, S2000
santiago.cancio96@gmail.com

Iván Altamirano
Cátedra Simulación
UTN - FRRO
Zeballos 1341, S2000
ivan.krachko99@gmail.com

Ariel Buchhamer
Cátedra Simulación
UTN - FRRO
Zeballos 1341, S2000
arielbuchhamer1@gmail.com

Agustín Rojas
Cátedra Simulación
UTN - FRRO
Zeballos 1341, S2000
agustinrojas99@hotmail.com

27 de octubre de 2023

ABSTRACT

Este estudio, realizado por estudiantes de la UTN Facultad Regional Rosario como parte de la cátedra de Simulación, se enfoca en analizar el comportamiento de la congestión en un bulevar y evaluar la efectividad de la implementación de semáforos como medida preventiva de accidentes.

1. Introducción

En este estudio, nos adentramos en el corazón de la problemática del tráfico en un escenario real, proponiendo un modelo de simulación detallado para una sección específica del Boulevard Rondeau, ubicado en la ciudad de Rosario, Santa Fe, Argentina. Nuestra investigación se centra en el desafío constante que enfrentan las áreas urbanas densamente pobladas: la congestión del tráfico y la seguridad vial. Más específicamente, buscamos analizar el impacto de la implementación de semáforos en esta sección del boulevard, con la intención de demostrar que esta medida puede lograr una reducción efectiva del flujo vehicular y, de manera igualmente crucial, mejorar la seguridad en esta área vital de la ciudad.

La congestión del tráfico es un problema global que afecta la calidad de vida de las personas y tiene importantes implicaciones económicas y medioambientales. En este contexto, los semáforos juegan un papel esencial, ya que su implementación y coordinación pueden tener un impacto significativo en la fluidez del tráfico y, por ende, en la seguridad vial. Nuestra investigación se enfoca en la relevancia de la coordinación semafórica en arterias viales de alta circulación y explora los beneficios que se derivan de una adecuada sincronización de los tiempos de los semáforos para la implementación del concepto de "onda Verde".

Para llevar a cabo este estudio, hemos aprovechado la potencia del software de simulación Anylogic, en particular, haciendo uso de su librería Road Traffic". Esto nos ha permitido crear un modelo preciso y realista de la sección del Boulevard Rondeau en cuestión, en el cual hemos podido evaluar diversas variables y escenarios de manera controlada y precisa.

En las páginas que siguen, presentaremos los resultados de nuestro estudio de simulación, que arrojarán luz sobre la efectividad de los semáforos como herramienta para mejorar la seguridad vial y la gestión del tráfico en esta importante arteria urbana.

2. Simulación del Bv. Rondeau

A continuación se desarrollará el estudio siguiendo la metodología de los '10 pasos de la simulación' detallando en cada paso los conceptos y objetivos más importantes.

2.1. Definición del Sistema Bajo Estudio

El primer paso crucial en el proceso de simulación consiste en definir de manera rigurosa y detallada el sistema que pretendemos modelar. En este caso, nos enfocamos en un tramo específico del Bulevar General José Rondeau, localizado entre las calles Triunvirato y Dr. Nicolás Herrera, en la ciudad de Rosario, Argentina. El núcleo de nuestra simulación se centra en el análisis del comportamiento del tráfico en este segmento, con un énfasis particular en la evaluación de la eficacia de la .onda verdez su impacto en la congestión vehicular y la seguridad de la zona.

Para abordar esta tarea de manera efectiva, es fundamental establecer supuestos y definir claramente las variables de decisión que influirán en el funcionamiento de la simulación. Estas variables incluyen la duración de los ciclos de los semáforos, la cantidad de semáforos presentes en el tramo, las velocidades máximas permitidas, la velocidad promedio de los vehículos en circulación, la cantidad de automóviles en tránsito, entre otros aspectos críticos. Asimismo, debemos considerar las interacciones complejas entre estas variables y cómo se influyen mutuamente. Por ejemplo, la sincronización de los semáforos puede tener un impacto directo en el flujo vehicular, la velocidad de los vehículos puede influir en la congestión y eventos inesperados, como accidentes, pueden perturbar significativamente el flujo de tráfico.

También es fundamental tener en cuenta las limitaciones y suposiciones inherentes al modelo, ya que estas desempeñarán un papel esencial en la precisión y validez de la simulación.

Para cumplir con los objetivos de esta investigación de simulación, nuestro equipo de trabajo se compromete a recopilar los datos esenciales necesarios para definir un modelo que sea un reflejo preciso del sistema real. Esto garantizará que nuestra simulación sea representativa y útil para la toma de decisiones informadas. Posteriormente, haremos uso de software especializado para llevar a cabo la simulación del sistema, lo que nos permitirá analizar los resultados obtenidos y, en última instancia, tomar decisiones basadas en evidencia con el objetivo de mejorar la gestión del tráfico y la seguridad en esta área crítica de la ciudad.

2.2. Generación del Modelo de Simulación Base

El segundo paso fundamental en nuestro estudio de simulación implica la creación del modelo de simulación base. Esta etapa es crucial para establecer un punto de partida desde el cual podremos explorar y analizar en detalle el comportamiento del tráfico en el tramo del Boulevard Rondeau en Rosario.

Es importante tener en cuenta que en esta fase inicial no buscamos crear un modelo extremadamente detallado, ya que se requiere una mayor cantidad de datos estadísticos para comprender plenamente cómo interactúan las variables de decisión que influyen en el tráfico del boulevard. En lugar de ello, nos enfocamos en construir un modelo lo suficientemente sólido como para capturar los aspectos esenciales del sistema y permitirnos realizar experimentos virtuales que arrojen luz sobre su dinámica.

El enfoque seleccionado para nuestro modelo de simulación base es el modelo basado en agentes, que nos permite representar de manera efectiva la interacción entre los vehículos en un entorno específico. En este contexto, los vehículos son los actores clave que desempeñarán el papel de agentes, y su comportamiento y movimientos serán modelados de manera realista.

Para enriquecer nuestro modelo, incorporamos variables aleatorias que representan eventos imprevistos, como la entrada de vehículos al boulevard, la velocidad de los vehículos y la posibilidad de accidentes. Estas variables aleatorias se caracterizan por sus distribuciones de probabilidad, lo que añade un elemento de realismo y variabilidad al modelo.

Además, para crear una representación visual precisa de la zona en estudio, realizamos una investigación detallada para obtener información relevante. Gracias a la 'Figura 1' obtenida a través de Open Street Map, construimos un modelo inicial que se asemeja al tramo del boulevard bajo análisis, como se muestra en la 'Figura 2'.



Figura 1: Captura del bv. Rondeau en Open Street Map.

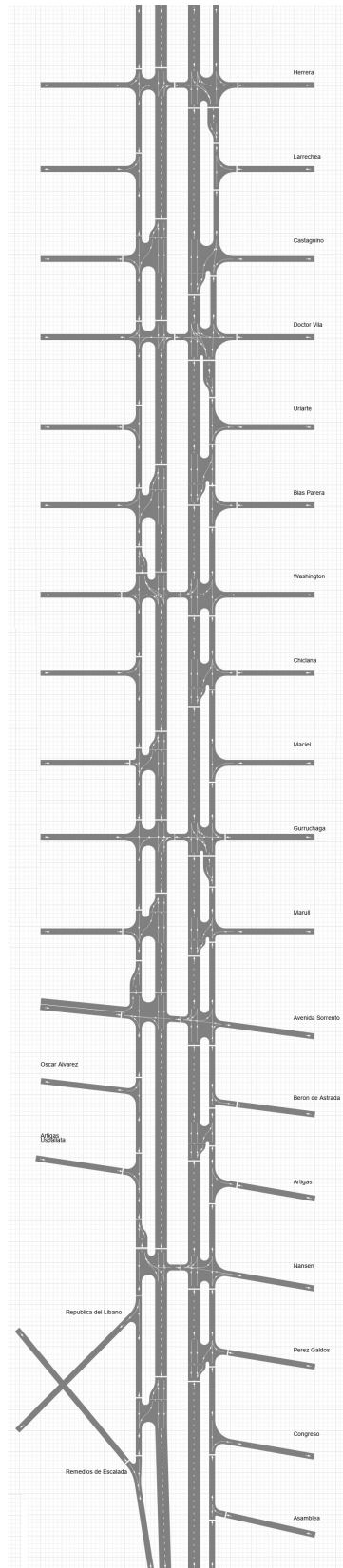


Figura 2: Modelo inicial.

Este modelo incluye los carriles principales y secundarios, las intersecciones con calles transversales y las direcciones de desplazamiento de los vehículos. Además, se identifican los puntos donde los vehículos pueden efectuar giros y cambiar de carril, lo que contribuye a una representación completa y detallada del sistema.

En resumen, el segundo paso de nuestro estudio de simulación nos ha llevado a la creación de un modelo base que servirá como cimiento sólido para futuros análisis y experimentos virtuales destinados a comprender a fondo el tráfico en el Boulevard Rondeau y evaluar el impacto de la gestión de semáforos en esta importante arteria vial.

2.3. Recolección y Análisis de Datos

El tercer paso de nuestro estudio de simulación se enfoca en la recolección y análisis de datos esenciales para nutrir nuestro modelo y permitir la ejecución de simulaciones realistas y representativas. Paralelamente al proceso de generación del modelo base, hemos comenzado la recopilación de información estadística relacionada con las variables aleatorias que conforman el modelo. Estas variables son fundamentales para la simulación, ya que influyen en el comportamiento de los vehículos y la operación de los semáforos en el tramo del Boulevard Rondeau en estudio.

Para llevar a cabo esta recopilación de datos, hemos determinado las distribuciones de probabilidad asociadas a cada una de las variables aleatorias necesarias. A continuación, presentamos una descripción detallada de estas variables de entrada y salida:

Variables de entrada:

Vehículo:

- Longitud del vehículo: Esta variable se rige por un valor constante que determina las dimensiones de los vehículos que circularán en el tramo.
- Velocidad inicial: La velocidad de partida de los vehículos se modela mediante un valor constante, reflejando las diferencias de velocidad al comienzo del viaje.
- Velocidad recomendada: La velocidad a la que se espera que los vehículos se desplacen inicialmente se establece mediante una distribución uniforme, reflejando un rango de velocidades posibles.
- Aceleración máxima: La aceleración máxima que los vehículos pueden experimentar se modela con un valor constante.
- Desaceleración máxima: La máxima desaceleración posible de los vehículos se describe a través de un valor constante.

Semáforo:

- Fase: Modelamos las fases de los semáforos que incluyen 3 posibles estados. Cada fase se asocia con su respectivo tiempo de duración.
 1. Verde: Vía libre
 2. Amarillo: Precaución
 3. Rojo: Detenerse
- Tiempo entre fases en segundos: El tiempo entre cada cambio de fase de los semáforos se establece a través de el reparto de ciclo. Por ejemplo, si un ciclo dura 91 segundos, el reparto podría ser: 50 segundos de verde, 3 de amarillo y 38 de rojo, para un semáforo. Reflejando la variabilidad en la duración de las fases.

Entorno:

- Rango de arribo de vehículos por carril principal: Modelamos la llegada de vehículos al carril principal a través de una distribución poisson, ya que se utiliza comúnmente para modelar la llegada de eventos en un período de tiempo. Reflejando la variabilidad en la entrada de vehículos en este tramo.
- Rango de arribo de vehículos por carril secundario: Similar al carril principal, la llegada de vehículos al carril secundario se modela mediante una distribución poisson, teniendo en cuenta la variabilidad en la entrada de vehículos.

Variables de salida:

- Cantidad promedio de vehículos en el sistema: La cantidad promedio de vehículos en el tramo del Boulevard Rondeau se describe mediante una distribución uniforme, lo que nos permite evaluar cómo varía este indicador.

- Demora promedio de vehículos en el sistema: La demora promedio experimentada por los vehículos en el sistema se modela a través de una distribución uniforme, lo que nos permite analizar cómo varía este parámetro clave.

Estas distribuciones de probabilidad desempeñan un papel esencial en la simulación, ya que introducen variabilidad y realismo en el comportamiento de los vehículos y la operación de los semáforos. Con esta información en mano, estamos bien posicionados para continuar con el proceso de simulación y explorar el impacto de la gestión de semáforos en el tráfico y la seguridad del Boulevard Rondeau.

2.4. Generación del Modelo Preliminar

El cuarto paso de un estudio de simulación es la generación del modelo preliminar. En esta fase, se lleva a cabo la integración de la información derivada del análisis de los datos, los supuestos del modelo y todos los datos necesarios para lograr un modelo que se asemeje lo más posible a la realidad del problema en estudio.

Para llevar a cabo este proceso, primero, nuestro modelo comienza a ajustarse a la realidad. Esto implica establecer con precisión las múltiples trayectorias que un vehículo puede seguir mientras circula. Se identifican los carriles disponibles, las maniobras de giro permitidas, las intersecciones y las fases de los semáforos. Además, en este punto, incorporamos las variables previamente definidas, utilizando valores derivados de nuestra experiencia y conocimiento experto. Estos valores permiten que el modelo simule el comportamiento de los vehículos de manera más precisa.

Es importante destacar que los valores que nuestras variables de entrada pueden adquirir se determinan mediante nuestro juicio experto. Este proceso es crucial para asegurarse de que el modelo refleje de manera realista las condiciones y variables relevantes del problema.

Vehículo:

- Longitud del vehiculo en metros: 5
- Velocidad inicial en kilómetros/horas: 60
- Velocidad recomendada en kilómetros/horas: U(45,60)
- Aceleración máxima en metros/segundos: 1.8
- Desaceleración máxima en metros/segundos: 4.2

Semáforo:

- Fase:
 1. Verde: Vía libre
 2. Amarillo: Precaución
 3. Rojo: Detenerse
- Tiempo entre fases en segundos:
 1. Verde: 10
 2. Amarillo: 3
 3. Rojo: 10

Entorno:

- Rango de arribo de vehículos por hora por carril principal: 1000
- Rango de arribo de vehículos por hora por carril secundario: 250

Sin embargo, es importante mencionar que el análisis de las variables de salida se llevará a cabo en fases posteriores del estudio. Por lo tanto, en esta etapa, nos centramos en la configuración precisa del modelo y la generación de las condiciones iniciales.

Una vez completada esta etapa, nuestro modelo está preparado para someterse a su primera prueba: la verificación. En otras palabras, procedemos a compararlo con la realidad para determinar su nivel de concordancia. Este paso es esencial para garantizar que el modelo preliminar sea lo más preciso posible y pueda servir como una herramienta eficaz en el análisis y toma de decisiones relacionadas con el problema en estudio.

2.5. Verificación del Modelo

El quinto paso de un estudio de simulación es la verificación del modelo. En esta fase, se lleva a cabo un proceso fundamental para asegurar la precisión y confiabilidad de la simulación. Aquí se describen los pasos a seguir en la verificación:

1. Identificación de las Distribuciones de Probabilidad y Supuestos: Antes de comenzar la verificación, es necesario identificar las distribuciones de probabilidad de las variables del modelo y asegurarse de que se hayan implementado los supuestos acordados durante la construcción del modelo.
2. Verificación de la Programación del Modelo: El primer enfoque de verificación implica comparar el modelo con una fuente de referencia confiable. En este caso, se ha elegido Google Maps, que proporciona un modelo que se asemeja bastante a la realidad. Para llevar a cabo esta comparación, se determina la ruta seleccionada por un vehículo y se calcula el tiempo requerido para recorrerla a una velocidad específica, considerando la congestión en los carriles por los que transitará.
3. Consideración de la Experiencia de un Compañero: En una segunda aproximación, se utiliza la opinión de un compañero que viaja diariamente por el tramo en estudio. Esto proporciona valores adicionales que se ajustan aún más a la realidad.
4. Comparación de Variables de Salida: Luego, se comparan las variables de salida generadas por Google Maps y la opinión del compañero con las variables de salida generadas por la simulación. Esto implica analizar factores como el tiempo de viaje, la elección de rutas y otros indicadores relevantes.
5. Discusión de Resultados: Después de la comparación, se procede a discutir los resultados. Si los valores obtenidos en cada uno de estos enfoques se asemejan a los de la simulación, se puede concluir que el modelo ha superado la prueba de verificación. Esto indica que los parámetros utilizados en la simulación funcionan adecuadamente y que el modelo es confiable para su propósito.

La verificación es un paso crítico en la simulación, ya que garantiza que el modelo refleje de manera precisa la realidad y que las decisiones basadas en la simulación sean sólidas. Cualquier discrepancia identificada durante este proceso puede llevar a ajustes en el modelo o a una revisión más profunda de los supuestos y datos utilizados.

2.6. Validación del Modelo

El sexto paso de un estudio de simulación es la validación del modelo. La validación es un proceso crítico para asegurarse de que el modelo de simulación se comporte de manera precisa y confiable al utilizar datos de entrada del mundo real. A continuación, se describe cómo llevar a cabo la validación, considerando la información proporcionada anteriormente:

1. Preparación de Datos de Entrada Real: En primer lugar, se debe recopilar información de entrada real que represente situaciones del mundo real que se desean simular. Esto podría incluir datos sobre el tráfico, horarios de salida y llegada de vehículos, y otros factores relevantes. Estos datos deben ser representativos y abarcar un rango adecuado de escenarios posibles. Para nuestro caso tuvimos en cuenta las velocidades de los automoviles en los distintos carriles y de los tiempos de semaforización así como de la onda verde que tiene los carriles principales.
2. Configuración del Modelo: Luego verificamos que el modelo de simulación esté configurado de manera adecuada para recibir los datos de entrada real. Esto implicó ajustar las variables de entrada, supuestos y parámetros para que coincidan con las condiciones del mundo real que se desean simular, ya que, al comienzo probamos con tiempos de semaforización cortos y el tiempo en que un auto se encontraba desconpuesto era breve, por esto, se ajustaron los tiempos de semaforización y se tuvo en cuenta un tiempo de espera en que llegaría una grúa a remolcar el vehículo desconpuesto.
3. Ejecución de Pruebas: Utilizamos los datos de entrada real para ejecutar pruebas en el modelo. Esto implicó la simulación de escenarios específicos, como la planificación de rutas de vehículos en base a datos de tráfico actuales y la evaluación del rendimiento de un sistema en función de eventos reales.
4. Análisis de Resultados: Después de ejecutar las pruebas, analizamos los resultados generados por el modelo en comparación con la realidad. Comprobamos si el modelo simula con precisión el comportamiento observado en el mundo real. Incluimos la comparación de tiempos de viaje, elecciones de rutas, o cualquier otro indicador relevante.
5. Ajustes y Validación Continua: Si se identifican discrepancias entre los resultados de la simulación y la información de entrada real, es necesario realizar ajustes en el modelo. Estos ajustes incluyen cambios en las

distribuciones de probabilidad, parámetros del modelo o supuestos. Posteriormente, se vuelven a ejecutar las pruebas para validar que los cambios han mejorado la precisión del modelo, en este caso, se optó por cambiar la distribución en como los autos eligen el destino, en un principio era una distribución uniforme la cual Anylogic devuelve un número entre el 0 y 1, nosotros elegimos un 0.5 o sea la mitad de los autos decidían cambiar de carril, al hacer esto encontramos que los autos del carril principal (al haber 1000 por hora) colapsaban las salidas a los carriles secundario provocando una congestión que se podría dar pero es irreal por esto se redujo a un 0.2 los autos que deciden cambiar de carril.

La validación del modelo es un paso esencial para garantizar que la simulación sea una herramienta precisa y útil para la toma de decisiones. A través de este proceso, se verifica que el modelo sea capaz de replicar con precisión el comportamiento del sistema o proceso en el mundo real, lo que aumenta la confianza en sus resultados y su aplicabilidad en situaciones reales.

2.7. Generación del Modelo Final

El séptimo paso de un estudio de simulación es la generación del modelo final. Después de haber completado con éxito los pasos de verificación y validación, estamos preparados para llevar a cabo la simulación y analizar el comportamiento de nuestro modelo. A continuación, se detalla cómo se realiza este paso.

Una vez que hemos confirmado que nuestro modelo ha superado las pruebas de verificación y validación, podemos utilizarlo para llevar a cabo la simulación. Este modelo es la representación final y confiable del sistema que estamos estudiando.

Es importante destacar que las variables del sistema mantienen los valores establecidos en pasos anteriores, ya que han superado satisfactoriamente tanto las pruebas de verificación como las de validación. Esto significa que estas variables funcionan de manera adecuada y se asemejan de manera óptima a la realidad.

Se presenta una representación visual del modelo final a través de figuras. En la 'Figura 3', se ilustra de manera estática el diseño del modelo final. Esta imagen proporciona una visión general del sistema y cómo se ha configurado.

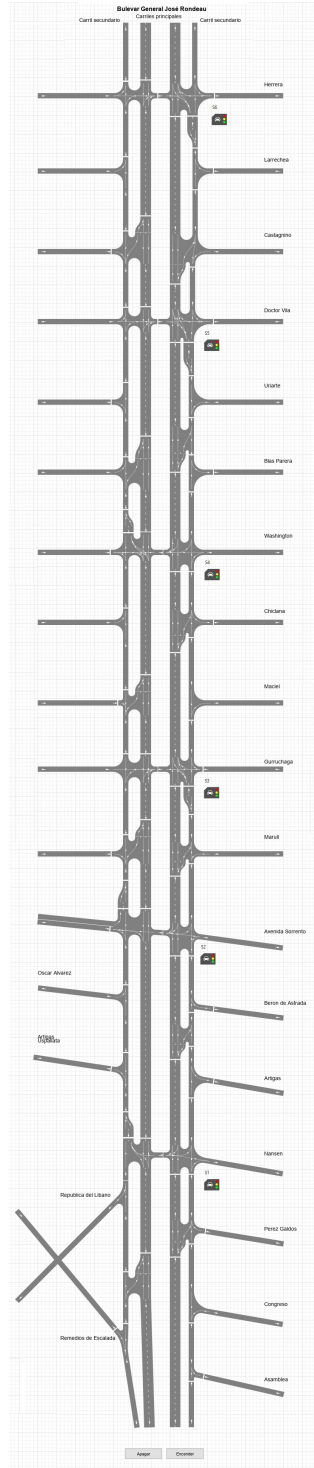


Figura 3: Modelo final.

En la 'Figura 4', se muestra el modelo final en ejecución. Aquí, se puede observar cómo el tráfico fluye en los carriles y cómo los semáforos operan de manera correcta. Los colores en el modelo indican el estado de los semáforos, con verde representando que la vía está despejada, amarillo señalando precaución y rojo indicando detenerse por completo.

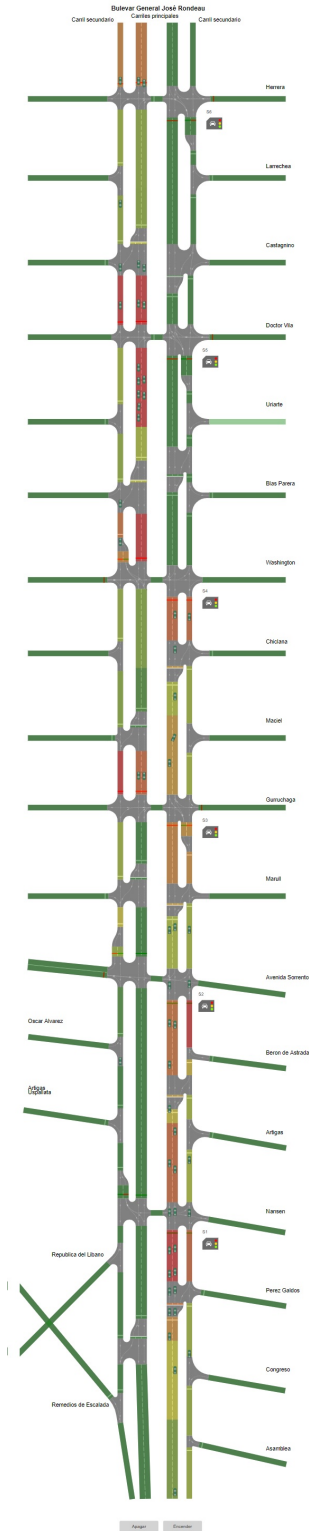


Figura 4: Modelo final en ejecución.

Se menciona que en el siguiente paso, se comparará el modelo base con un escenario alternativo. Esto sugiere que el modelo final es lo suficientemente flexible como para permitir la simulación de diferentes situaciones o cambios en el sistema.

El modelo final, respaldado por las pruebas de verificación y validación, es una herramienta valiosa para comprender el comportamiento del sistema y evaluar diversas estrategias o escenarios. La simulación con este modelo puede ayudar en la toma de decisiones informadas y en la identificación de posibles mejoras o cambios en el sistema estudiado.

2.8. Determinación de Los Escenarios para el Análisis

El octavo paso de un estudio de simulación implica la determinación de los escenarios para el análisis.

Este paso de determinación de escenarios es fundamental para comprender cómo el modelo se comporta en diferentes condiciones y para respaldar la toma de decisiones relacionadas con la instalación de semáforos en la zona estudiada. Los resultados de los escenarios base y alternativo brindan información crucial para evaluar las implicaciones de estas decisiones en términos de flujo de tráfico y seguridad vial.

Es fundamental recordar que el objetivo principal de este paso es examinar la congestión del tráfico y presentar pruebas de que la instalación de semáforos resulta en una disminución efectiva del flujo vehicular y, por ende, en una mejora de la seguridad en la zona en cuestión.

Para respaldar esta afirmación, se ha concebido un escenario alternativo basado en el mismo modelo, pero con la omisión de los semáforos. La atención se enfoca en analizar cómo responde el modelo ante la congestión y la eventualidad de accidentes en la ausencia de semáforos. Esto permite recopilar los valores de las variables de salida en este escenario alternativo y, posteriormente, comparar los resultados con el modelo base.

Para ello, se ha incorporado la funcionalidad de activar y desactivar los semáforos mediante un botón en el modelo. Esto facilita la ejecución de simulaciones en ambos escenarios de manera controlada.

Cuando el modelo se implementa en condiciones normales (con semáforos), se obtienen valores de las variables de salida, como la cantidad promedio de vehículos en el sistema y la demora promedio de vehículos en el sistema.

Por otro lado, cuando se implementa el modelo sin la presencia de semáforos se observa en algunos tramos congestión excesiva.

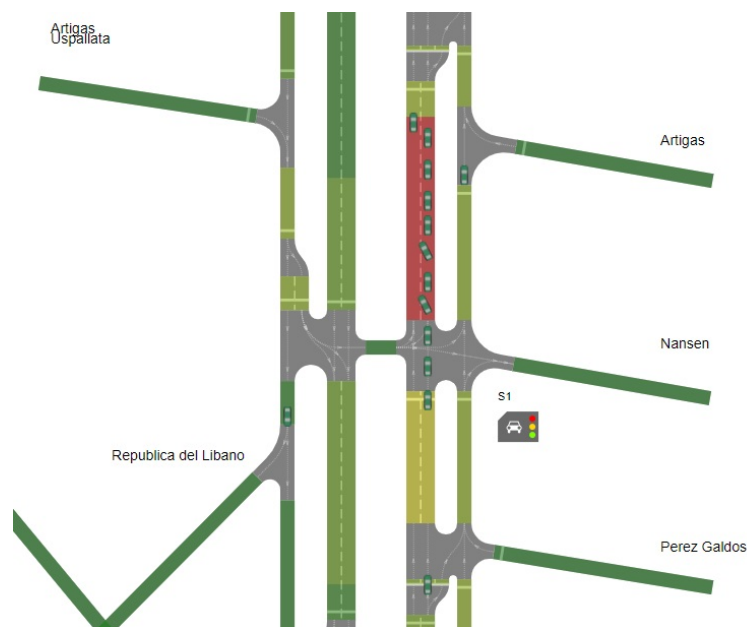


Figura 5: Congestion entre las calles Artigas y Nansen.

La situación empeora notablemente cuando se registra un accidente que, a su vez, desencadena una congestión adicional y resulta en un bloqueo total del flujo de tráfico.

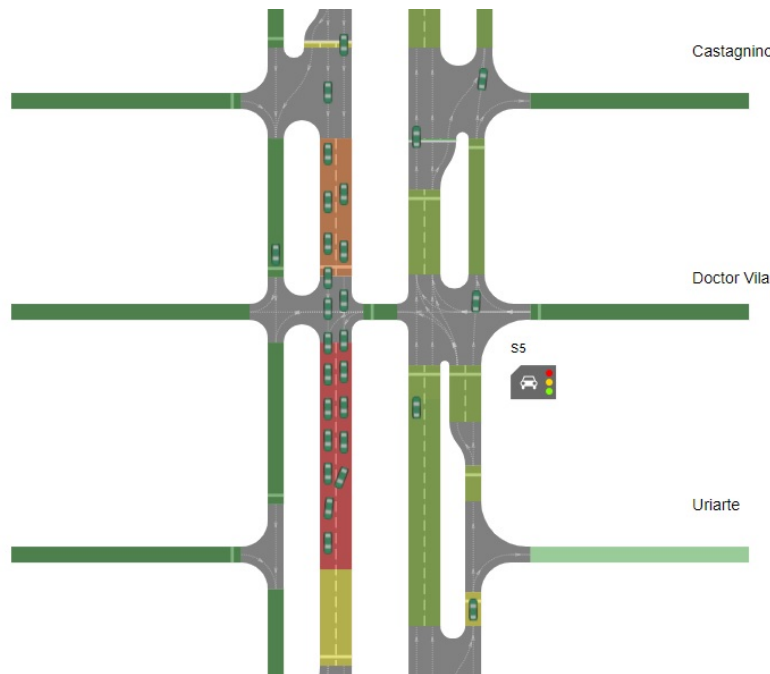


Figura 6: Congestion a causa de un accidente entre las calles Doctor Vila y Uriarte.

Con el fin de demostrar nuestro objetivo, en el siguiente paso procederemos a realizar un análisis de sensibilidad donde se realizará una comparación exhaustiva de ambos escenarios mediante la ejecución de 100 corridas, respaldadas por un análisis estadístico detallado de las variables de salida.

2.9. Análisis de Sensibilidad

El noveno paso de un estudio de simulación es el análisis de sensibilidad. El mismo es fundamental para comprender cómo los cambios en los parámetros del modelo o las condiciones pueden afectar los resultados y las conclusiones del estudio.

Para ello, empleamos una simulación de Monte Carlo de primer orden. Debido a la limitación de recursos, no contábamos con la versión profesional de AnyLogic. Por lo tanto, optamos por realizar un experimento de variación de parámetros con un número constante de entradas, el cual incluyó múltiples réplicas, en este caso, un total de 100.

Cuando el modelo se implementa en 100 corridas en condiciones normales (con semáforos), se obtienen valores de las variables de salida, como la cantidad promedio de vehículos en el sistema y la demora promedio de vehículos en el sistema. Estos valores se registran y se presentan visualmente a través de gráficos a continuación:

- Cantidad promedio de vehiculos en el sistema: 3195.01
- Demora promedio de vehículos en el sistema: 551.76

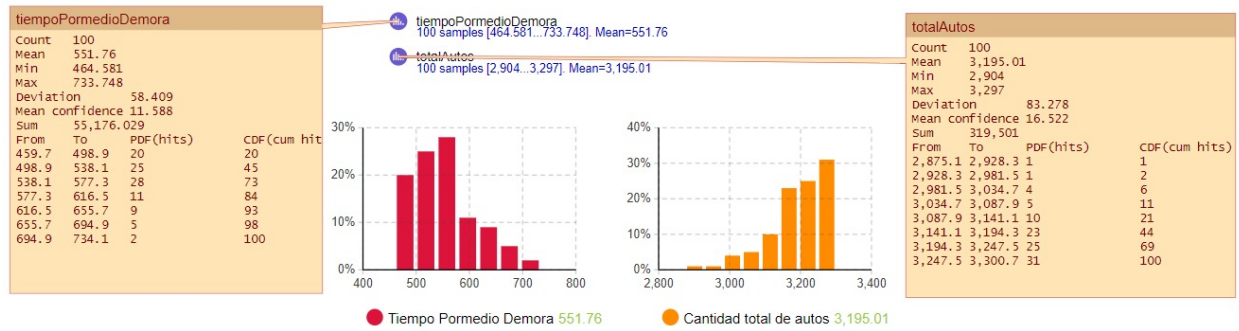


Figura 7: Valor de medidas de rendimiento en 100 corridas del escenario A.

Por otro lado, cuando se implementa el modelo en 100 corridas sin la presencia de semáforos, se registran los siguientes valores de salida:

Al analizar las variables de salida nos encontramos:

- Cantidad promedio de vehículos en el sistema: 5740.34
- Demora promedio de vehículos en el sistema: 72.926

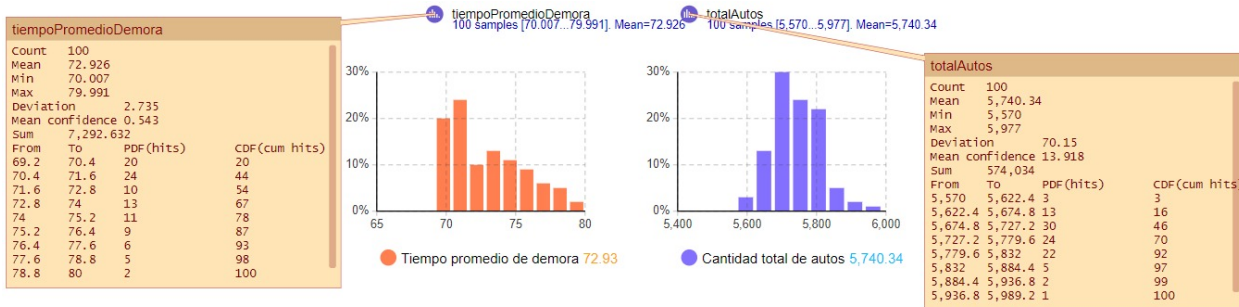


Figura 8: Valor de medidas de rendimiento en 100 corridas del escenario B.

A simple vista podemos deducir que en ausencia de semáforos, se observa una disminución significativa en la demora promedio de vehículos en el sistema, mientras que la cantidad promedio de vehículos en el sistema aumenta notablemente. No obstante, se producen más accidentes.

A continuación, con el objetivo de comparar las configuraciones de sistemas alternativos optamos por utilizar el siguiente test:

Intervalo para la Diferencia entre las Medidas de Rendimiento de dos Sistemas

Definimos las siguientes variables:

- X_{1j} y X_{2j} : Medidas de rendimiento del sistema 1 y 2 con $j=1, 2, \dots, n$ (réplicas).
- $Z_j = X_{1j} - X_{2j}$: Variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas. No requiere que X_{1j} y X_{2j} sean independientes.
- $E(Z_j) = \delta = \mu_1 - \mu_2$ donde δ es la cantidad por la que construimos el intervalo de confianza.
- Es importante destacar que el número de réplicas del sistema 1 debe ser igual al del sistema 2, es decir, $n_1 = n_2 = n$.

A partir de estas definiciones, procedemos de la siguiente manera:

- Calculamos la media de las diferencias como $\bar{Z}(n) = \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n} = E(Z_j)$
- Luego, determinamos la varianza como $Var(\bar{Z}(n)) = \sum_{j=1}^n \frac{(Z_j - \bar{Z}(n))^2}{n(n-1)}$

Finalmente, construimos el Intervalo de Confianza para δ de la siguiente manera:

$$\bar{Z}(n) \pm t_{n-1;1-\alpha/2} \sqrt{Var(\bar{Z}(n))}$$

Podemos decir que δ estará dentro del intervalo, donde $t_{n-1;1-\alpha/2}$ es el valor crítico de la distribución t con n-1 grados de libertad para un nivel de confianza de $1 - \alpha/2$.

Este análisis nos indica que si el intervalo calculado incluye el valor cero, la simulación se considera una representación adecuada de la realidad; de lo contrario, se estaría desviando de la misma.

Hemos optado por calcular el intervalo de confianza para las dos métricas de rendimiento seleccionadas en nuestro sistema, y los resultados obtenidos son los siguientes:

- Cantidad promedio de vehiculos en el sistema: [2540;2555]
- Demora promedio de vehículos en el sistema: [465;494]

Dado que el intervalo no abarca el valor cero, podemos concluir que nuestro sistema no se asemeja sustancialmente a la realidad.

Para acceder a información adicional, que incluye los valores obtenidos en cada una de las ejecuciones, así como los cálculos realizados para determinar los intervalos de confianza, hemos adjuntado un archivo Excel que contiene todos los datos relevantes.

2.10. Documentación del Modelo, Sugerencias y Conclusiones

2.10.1. Anylogic

En esta sección, tenemos la intención de proporcionar una breve introducción al software AnyLogic con el propósito de presentar la herramienta que se empleó en el desarrollo de este estudio.

AnyLogic es una plataforma de simulación multimodal que permite a los usuarios crear modelos de simulación basados en agentes, dinámicos y de eventos discretos.

Lo que distingue a AnyLogic es su capacidad para integrar estos enfoques en un solo entorno. Esto ofrece una flexibilidad sin precedentes para la representación de sistemas complejos, lo que permite a los usuarios abordar una amplia gama de problemas y analizar la interacción entre múltiples factores.

Entre sus características principales destacamos:

- Es único en su capacidad para combinar tres enfoques de modelado: basado en agentes, dinámico y de eventos discretos. Esto permite la representación más precisa y detallada de sistemas complejos.
- Presenta una interfaz gráfica de usuario (GUI) intuitiva que facilita la creación de modelos sin necesidad de conocimientos de programación avanzada.
- El software incluye bibliotecas específicas para áreas como tráfico, fabricación, atención médica, logística, entre otras, lo que agiliza el proceso de modelado en campos específicos.
- Permite la importación de datos reales para calibrar y validar modelos, lo que mejora la precisión de las simulaciones.
- Los usuarios pueden llevar a cabo experimentos virtuales para evaluar diferentes escenarios y realizar análisis de sensibilidad, lo que facilita la toma de decisiones informadas.

AnyLogic es una herramienta de simulación versátil y poderosa que ha demostrado su utilidad en una amplia variedad de campos. Su capacidad de combinar diferentes enfoques de modelado y su facilidad de uso hacen que sea una elección popular entre investigadores y profesionales que buscan analizar y optimizar sistemas complejos. La integración de datos reales, la optimización y la experimentación virtual hacen de AnyLogic una herramienta valiosa para la toma de decisiones informadas y la resolución de problemas en un mundo cada vez más complejo.

2.10.2. Road Traffic Library

En esta sección, nos proponemos brindar una breve introducción a la 'Road Traffic Library' proporcionada por el software AnyLogic con el objetivo de facilitar una comprensión más profunda de los conceptos clave.

La biblioteca de tráfico vial nos concede la capacidad de modelar, simular y visualizar el tráfico de vehículos con un nivel de detalle excepcional, sin comprometer la eficiencia del proceso. Esta herramienta resulta idónea para abordar la simulación del tráfico en carreteras, calles urbanas, el transporte interno en instalaciones de manufactura, estacionamientos, o cualquier otro sistema que involucre vehículos, vías de circulación y carriles.

Lo que destaca aún más es su capacidad de integración con la biblioteca de modelado de procesos de AnyLogic, la biblioteca peatonal y la biblioteca ferroviaria. Esta versatilidad significa que podemos combinar los modelos de tráfico vehicular con modelos de camiones, grúas, barcos, trenes, flujos de pasajeros, procesos comerciales o de manufactura, entre otros.

Además, la biblioteca presenta una serie de características valiosas, que incluyen:

- Formas visuales para marcar el espacio, como carreteras, intersecciones, paradas de autobús, estacionamientos y líneas de detención, que facilitan la creación de redes de carreteras.
- Modelado del comportamiento del conductor, que abarca desde el control de velocidad y la elección de carriles menos congestionados hasta ceder el paso en puntos de fusión y la capacidad de evitar y detectar colisiones en cruces.
- La posibilidad de definir tipos de vehículos personalizados, completos con animaciones y atributos específicos.

Estas características de la biblioteca enriquecen considerablemente nuestra capacidad para plantear nuestro estudio de manera sencilla y eficaz, y, lo que es aún más crucial, nos permiten presentar visualmente el modelo. Esto facilita la comprensión de nuestros objetivos por parte del lector y enriquece la comunicación de nuestros hallazgos de manera efectiva.

2.10.3. Conclusiones

En resumen, el estudio de simulación que hemos llevado a cabo nos ha proporcionado valiosos insights acerca de la eficacia de la implementación de semáforos en un boulevard, centrándonos principalmente en el impacto sobre la demora promedio de vehículos y la cantidad promedio de vehículos en el sistema. Nuestra investigación arroja luz sobre un dilema fundamental que enfrentan las autoridades de tráfico y planificadores urbanos: ¿son los semáforos un medio efectivo para mejorar la seguridad vial en las arterias viales congestionadas, a pesar de generar ciertos inconvenientes en términos de fluidez del tráfico?

En primer lugar, hemos observado que, efectivamente, la implementación de semáforos conlleva un aumento de la demora promedio de vehículos en el sistema. Esto no es sorprendente, ya que el objetivo principal de los semáforos es regular el flujo de tráfico, lo que a menudo resulta en una reducción de la velocidad de desplazamiento de los vehículos. Sin embargo, este hallazgo no debe considerarse de manera aislada, sino en el contexto de otros factores igualmente importantes.

Uno de los resultados más destacados de nuestro estudio es la reducción de la cantidad promedio de vehículos en el sistema. Este indicador señala que, a pesar de la demora experimentada por los conductores, la implementación de semáforos efectivamente logra dispersar el tráfico y reducir la saturación de vehículos en el boulevard. Esto tiene un impacto significativo en la seguridad vial, ya que la disminución de la congestión reduce las posibilidades de colisiones y accidentes graves.

En este sentido, nuestra investigación respalda la hipótesis de que los semáforos desempeñan un papel fundamental en la prevención de accidentes y, por lo tanto, en la mejora de la seguridad del boulevard. A pesar de que generan cierta demora en el tráfico, este inconveniente se compensa con creces por los beneficios en términos de seguridad vial.

En consecuencia, podemos concluir que la implementación de semáforos es una estrategia efectiva para alcanzar un equilibrio entre el flujo vehicular y la seguridad en una arteria vial. Este estudio proporciona una sólida base para respaldar la toma de decisiones de las autoridades de tráfico y planificadores urbanos, destacando la importancia de considerar no solo la eficiencia del tráfico, sino también la seguridad de los conductores y peatones en la planificación de un boulevard.

3. Referencias

- Repositorio de archivos '.pdf', '.pl' y '.xls' de trabajo práctico en GitHub
<https://github.com/ml-celiz/tpi-simulacion-2023-bvrondeau>
- Google Maps:
<https://www.google.com/maps>
- Open Street Map:
<https://www.openstreetmap.org/>
- Simulacion - Weitz
- AnyLogic Cloud-Road Traffic:
<https://cloud.anylogic.com/models?public=true&selectedCategory=Road%20Traffic>
- Anylogic in 3 days - Ilya Grigoryev
- Measuring time in system: <https://anylogic.help/library-reference-guides/process-modeling-library/time-in-system.html>
- Road Traffic Library:
<https://anylogic.help/library-reference-guides/road-traffic-library/index.html>
- How to simulate accident in Anylogic:
<https://stackoverflow.com/questions/49728671/how-to-simulate-accident-in-anylogic-personal-learning>
- Seminario web de la biblioteca de tráfico:
https://www.youtube.com/watch?v=XM0psx2skRc&ab_channel=AnyLogic