

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



EFFECTO DE LA VARIACIÓN DE PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE LA

MICROSIMULACIÓN EN LOS TIEMPOS DE VIAJE

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

AGUINAGA MEZARINA, CARLOS ALONSO

ASESOR:

CABRERA VEGA, FELIX ISRAEL


Lima, Enero, 2024

Informe de Similitud

Yo, Felix Cabrera Vega docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada “EFECTO DE LA VARIACIÓN DE PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE LA MICROSIMULACIÓN EN LOS TIEMPOS DE VIAJE”, del autor Aguinaga Mezarina, Carlos Alonso, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 8%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software Turnitin el 17/01/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 17 de enero 2024

Apellidos y nombres del asesor <u>Cabrera Vega Felix Israel</u>	
DNI: 22309049	Firma
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1917-9840	

Resumen

La investigación actual se centra en la evaluación de los impactos de los parámetros fundamentales de la microsimulación en los tiempos de viaje donde los aspectos de simulación bajo análisis incluyen el warm up, los números semilla y los pasos de simulación. De esta manera, esta tesis persigue la mejora del proceso de diseño y análisis en los modelos de microsimulación. Para alcanzar este propósito, se comenzó con un estudio de las distintas escalas de simulación, con un enfoque más profundo en la microsimulación, que abarca los parámetros fundamentales explorados en este trabajo. También, se investigó el funcionamiento del software Vissim, ya que se implementó para observar y extraer datos que faciliten la evaluación de los efectos en las variables de eficiencia. Luego, se empleó el modelo de Vissim de la intersección de las avenidas Salaverry y El Ejército donde se colocaron cuatro contadores de tiempo de viaje (dos para vehículos motorizados y dos para no motorizados) y se realizaron modificaciones en el warm up, los números semilla y los pasos de simulación. En el primer caso, se pensó utilizar periodos de 600 s, 900 s y el warm up del proyecto; sin embargo, al determinar este último, se halló que su magnitud coincidía con los 900 segundos. En el segundo caso, se analizaron números semilla aleatorios y con una diferencia constante. Para el tercer caso, se utilizaron valores de 1 paso de simulación por segundo de simulación (paso/ss), 10 pasos/ss y 20 pasos/ss. Después de determinar los resultados de tiempo de viaje para cada caso, se aplicaron pruebas de hipótesis para identificar si existe una diferencia significativa en los diversos valores encontrados. En conclusión, se determinó que en el presente modelo no se observa una variación sustancial en los resultados de la duración de los viajes; no obstante, se sugiere llevar a cabo un estudio similar con un análisis multivariable en modelos calibrados y validados.

Agradecimientos

Quiero agradecer...

A mi mamá, la mujer que siempre se preocupó por mí. Siempre se preocupó por que comiera bien, por que duerma mis horas, por que no venga muy tarde a la casa, por que siempre esté sano y tranquilo. Es la mujer que me dio la vida y el amor más bonito que recibiré nunca. La amo mucho y sé que ella a mí.

A mi papá, el hombre que siempre me ha guiado con sus consejos y que siempre se ha preocupado por que alcance mis metas. Agradezco mucho a mi padre por ser la persona que siempre se ha sentado conmigo con el fin de hablar y ayudarme a no perder el oriente. De verdad puedo decir que los mejores consejos que he recibido de alguien han sido de mi padre y siempre estaré muy contento de escucharle.

A mis hermanos, Camila y Adrián porque son mi equipo. Estoy seguro de que los dos van a lograr grandes cosas y que serán las personas que quieren ser. Ambos tienen mucho potencial.

A mi mamá María, pues es a quien le prometí llevarle mi cartón a su casa. Es mi segunda madre y siempre se ha preocupado por cada uno de sus nietos. Los abrazos de mi mamá María son el calor que necesito para alcanzar cualquier objetivo.

A mi mamá Hilda, la Morena de Oro, la abuelita más tierna. Me hubiera gustado llamarle más seguido y estoy muy agradecido porque su amor por mí era enorme y estoy seguro de que todos mis logros los está viendo ella desde el cielo.

A mi amigo fiel Benito, quien lamentablemente tuvo que partir. Su presencia fue suficiente para ayudar a recomponerme en los momentos en que ya no quería seguir. Jamás lo olvidaré. Es un ángel que me gustaría ver, nuevamente, en algún momento.

A mis mejores amigos Joaquín Aragón y Agustín Vizcarra. Son los amigos que puedo considerar una familia porque sé que nunca me abandonarán y que puedo contar con ellos para lo que sea. De verdad agradezco a la vida por haberme dado a estos dos grandes amigos que puedo llamar hermanos.

Al ingeniero Cabrera, pues gracias a su guía y conocimiento pude desarrollar mi tesis de grado en ingeniería civil y estoy encaminando mi carrera en el rubro de la ingeniería de transportes.

Índice de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Planteamiento del Problema	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Preguntas de Investigación	3
1.4	Hipótesis.....	3
1.5	Justificación.....	4
1.6	Alcance	5
1.7	Limitaciones	5
2	Revisión de Literatura	6
2.1	Simulación.....	6
2.1.1	Escala Macroscópica	12
2.1.2	Escala Mesoscópica.....	12
2.1.3	Escala Microscópica	13
2.1.3.1	Fundamentos de microsimulación.....	13
	• Modelos de seguimiento vehicular (<i>Car following</i>)	13
	• Modelos de cambio de carril.....	19
	• <i>Warm up</i>	20
	• Número semilla	22
	• Pasos de simulación por segundo de simulación.....	23
2.1.4	Escala Híbrida	25
2.2	Software Vissim.....	25
2.2.1	Vissim	25
2.2.2	Funcionamiento del software Vissim.....	26
2.2.3	Consideraciones del modelo.....	26
2.3	Calibración	27
2.4	Validación.....	28
3	Metodología.....	29
4	Obtención y análisis de resultados	31
4.1	Descripción del modelo de estudio	31
4.2	Análisis de parámetros de simulación por defecto en Vissim	35
4.3	Variaciones en Warm Up	35

4.3.1	Warm up del proyecto	35
4.3.2	Warm up de 900 segundos	36
4.4	Variaciones en Números Semilla	38
4.4.1	Números semilla aleatorios	38
4.5	Variaciones en Pasos de Simulación	39
4.5.1	Simulation resolution de 1 paso de simulación/ss	39
4.5.2	Simulation resolution de 20 pasos de simulación/ss	40
5	Discusión de Resultados	42
5.1	Conclusiones	42
5.2	Recomendaciones	42
6	Referencias Bibliográficas	44



Índice de Figuras

Figura 1 Flujo de control de un modelo de simulación de eventos discretos (Adaptada de Law Averill, 2014)	9
Figura 2 Pasos de un estudio de simulación (Adaptado de Law Averill, 2014)	10
Figura 3 Modelo de seguimiento vehicular (Elaboración propia).....	14
Figura 4 Umbrales de comportamiento vehicular del modelo de Wiedemann (Elefteriadou, 2014).....	15
Figura 5 Zonas de estudio: Mahatma Gandhi expressway y Mumbai-Pune expressway (Bharadwaj et al., 2019)	21
Figura 6 Flujo de calibración y validación (Adaptado de Park & Won, 2006).....	27
Figura 7 Concepto de región aceptable (Park & Won, 2006)	28
Figura 8 Diagrama de flujo de propuesta metodológica (Elaboración propia)	30
Figura 9 Intersección avenida El Ejercito con avenida Salaverry (Adaptado de Google Earth (2022))	31
Figura 10 Intersección Avenida Salaverry con Avenida El Ejercito sin rediseño (Bachmann, 2023)	32
Figura 11 Intersección Avenida Salaverry con Avenida El Ejercito con rediseño (Bachmann, 2023).....	32
Figura 12 Modelo en Vissim de la intersección Avenida el Ejercito con Avenida Salaverry (Elaboración propia)	33
Figura 13 Contador Oeste-Este	34
Figura 14 Contador Este-Oeste	34
Figura 15 Contador Sur-Norte.....	34
Figura 16 Contador Norte-Sur.....	34
Figura 17 Warm up del proyecto (Elaboración propia)	36

Índice de Tablas

Tabla 1	Definición de las dimensiones de la simulación (Law, 2014).....	6
Tabla 2	Conceptos de los componentes de una simulación de eventos discretos (Law, 2014).....	7
Tabla 3	Explicación de los procedimientos para un estudio de simulación (Adaptado de Law, 2014) ...	11
Tabla 4	Definiciones de los umbrales del modelo de Wiedemann (Elefteriadou, 2014)	15
Tabla 5	Definición de factores para determinar si conductor cambiará de carril (Adaptado de Treiber & Kesting, 2013)	19
Tabla 6	Definiciones de resolución de simulación (paso de simulación por segundo de simulación (PTV Group, 2022)	24
Tabla 7	Descripción de listado de contadores de tiempo de viaje vehicular (Adaptado de Bachmann (2023))	34
Tabla 8	Media y desviación estándar para cada contador del caso de análisis por defecto (Elaboración propia)	35
Tabla 9	Media y desviación estándar para cada contador del caso warm up de 900 segundos (Elaboración propia).....	37
Tabla 10	Prueba de hipótesis: Caso warm up de 600 y proyecto (900 segundos) (Elaboración propia) ..	38
Tabla 11	Media y desviación estándar para cada contador del caso números semilla aleatorios (Elaboración propia).....	38
Tabla 12	Prueba de hipótesis: Caso números semillas aleatorios y con diferencia constante (Elaboración propia).....	39
Tabla 13	Media y desviación estándar para cada contador del caso 1 paso de simulación por segundo de simulación (Elaboración propia)	40
Tabla 14	Prueba de hipótesis: Caso 1 y 10 pasos de simulación por segundo de simulación (Elaboración propia)	40
Tabla 15	Media y desviación estándar para cada contador del caso 20 pasos de simulación por segundo de simulación (Elaboración propia)	41
Tabla 16	Prueba de hipótesis: Caso 10 y 20 pasos de simulación por segundo de simulación (Elaboración propia).....	41

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1	Aceleración de vehículo DSDM ((Zhang et al., 2021)).....	16
Ecuación 2	Velocidad de seguridad con respecto al vehículo precedente (Gipps (1981))	18
Ecuación 3 (1981))	Aceleración máxima que el conductor de vehículo “n” está dispuesto a emprender (Gipps	18
Ecuación 4 2016))	Distancia requerida entre vehículo seguido y seguidor (Adaptado de (Alcalá Ramos,	26



1 Introducción

1.1 Planteamiento del Problema

En la actualidad, existen herramientas de ingeniería utilizadas para solucionar problemas de la vida diaria y mejorar la calidad de vida de las personas. En la ingeniería de transportes se emplea Vissim, el cual es un software útil para proyectos de microsimulación y pertenece a la empresa de PTV Group. Debido a su utilidad, los ingenieros analizan y diseñan en el programa, con el fin de hallar resultados que puedan interpretar para luego plantear propuestas de mejora.

Asimismo, Vissim ofrece una serie de parámetros de simulación (*warm up*, números semilla y paso de simulación) por defecto que variar sus magnitudes pueden afectar a los resultados finales, es decir, a los parámetros de eficiencia. Por ello es que surgen interrogantes como: ¿Qué sucede con los parámetros de eficiencia cuando varían los de simulación?, ¿Cuáles son los parámetros de simulación óptimos para el proyecto?

Ahora, como evidencia de que es usual el uso de parámetros de simulación por defecto, en primer lugar, se muestra el caso internacional de un estudio realizado por Bahmankhah (2019), donde se emplea Vissim para determinar los efectos de vehículos motorizados y bicicletas en el tráfico, seguridad de la vía y ambiente. Se observó que se utilizaron 10 números semilla aleatorios, un tiempo de simulación de 3600 segundos (incluye *warm up* de 600 segundos) y 10 pasos de simulación por segundo simulado.

Por otro lado, en el contexto nacional Canahua (2019) investiga cómo mejorar el desplazamiento de los usuarios en la intersección de los jirones Oquendo, Tacna, Los Incas y Avenida La Torre en Puno. Con ese fin, se modeló el sistema en Vissim con un tiempo de simulación de 3600 segundos (incluye *warm up* de 600 segundos), números semilla con incremento constante en una unidad y un *simulation resolution* de 10 pasos de simulación

Finalmente, como evidencia local Campos (2018) utiliza un modelo de simulación de la intersección de la avenida General Vivanco con la calle Manuel Ugarteche con el objetivo de mejorar la calidad de la vía

en beneficio peatonal (niños, ancianos y personas con discapacidad). Internamente, se utilizó un tiempo de simulación de 3600 segundos (warm up de 600 segundos), 10 pasos de simulación y no se mencionan los números semilla empleados; sin embargo, se corrió la simulación 15 veces.

Como se muestra en los párrafos anteriores, los modelos se construyen con los valores por defecto que recomienda PTV, lo cual conlleva a plantearnos las siguientes interrogantes: ¿Los resultados variarán si se utilizan valores de *warm up* y pasos de simulación que no sean por defecto? ¿Qué ocurre si se emplean números semilla que aumentan de manera constante o si son escogidos de manera aleatoria? ¿Los pasos de simulación tendrán algún efecto en los parámetros de eficiencia? Es por ello, que la presente tesis busca responder a estas interrogantes. Se empleó el software Vissim para modelar la intersección de la avenida El Ejercito con avenida Salaverry en San Isidro, Lima, Perú.

1.2 Objetivos

❖ Objetivo General

- Determinar los efectos de los parámetros de simulación (*warm up*, números semilla y pasos de simulación) en el tiempo de viaje vehicular

❖ Objetivos Específicos

- Determinar el efecto de la duración del *warm up* en el tiempo de viaje vehicular
- Comparar el efecto en el tiempo de viaje vehicular al utilizar números semillas aleatorios (random seed) versus otros con diferencia constante
- Analizar el efecto de la variación de los pasos de la simulación en el tiempo de viaje vehicular

1.3 Preguntas de Investigación

❖ Pregunta General

- ¿Cuáles son los efectos de los parámetros *warm up*, números semilla y pasos de simulación por segundo de simulación en el tiempo de viaje vehicular del modelo en Vissim de la intersección ubicada en la avenida Salaverry con avenida El Ejercito en el distrito de San Isidro, Lima?

❖ Preguntas Específicas

- ¿Cuál es el efecto de la duración del *warm up* en el tiempo de viaje vehicular en el modelo en Vissim 2022?
- ¿Cuál es el efecto en el tiempo de viaje vehicular al utilizar números semillas de manera aleatoria y constante en Vissim 2022?
- ¿Cuál es el efecto de los pasos de simulación en el tiempo de viaje vehicular en el modelo en Vissim 2022?

1.4 Hipótesis

❖ Hipótesis General

- En primer lugar, existe una variación en los resultados del caso de análisis de *warm up* del proyecto, 600 y 900 segundos. En segundo lugar, utilizar números semilla ordenados de manera aleatoria o constante es indiferente en el efecto del tiempo de viaje. Por último, los pasos de simulación sí afectan a los resultados de tiempo de viaje.

❖ **Hipótesis Específicas**

- Existe una variación en los resultados de tiempo de viaje en el caso de análisis de warm up del proyecto, 600 y 900 segundos.
- No existe variación en el tiempo de viaje al utilizar números semilla aleatorios o diferenciados de manera constante
- Los pasos de simulación por segundo de simulación afectan al tiempo de viaje en el modelo de la intersección en Vissim

1.5 Justificación

Esta investigación es útil porque el objetivo es determinar si existe algún efecto en parámetros de eficiencia como el tiempo de viaje a partir de la variación de los parámetros de simulación. A partir de los resultados de esta tesis, se puede ahondar más en preguntas como ¿Cuáles son los parámetros de simulación ideales para el modelo?, ¿Cómo hallar los parámetros de simulación correctos? ¿A qué se debe esa variación en los parámetros de eficiencia?, ¿Los parámetros de simulación tienen algún otro efecto como, por ejemplo, en el proceso de calibración? Como se aprecia, esta tesis es un punto de inicio para que personas interesadas en el tema puedan continuar la línea de investigación y se puedan hallar resultados que mejoren el proceso de diseño y análisis de modelos de microsimulación.

Por otro lado, al observar que los parámetros de eficiencia varían con los de simulación, es posible determinar qué variables del modelo determinan resultados que permitan entender mejor la realidad. Con esto es posible proponer propuestas de mejora más precisas que permitan disminuir los riesgos y consecuencias de los accidentes de tránsito.

Otro aporte es que se podrá entender la relación que existe entre los parámetros de simulación *warm up*, paso de simulación y números semilla. Al ser una investigación exploratoria, el estudio de cada variable mencionada es un avance en el desarrollo de modelos más eficiente con procesos de diseño más rápidos.

1.6 Alcance

La presente tesis es de enfoque cuantitativo, pues la realidad no cambió, debido a la toma de datos de campo que se utilizó para desarrollar la investigación ni por la modificación de los parámetros de simulación de Vissim, además, se busca ser totalmente objetivo, mediante la explicación y comprobación del funcionamiento del mecanismo del software. Adicionalmente, la posición del investigador es totalmente neutral, por lo que los resultados no se pueden ver afectados por las creencias del mismo.

Por otro lado, la investigación es exploratoria de diseño experimental, pues existe poca investigación con respecto al efecto de los parámetros de simulación en el proceso de calibración o de validación. Esto será determinante, pues los valores del warm up, números semilla y pasos de simulación dependerán del criterio del investigador.

1.7 Limitaciones

En primer lugar, una limitación de esta investigación es que los valores hallados son, netamente, para este modelo, pues para otros proyectos se debería realizar el proceso de nuevo. Por otro lado, el modelo proporcionado para la presente tesis no está calibrado, por lo que no simula la realidad del sistema. Adicionalmente, el análisis que se realiza no es multivariable por razones de tiempo; sin embargo, lo que se realizará es el estudio por casos, es decir, variando cada parámetro de simulación a criterio del investigador con el fin de observar los efectos en el tiempo de viaje. Finalmente, la versión del programa puede generar variaciones, por lo que se limita la investigación para Vissim 2022.

2 Revisión de Literatura

2.1 Simulación

La simulación es una herramienta que replica procesos o servicios del mundo real en una computadora. Asimismo, permite tomar decisiones que impactan positiva o negativamente en diferentes contextos profesionales, ya sea en minería, construcción de infraestructura, sistemas de transportes, entre otros. Por otro lado, la simulación se basa en una configuración lógica y matemática, la cual la ha llevado a ser parte de las herramientas de investigación más poderosas a nivel mundial junto a la estadística y programación matemática (Law A., 2014).

Adicionalmente, se define a la simulación como un modelo matemático que determina resultados aproximados y confiables. Esta posee una clasificación de acuerdo a tres diferentes dimensiones. En primer lugar, se encuentran los modelos estáticos y dinámicos; en segundo lugar, los determinísticos y estocásticos y, finalmente, los discretos y continuos. A continuación, la tabla 1 explica las definiciones de cada dimensión.

Tabla 1 *Definición de las dimensiones de la simulación* (Law, 2014)

Simulación	Definición
Estática y dinámica	. Estática: Es una representación de un sistema en un determinado tiempo
	. Dinámica: Es una representación de un sistema en toda su línea de evolución en el tiempo
Determinística y estocástica	. Determinístico: Modelo de simulación que no contiene probabilidades.
	. Estocástico: Los resultados en estos modelos no son siempre el mismo, sin importar los datos de entrada. Por ello es que estos son tomados como aproximaciones.
Continua y discreta	. Continua: Las variables del sistema cambian continuamente en el tiempo
	. Discreta: Las variables del sistema cambian en tiempos separados en el tiempo

Ahora, en la ingeniería de transportes los modelos de microsimulación son bastante empleados, debido a que permiten el análisis y diseño de intersecciones. Con el fin de cumplir este objetivo, se utilizan los modelos discretos, debido a la relevancia de las características y movimientos vehiculares en estos estudios. Tomando en cuenta ello, la tabla 2 explica los componentes y organización de una simulación de un modelo discreto.

Tabla 2 *Conceptos de los componentes de una simulación de eventos discretos* (Law, 2014)

Sistema de estado (<i>System state</i>)	Es el conjunto de variables de estado necesarias para poder describir el sistema en un tiempo en particular
Reloj de simulación (<i>Simulation clock</i>)	Es una variable que da el valor actual del tiempo simulado
Lista de eventos (<i>Event list</i>)	Es una lista que contiene el tiempo siguiente en el que ocurrirá cierto evento
Contadores estadísticos (<i>Statistical counters</i>)	Son variables que se utilizan para guardar la información estadística de la ejecución de un sistema
Rutina de inicialización (<i>Initialization routine</i>)	La rutina de inicialización es un subprograma que inicializa la simulación del modelo en el tiempo cero
Rutina de cronometraje (<i>Timing routine</i>)	Es un subprograma que determina el evento siguiente de la lista de eventos y luego avanza el reloj de simulación hacia el tiempo cuando el evento ocurre
Rutina de eventos (<i>Event routine</i>)	Es un subprograma que actualiza el estado del sistema cuando un tipo de evento en particular ocurre. Cabe mencionar que existe una rutina de eventos para cada tipo de eventos.
Rutina de librerías (<i>Library routines</i>)	Es un set de subprogramas usados para generar observaciones aleatorias desde una distribución probabilística que fue determinada como parte del modelo de simulación
Generador de reporte (<i>Report generator</i>)	Un subprograma que calcula estimados de las medidas de ejecución deseadas (de los contadores estadísticos) y produce un reporte cuando la simulación termina
Programa principal (<i>Main program</i>)	Un subprograma que invoca la rutina de cronometraje para determinar el siguiente evento y luego transfiere el control a la rutina de eventos correspondiente para actualizar el estado del sistema. Este también invoca el generador de reportes cuando la simulación termina.

Cabe agregar que la simulación de eventos discretos es una técnica que se utiliza para estudiar sistemas dinámicos que cambian de estado en momentos específicos en el tiempo. En este tipo de simulación, se divide el sistema en partes discretas que interactúan entre sí y se modelan los eventos que ocurren en el sistema a lo largo del tiempo. Por ejemplo, podríamos utilizar la simulación de eventos discretos para estudiar cómo se comporta un sistema de tráfico de vehículos durante diferentes horas del día (Law & Kelton, 2000).

Asimismo, para llevar a cabo la simulación, se utilizan reglas que determinan cómo los diferentes componentes del sistema interactúan entre sí, y se asignan probabilidades a cada evento que ocurre en el sistema. Luego, se ejecuta la simulación utilizando un software especializado que nos permite ver cómo el sistema se comporta en diferentes escenarios (Law, 2014). En la figura 1 se explica el proceso de simulación a más detalle.

Por otra parte, realizar proyectos que involucren simulación de un sistema es labor del ingeniero, por lo que es necesario conocer los pasos que se deben desarrollar. En la figura 2, se muestra el proceso cíclico, no secuencial, y en la tabla 3 se explican las actividades que se incluyen en cada etapa para realizar un proyecto de simulación.

Cabe mencionar que las probabilidades y estadística son relevantes en los estudios de simulación, pues permiten entender el desarrollo de un modelo de sistema probabilístico como el de una intersección. Otra bondad es la capacidad de elección de distribución probabilística, es decir, es posible simular el comportamiento de los usuarios. Finalmente, las probabilidades y la estadística son útiles para generar muestras aleatorias y validar modelos, respectivamente, lo cual simula la realidad con más precisión (Law & Kelton, 2000).

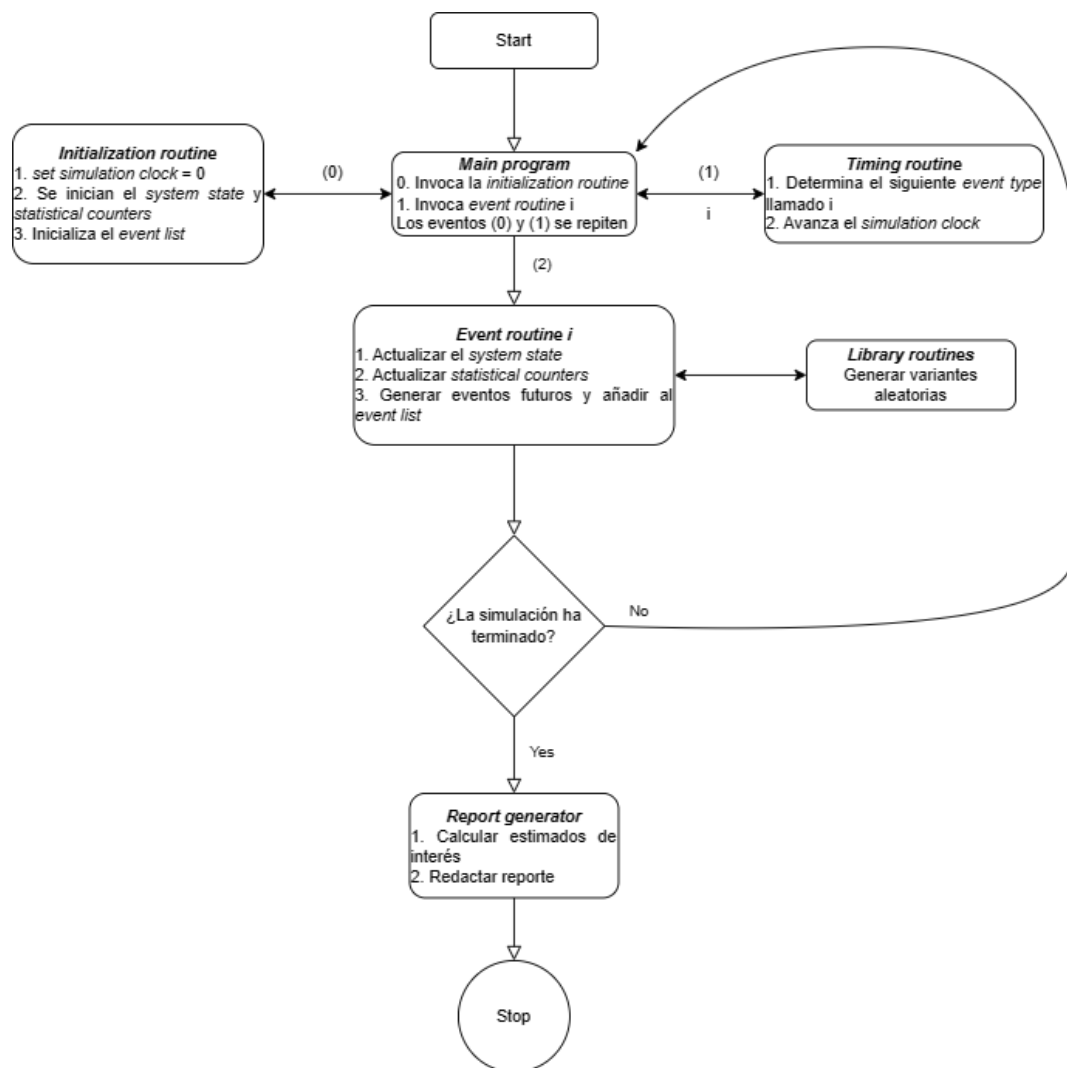


Figura 1 Flujo de control de un modelo de simulación de eventos discretos (Adaptada de Law Averill, 2014)

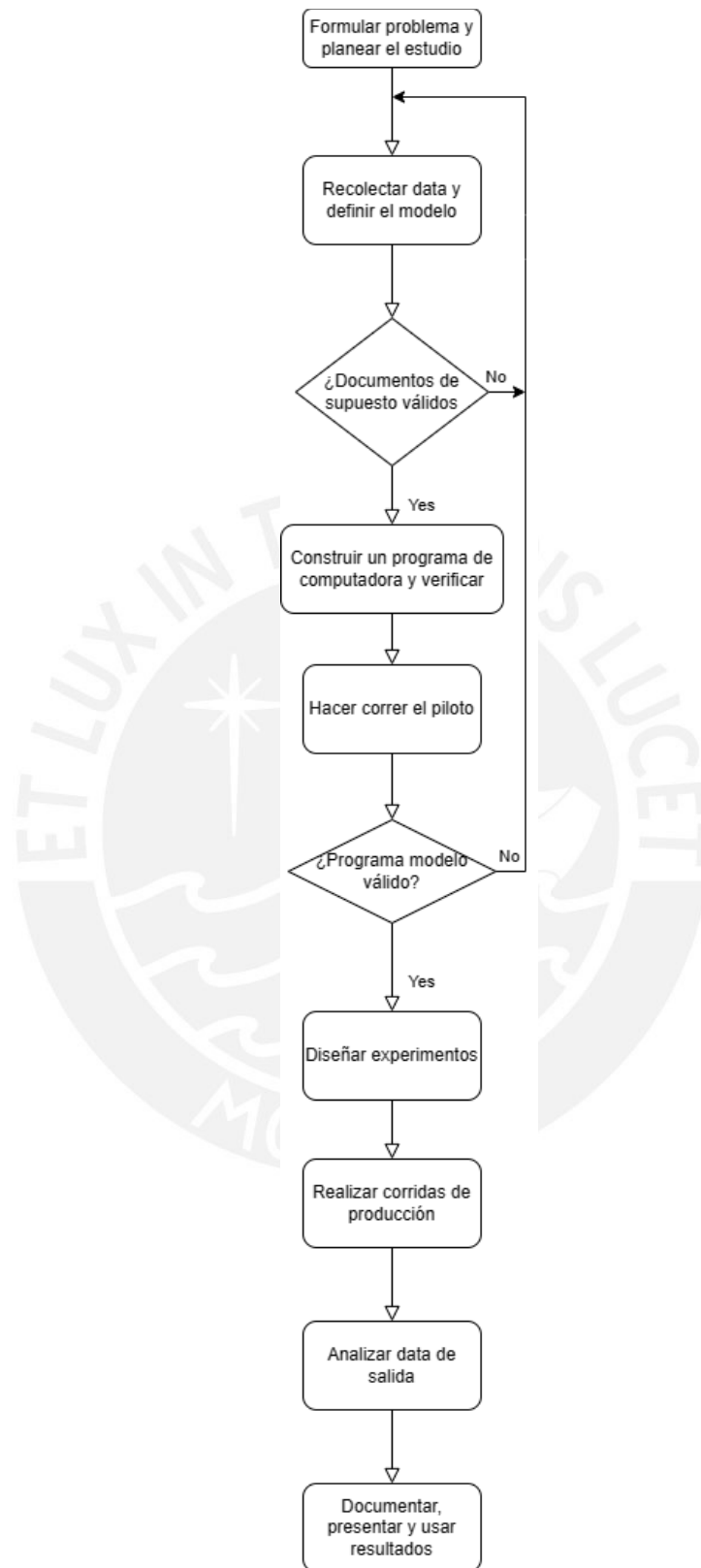


Figura 2 *Pasos de un estudio de simulación* (Adaptado de Law Averill, 2014)

Tabla 3 *Explicación de los procedimientos para un estudio de simulación* (Adaptado de Law, 2014)

Formular problema y planear el estudio	Para formular el problema, a veces es necesario realizar un proceso de iteración, debido a que es posible que la cuestión no esté planteada correctamente o los términos cuantitativos no sean del todo correcto. Es necesario conversar con especialistas como el <i>Project Manager</i> , analista de simulación y el <i>Subject - Matter Experts</i> (SMEs)
Recolectar data y definir el modelo	Es necesaria la data para poder definir los parámetros del modelo
¿Los documentos de supuesto son válidos?	Se realiza un recorrido de los documentos de supuesto antes de una audiencia con los encargados, analistas y SMEs. Con esto se asegura que las asunciones del modelo son correctas
Construir un programa de computadora y verificar	Programar el modelo en lenguaje C, C++ o Java o en un software de simulación (FlexSim, Arena, ProModel)
Hacer correr el piloto	Se corre el piloto para fines de validación
¿Programa de modelo válido?	Se utiliza análisis sensitivo y comparaciones entre el modelo y las mediciones del sistema real para poder verificarlo
Diseñar experimentos	Se especifican las longitudes de tiempo por corrida de simulación, además, se determina el periodo de warm up y los números aleatorios a emplear (facilita la construcción de intervalos de confianza)
Realizar corridas	Las corridas se realizan para obtener data y analizarla
Analizar data de salida	Se busca comparar sistemas de configuración alternativos y determinar la ejecución absoluta o definitiva de cierto sistema de configuración
Documentar, presentar y usar resultados	Documentos asumidos, programa de computación y resultados de estudio para su uso en futuros proyectos
	Al presentar los resultados de estudio, se utilizan animaciones para comunicar fácilmente lo que se quiere transmitir, además se toman decisiones a partir de lo entendido

Específicamente, en el ámbito de la ingeniería de transporte, la simulación posee diferentes aplicaciones, un ejemplo de ello, es su utilidad al analizar el comportamiento vehicular a diferentes escalas de la misma ciudad y para poder estudiar los patrones peatonales (Maza & Ivonne, 2020). Por otro lado, la simulación busca una representación fiable y simplificada del parque automotor actual y futuro distribuido en la red de la ciudad (Landolsi et al., 2018). En la siguiente sección, se describen los diferentes tipos de escala, las cuales poseen diferentes definiciones y niveles de detalle.

2.1.1 Escala Macroscópica

La escala macroscópica es utilizada en proyectos de gran envergadura como análisis de propuestas de control de tráfico y contaminación ambiental urbanística a un nivel amplio (Rehimi & Landolsi, 2013). Debido a la amplitud de su aplicación, el parque automotor en esta escala es una representación continua, caracterizada por magnitudes generales de flujo, velocidad y densidad (Fontalvo Arrieta & Guárdela Vasquez, 2013).

Asimismo, para implementar la macrosimulación, se utilizan softwares de ingeniería como TransCAD y Visum. Estos permiten gestionar, almacenar y analizar data mediante el Sistema de Información Geográfico (GIS), por lo que estos programas informáticos son capaces de modificar mapas, almacenar datos geográficos y ejecutar análisis espaciales, incluso permiten modelar a los usuarios y sus interacciones (PTV Visum, 2023; TransCAD Transportation Planning Software, 2023).

2.1.2 Escala Mesoscópica

Por otro lado, la escala mesoscópica representa una aleación entre los niveles macro y microscópico (la escala microscópica será detallada en el siguiente inciso), por lo que permite determinar parámetros de eficiencia (MOE) a diferentes niveles de detalle. Por consiguiente, la escala mesoscópica posee diferentes aplicaciones en la ingeniería de transportes, pues es útil para estimar tiempos de viaje, evaluación de impacto vial, simulación tránsito, optimización de control de flujo de tráfico, entre otros (Harris et al., 2017).

Luego, con el fin de realizar estudios mesoscópicos se utilizan softwares como Saturn y Transyt 16, los cuales son programas informáticos que se caracterizan por su fácil uso y potencia en la creación de modelos de tráfico estratégicos de gran magnitud y locales, además son útiles en la modelación de semáforos actuados y permiten desarrollar análisis detallados de fenómenos complejos como el *starvation* (Saturn Software, 2023; TRANSYT 16 Enhancements - TRL Software, 2023).

2.1.3 Escala Microscópica

En contraste, la escala microscópica representa un mayor nivel de detalle, por lo que requiere una cantidad importante de data de campo con el fin de representar un comportamiento individual vehicular y peatonal aproximado al de la realidad (Harris et al., 2017).

Complementariamente, Eidmar & Hultman (2014) afirman que la escala microscópica se basa en el comportamiento y reacción individual del usuario, en relación a las características del tráfico, por lo que un adecuado campo de aplicación de este nivel es, normalmente, las intersecciones de proyectos urbanos.

De esta manera, con el fin de ahondar en los fundamentos de la microsimulación, en la siguiente subsección se explican algunos modelos y parámetros que gobiernan este nivel de escala.

2.1.3.1 Fundamentos de microsimulación

- **Modelos de seguimiento vehicular (*Car following*)**

Para empezar, el modelo de seguimiento vehicular (*car following*) estipula que el auto seguidor (A) variará su aceleración, velocidad y distancia, de acuerdo al espaciamiento con el vehículo seguido (B) (Elefteriadou, 2014). Para ilustrar la dinámica del vehículo seguidor y seguido, la figura 3 muestra el modelo de seguimiento vehicular.

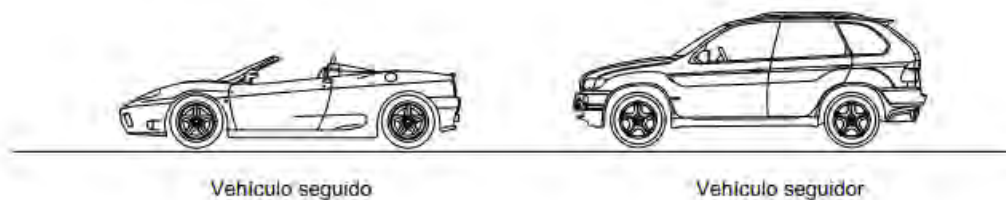


Figura 3 Modelo de seguimiento vehicular (Elaboración propia)

Adicionalmente, Elefteriadou (2014) agrega que la sensibilidad de reacción del conductor A será mayor mientras menos distancia exista entre él y B. Incluso, la magnitud de sensibilidad varía en función de la agresividad de conducción, el tamaño vehicular y velocidad.

Modelo de Wiedemann

En primer lugar, el modelo de seguimiento vehicular de Wiedemann es un modelo matemático especializado en el comportamiento individual del conductor en función de la dinámica vehicular y tráfico alrededor (Wiedemann, 1974).

Para ser más preciso, este modelo es afectado principalmente por la velocidad deseada de B y la distancia y velocidad vehicular. Adicionalmente, considera fenómenos de tráfico como la unión de carriles (*merging*), adelantamiento (*overtaking*) y cambio de carril (*lane-changing*), por lo que matemáticamente es una teoría bastante completa (Wiedemann, 1974).

Ahora, Elefteriadou (2014) precisa que el modelo de Wiedemann involucra características multi-régimen y psicológicas, las cuales se observan en la representación del comportamiento del conductor mediante umbrales, donde cada uno de estos se basa en la percepción y reacción del conductor ante el auto seguido. Para ilustrar, en la figura 4 se muestra la lógica del modelo de Wiedemann y en la tabla 4 se observan las definiciones de cada umbral.

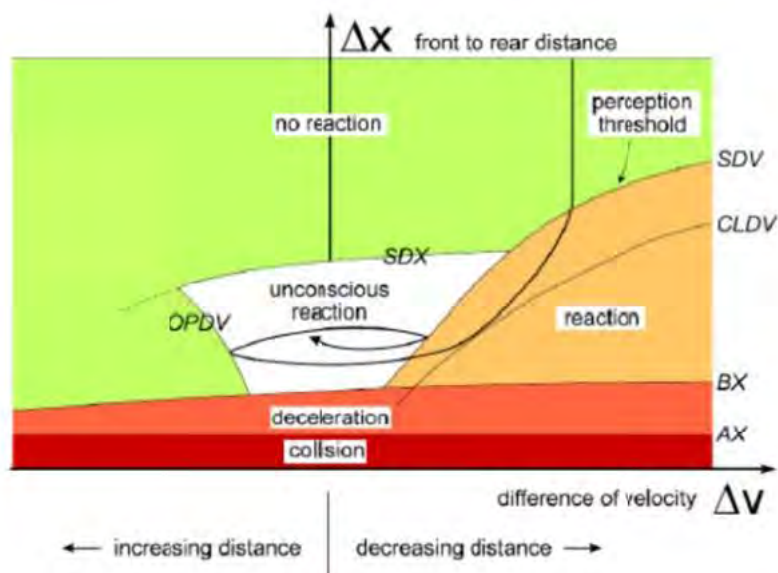


Figura 4 Umbrales de comportamiento vehicular del modelo de Wiedemann

(Elefteriadou, 2014)

Tabla 4 Definiciones de los umbrales del modelo de Wiedemann (Elefteriadou, 2014)

Conducción libre (Free driving)	No existe influencia del vehículo seguido. El vehículo seguidor mantiene su velocidad deseada sin influencia alguna.
Aproximación (Approaching)	Se da cuando se pasa el umbral del punto de aproximación (SDV). Consiste en el proceso de adaptación del conductor a la velocidad inferior del vehículo de cabeza. Mientras se aproxima, el conductor desacelera hasta que la diferencia de velocidad de ambos vehículos sea cero en el momento que se alcance la distancia de seguridad deseada
Seguimiento (Following)	Los umbrales SDV, ABX (distancia de seguimiento mínima deseada con diferencias de velocidad bajas), SDX (La máxima distancia de seguimiento) y OPDV (El aumento de diferencia de velocidad) constituyen el régimen. El conductor sigue al auto de cabeza sin consciencia de aceleración o desaceleración. El conductor mantiene la distancia de seguridad.
Frenado o régimen de emergencia (Braking or emergency regime)	Se adopta el régimen de emergencia cuando la distancia entre la parte delantera y trasera es inferior a ABX. Si la distancia es menor distancia de seguridad deseada, entonces la desaceleración aumenta.

Modelo de distancia de seguridad dinámica (DSDM)

Zhang et al. (2021) plantean un modelo mejorado de seguimiento vehicular, el cual simula el comportamiento dinámico del flujo de tráfico, mediante la velocidad óptima, la cual se determina a través de una nueva función que incorpora la distancia de seguridad dinámica deseada, en vez de una constante. Además, la investigación incluye la sensibilidad del conductor, la cual se ajusta a una distribución log – normal para describir la heterogeneidad del chofer.

Luego, con el objetivo de determinar las ecuaciones que gobiernan el DSDM se utilizan modelos analíticos teóricos y de simulación numérica para explorar el rendimiento de este modelo, por lo que a continuación se muestra la ecuación 1, la cual representa el DSDM:

$$a_n = k(f(\tau))[V(\Delta x_n(t), h_v) - v_n]$$

Ecuación 1 Aceleración de vehículo DSDM ((Zhang et al., 2021))

Donde:

a_n = Aceleración de vehículo “n”

k = Constante que representa la sensibilidad del conductor

$f(\tau)$ = Respuesta del conductor en el tiempo

$\Delta x_n(t)$ = Distancia espacial en el tiempo

h_v = Distancia de seguridad

v_n = Velocidad del vehículo

Con lo anteriormente visto, se puede afirmar que el DSDM se rige por una función de velocidad óptima, la cual depende de velocidad máxima, distancia de seguridad deseada y espacio libre. De manera puntual, el parámetro de velocidad suele ser constante, por lo que la función varía de acuerdo a la distancia y espacio y, por otro lado, la distancia de seguridad deseada varía de acuerdo al valor de la velocidad de conducción.

Con todo lo mencionado se colige que el DSDM representa mejor el comportamiento dinámico que los modelos convencionales, Además que la sensibilidad del conductor no es constante, lo cual representa la heterogeneidad. Cabe agregar que esto también se debe a que para realizar el análisis de sensibilidad se utiliza la distribución log – normal.

Finalmente, se concluye que el modelo mejora la estabilidad del tráfico y contribuye en la supresión de la congestión vial. Por lo que esta teoría alternativa mejora la velocidad media del tráfico en comparación con el modelo de Wiedemann, pues toma en cuenta la distancia de seguridad deseada y la heterogeneidad de la sensibilidad del conductor en el modelo de seguimiento vehicular.

Modelo de la distancia segura (Gipps)

El poder predecir el comportamiento vehicular en función de un auto seguido (figura 3) a través de un modelo matemático es de gran relevancia, debido a que permite estudiar los efectos en el tráfico. Partiendo de ello, Gipps (1981) estipula una teoría en el que cada conductor dispone de límites en el frenado y aceleraciones deseadas.

Gipps (1981) establece que los parámetros del modelo corresponden a características obvias y simples del vehículo y el conductor, con el fin de asignar valores y facilitar el proceso de calibración. Este modelo se basa en que los conductores ajustan su velocidad y distancia de seguimiento para poder mantener un espacio entre vehículo seguido y seguidor.

Adicionalmente, se establece que el comportamiento del tráfico está en función de tres factores: la distribución de velocidades deseadas (que depende de la distancia de seguimiento), el tiempo de reacción de los conductores (depende de la velocidad) y la relación entre la velocidad media de frenado y las estimaciones de los conductores.

Luego, Gipps (1981) establece que la ecuación de velocidad de seguimiento vehicular (ecuación 2) permite realizar cálculos de velocidad, rápidamente, pues no presenta potencias generales de variables, si no raíces y cuadrados, por lo que la evaluación es más simple.

$$u_n^b(t + \tau) = b_n \tau + \sqrt{b_n^2 \tau^2 - b_n [2[X_{n-1}(t) - S_{n-1} - X_n(t)] - u_n(t)\tau - \frac{u_{n-1} t^2}{\hat{b}}]}$$

Ecuación 2 Velocidad de seguridad con respecto al vehículo precedente (Gipps (1981))

Donde:

b_n = Desaceleración más grave que el vehículo que el vehículo “n” desea emprender

τ = Tiempo de reacción

$X_{n(t)}$ = Ubicación de la parte delantera del vehículo “n” en el tiempo t

t = tiempo

S_{n-1} = Tamaño efectivo del vehículo “n-1”. Esto incluye la longitud física del vehículo “n-1” y un margen de seguridad en el que el conductor “n” no está dispuesto a ingresar ni en reposos

\hat{b} = Es la desaceleración más severa del vehículo “n-1”, de acuerdo a la velocidad del vehículo “n”

Por otro lado esta ecuación es muy diferente en contraste con la que calcula la aceleración máxima que un conductor de un vehículo “n”, está dispuesto a emprender (ecuación 3), pues la evaluación es 15% menos rápida comparada con la de Gipps. Cabe agregar que esta afirmación es más notoria cuando se realiza un multi - análisis en función del número de reacciones del conductor en el tiempo.

$$a_n(t + \tau) = \ln \frac{[u_{n-1}(t) - u_n(t)]^k}{[x_{n-1}(t) - x(t)]^m}$$

Ecuación 3 Aceleración máxima que el conductor de vehículo “n” está dispuesto a emprender (Gipps (1981))

Donde:

a_n = Aceleración máxima que el conductor del vehículo “n” está dispuesto a emprender

k y m: parámetros que necesitan ser estimados

- **Modelos de cambio de carril**

En particular, la simulación de sistemas de tráfico estudia la capacidad de aceleración y frenado vehicular; no obstante, para que el modelo sea más preciso es necesario considerar la probabilidad de cambio de carril. Esto es una elección discreta, donde se responde problemáticas que involucran si un auto debería o no ingresar a una vía prioritaria o si el conductor debería continuar o no, sabiendo que la fase del semáforo está a punto de cambiar.

Modelo de optimización del cambio de carril basado en la interacción de vehículos (MOBIL)

Treiber & Kesting (2013) plantearon un modelo de cambio de carril utilizado en autopistas y carreteras de alta velocidad, el cual considera a la velocidad y distancia de los vehículos, así como la disponibilidad de espacio entre los carriles adyacentes. En la tabla 5 se explican los factores considerados para determinar si un conductor cambiará de carril.

Tabla 5 *Definición de factores para determinar si conductor cambiará de carril (Adaptado de Treiber & Kesting, 2013)*

Ganancia de velocidad	Si el vehículo puede aumentar su velocidad, entonces es más probable que cambie de carril
Pérdida de tiempo	Si el vehículo perderá velocidad al cambiar de carril, entonces es menos probable que cambie de carril
Confort lateral	Si el cambio de carril involucra que el vehículo se desplace cerca a otro, entonces es menos probable que cambie de carril
Interacción con otros vehículos	Si el cambio de carril afecta negativamente a otros conductores, es menos probable que el conductor cambie de carril

Cabe agregar, que el factor central del modelo MOBIL es la magnitud de cortesía (p), la cual indica el grado de consideración de los conductores en caso no haya restricciones de seguridad. Como es de esperarse, el valor de $p = 1$, es muy poco frecuente, debido a que implica el respeto absoluto por otros individuos, por lo que el valor promedio es de 0.2.

Modelo de cambio de carril de Gipps-Hall

Gipps plantea un modelo de cambio de carril para entender de manera lógica las decisiones de los conductores antes de realizar la acción. Esto permite crear modelos de simulación que asemejen el comportamiento real del sistema.

El modelo de Gipps es aplicado a ambientes urbanos, por lo que toma en cuenta factores como los siguientes: la seguridad del cambio de carril, posibilidad, ubicación de obstáculos, presencia de líneas de tránsito, intenciones del conductor, presencia de vehículos pesados y velocidad.

Por otro lado, el modelo se relaciona con el de seguimiento vehicular, el cual emplea restricciones de frenado en los vehículos para calcular la velocidad de seguridad con respecto al vehículo precedente. La ecuación empleada es la 3, mostrada anteriormente.

- ***Warm up***

El *warm up* es el periodo de tiempo en la etapa inicial, el cual genera datos inutilizables, por lo que es necesaria para que se dé un estado inicial correcto de la simulación. Cabe agregar que un inadecuado uso del *warm up* conlleva a poca precisión, confiabilidad, es decir una mala representación de la realidad, debido a la inexactitud (Law, 2014).

Para ejemplificar su utilidad, Bharadwaj (2019) realiza un modelo de vías expresas interurbanas en Vissim, el cual fue calibrado y validado mediante data de campo real. El proyecto tuvo como finalidad el cálculo de capacidad vial y proponer una metodología alterna a la actual, la cual se basa en los niveles de servicio (LOS).

Ahora bien, el conocimiento de LOS y capacidad en el continente asiático, específicamente en India, posee un bajo desarrollo; sin embargo, es un país con alta complejidad vial, por lo que los especialistas deberían encontrarse más informados y capacitados con el fin de lograr mejores diseños.

De esta manera, en la figura 5 se muestran las zonas de estudio Mahatma Gandhi y Mumbai Pune, para las cuales se implementaron modelos de 300 segundos de *warm up* y tiempos de simulación de 3900 segundos.



**Figura 5 Zonas de estudio: Mahatma Gandhi expressway y Mumbai-Pune expressway
(Bharadwaj et al., 2019)**

Por otro lado, Chen (2021) desarrolla un modelo de microsimulación de una intersección señalizada en Chengdu, el cual es aprovechado para análisis de sensibilidad de los parámetros en Vissim en proyectos de cálculo de emisiones de tráfico vehicular, para lo cual se utilizó un tiempo de simulación de 7200 segundos y un *warm up* de 370 segundos.

Cabe agregar que, con el fin de estudiar el efecto en el tiempo de viaje y distribución vehicular, debido a parámetros como el número de objetos del modelo, distancia de parada y distancia segura vehicular, se utilizan los métodos de Sobol y Morris para medir el impacto de cada variable.

Asimismo, Wu (2017) estudia la posibilidad de estimar los conflictos entre vehículos y peatones en una intersección señalizada, para lo cual utiliza un tiempo de simulación de 3600 segundos más un *warm-up* de 900 segundos.

De manera puntual, se ahonda en parámetros como el *Post Encroachment Time* (PET) y *Time to Collision* (TTC), los cuales se definen como el tiempo luego de una posible colisión entre un auto con otro modo de transporte y el tiempo de un choque, respectivamente. La utilidad de estos conceptos recae en entender los conflictos entre vehículos y peatones en Vissim, para lo cual se emplearon 42 horas de video distribuidas en 7 intersecciones.

Adicionalmente, se emplearon herramientas estadísticas como la regresión lineal para poder determinar la correlación entre la simulación y la realidad, para la cual se concluyó que los resultados son útiles; sin embargo, se encontró que Vissim subestima los conflictos entre vehículos y peatones, pues estos últimos realizan acciones aleatorias ilegales como cruzar en lugar no debidos, lo cual en ingeniería de tráfico se llama *jay-walking*.

- **Número semilla**

Al realizar trabajos en ingeniería de tráfico, la computadora no genera números aleatorios por sí sola, por lo que es necesario el uso de los números semilla (SN), los cuales generan efectos diferentes en distintos escenarios, lo cual implementa características estocásticas a la simulación (Ge et al., 2012).

Por otro lado, la FHWA (2004) explica que Vissim asigna diferentes comportamientos a los conductores de acuerdo a números aleatorios. Estos siguen una secuencia a partir del número semilla inicial, por lo que el software determinará distintos resultados, para los cuales el analista debe definir si es más conveniente analizar mediante un comportamiento promedio, inadecuado o atípico del usuario.

Ahora, usualmente se utiliza como base el número semilla que ofrece el programa y, luego se incrementa de manera constante en una unidad. De manera de ejemplo, Pilares (2023) realiza un modelo de

una intersección conflictiva en el distrito de Miraflores, Perú, con el fin de presentar propuestas de mejora. Para lograr el objetivo, se ejecutó el programa 18 veces, para lo cual se empezó con el número 42 con incremento en una unidad.

Luego, Huapaya & Rojas (2022) presentan otra evidencia del uso de números semilla por defecto, pues emplean un modelo de la intersección entre las avenidas Brasil, Bolívar y Húsares de Junín, con el fin de plantear propuestas de mejora. Internamente, se utilizan 15 corridas, empezando por el número 42 hasta el 56.

- **Pasos de simulación por segundo de simulación**

La resolución de simulación (*Simulation resolution*) es un parámetro que afecta directamente los resultados finales, pues involucra una variación en el comportamiento vehicular, peatonal y la interacción de estos con el entorno. Asimismo, este número de pasos de simulación por segundo de simulación, se define como la frecuencia con la que los vehículos y peatones cambian su comportamiento en un intervalo de segundos de simulación (PTV Group, 2022).

Ahora bien, Fellendorf & Vortisch (2001) y FHWA (2004) explican que los segundos de simulación poseen un valor máximo de 1, para el cual la posición vehicular es recalculada en cada uno de estos por cada paso de simulación. De manera similar, PTV Group (2022) define cómo es que afectan los diferentes valores del *resolution simulation* y cómo es que estos deberían ser implementados en diferentes proyectos (tabla 6).

Tabla 6 *Definiciones de resolución de simulación (paso de simulación por segundo de simulación (PTV Group, 2022))*

Resolución de simulación (paso de simulación por segundo de simulación)	Definición
[1,5[Involucra movimientos rápidos. Son valores de resolución que no son recomendables con el fin de obtener resultados finales importantes; sin embargo, el proceso de ejecución de simulación es veloz.
[5,10]	Permite obtener resultados bastante aproximados a la realidad, por lo que sus resultados finales son bastante útiles.
]10;20]	Involucra movimientos lentos. Sus resultados son confiables y es útil cuando se requiere un nivel de calidad muy alto de animación.

Cabe mencionar, que la velocidad de simulación corresponde a un factor de lapso de tiempo que indica el tiempo de cada segundo de simulación por tiempo real. Complementariamente, por defecto se recomienda utilizar un factor máximo, con el fin de maximizar la velocidad de simulación, sin embargo, esto no afecta a los resultados que se obtienen en el reporte final.

De acuerdo a lo entendido en los párrafos anteriores, la FHWA (2004), en la Guía aplicativa de software de modelado de microsimulación, destaca la relevancia del conocimiento sobre el funcionamiento de los segundos de simulación, pues el analista debe entender cómo es el proceso de acumulación y resumen de resultados finales, debido a la ejecución de la simulación del modelo con el fin de evitar errores en la interpretación de información alfanumérica de los reportes.

De manera ilustrativa, la FHWA (2004), en la Guía aplicativa de CORSIM como software de microsimulación de tráfico, explica que este programa, al igual que VISSIM, es de carácter estocástico y posee como base el análisis de demanda segundo por segundo de simulación, lo cual se complementa con las

teorías internas de car following y lane-changing. Todo ello, involucra un análisis completo de performance tráfico, tanto en calles y como en avenidas.

2.1.4 Escala Híbrida

Ahora bien, anteriormente, se explicó que la escala macroscópica involucra una representación de tráfico como flujo indivisible; la micro, es relacionada a un nivel de detalle aplicado a áreas pequeñas donde se evalúan sistemas de interacción inteligente y en la escala mesoscópica, se emplea un análisis de comportamiento de tráfico dinámico.

De manera complementaria, la escala híbrida conlleva un alto nivel de detalle en áreas complejas y, a la vez, permite analizar áreas a niveles mesoscópicos, es por ello que los estudios híbridos consideran combinaciones múltiples de enfoque, ya sea micro – meso o macro – micro (Burghout et al., 2006).

Por otro lado, Storani et al. (2021) estipula que el nivel híbrido posee relevancia en el diseño y análisis, debido a que permite una representación de nodos y links a escalas micro y mesoscópicas. Además, presenta una utilidad versátil, pues es capaz de incluir a la macroscópica, en otros términos, involucra un nivel de detalle multiescalar.

No obstante, actualmente una nueva escala se encuentra en desarrollo, la cual involucra un excesivo nivel de detalle. La escala nanoscópica aprovecha la interacción entre vehículo, conductor y el ambiente alrededor para llevar a cabo estudios de operación de tráfico a niveles bastante exactos (Ni, 2003).

2.2 Software Vissim

2.2.1 Vissim

Vissim (*Versatile Simulation System for Intelligent Traffic Management*) es un software de simulación de tráfico, el cual es útil para modelar y analizar el comportamiento del tráfico vehicular en carreteras, calles y redes de transporte urbano. Este programa fue creado por *PTV Group* y es implementado para planificación, diseño de infraestructura de transporte, análisis de tráfico, evaluación de seguridad vial y optimización del flujo de tráfico (PTV Group, 2021).

Complementariamente, esta herramienta posee varias virtudes que aportan en la toma de decisiones y presentación de propuestas de mejora. Con fines de ejemplificación, a continuación, se mencionan algunas aplicaciones del programa. En primer lugar, permite realizar una simulación del flujo de tráfico, lo cual sirve en la toma de decisiones de un sistema de transportes sostenible (Tajudin & Widodo, 2000); en segunda instancia, con ayuda de Vissim es posible reducir las repercusiones negativas del sistema de transporte mediante sistemas avanzados de gestión de tráfico (Xing et al., 2014; Yang et al., 2013) y, por último, permite simular sistema multimodales, incluido el de peatones (Wu et al., 2017b).

2.2.2 Funcionamiento del software Vissim

El software Vissim utiliza algoritmos avanzados de simulación de tráfico para el cálculo de flujo de tráfico, velocidad, aceleración, distancia de seguimiento, tiempos de espera, entre otros parámetros. Estos resultados se visualizan en tiempo real, mientras el programa se encuentra en ejecución. Al final de la última corrida, se pueden visualizar gráficos y tablas con datos que ayudan a una adecuada gestión del tráfico (PTV Group, 2021).

2.2.3 Consideraciones del modelo

Vissim es un software el cual emplea parámetros psicofísicos del modelo de Wiedemann. Este último se basa en umbrales de percepción y reacción del conductor. Adicionalmente, el programa de PTV utiliza submodelos como el ajuste de resultados, cambio de carril y control semaforizado. A continuación, se muestra la ecuación de distancia requerida (ecuación 4) entre vehículo seguido y seguidor de la figura 3 (Alcalá Ramos, 2016).

$$d = ax + (bx_{add} + bx_{mult} \times z)x\sqrt{v}$$

Ecuación 4 Distancia requerida entre vehículo seguido y seguidor (Adaptado de (Alcalá Ramos, 2016))

Donde:

ax = distancia promedio deseada entre vehículos detenidos

bx_add = parte aditiva de la distancia deseada por seguridad

bx_mult = parte multiplicativa de la distancia deseada por seguridad

z = valor entre 0 y 1, obtenido de una distribución normal ($x = 0.5$ y $s = 0.15$)

v = velocidad (m/s)

2.3 Calibración

El usuario de un modelo de simulación de tráfico debe afinar los inputs que se añaden al programa relacionados al comportamiento del conductor y las características del vehículo, pues debido a la dificultad en la toma de datos de campo, estos no son los más precisos, por lo que el modelador se debe encargar de ajustar y comparar algunas medidas absolutas. Todo este proceso que sigue el usuario para mejorar los resultados del modelo se llama “calibración” y en la figura 6 se muestra el flujo ordenado, el cual incluye a la validación.

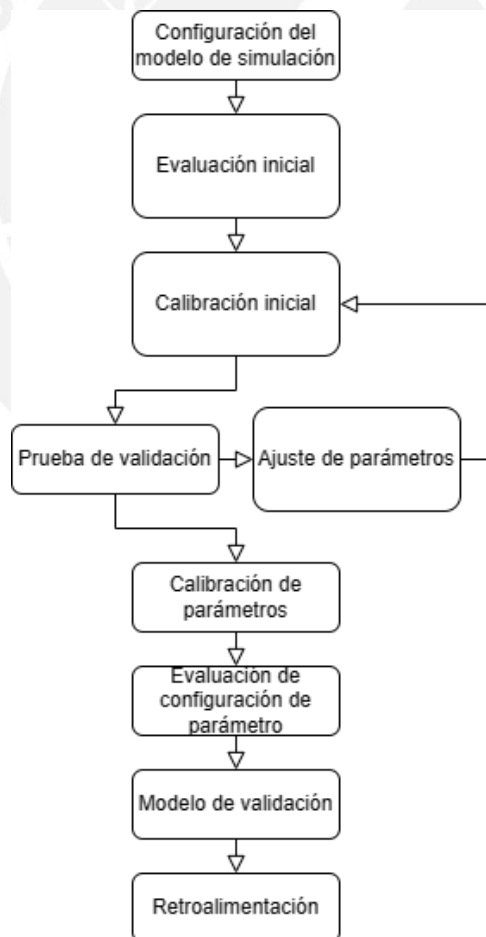


Figura 6 Flujo de calibración y validación (Adaptado de Park & Won, 2006)

2.4 Validación

En la etapa de validación se realiza la comprobación con nueva data de campo y condiciones de día diferente. Para obtener el modelo calibrado y validado, en primer lugar, se crea un modelo de simulación con datos no probados; en segundo lugar, se corre el programa con los parámetros calibrados; en tercer lugar, se extraen los parámetros de eficiencia y se presentan en un histograma como el de la figura 10. En cuarto lugar, se verifica si la data de campo se encuentra en el rango aceptable con el fin de confirmar que el modelo se encuentra calibrado y validado. En caso no suceda esto, se repite el proceso de calibración (Park & Won, 2006).

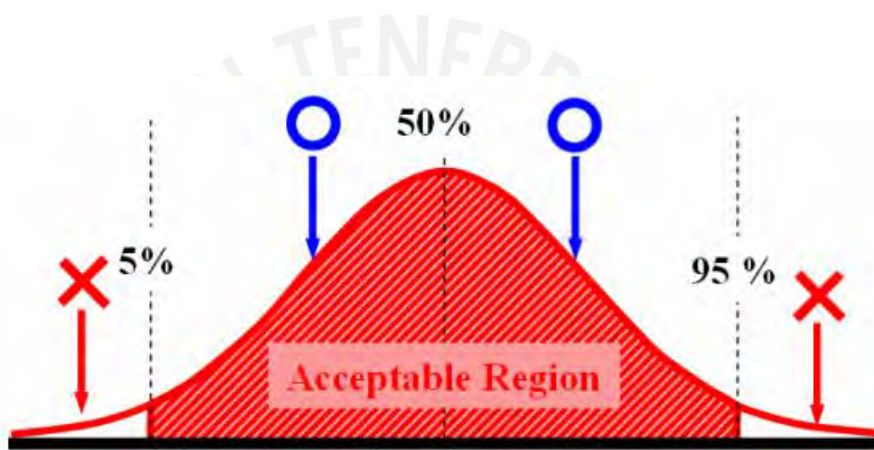


Figura 7 Concepto de región aceptable (Park & Won, 2006)

3 Metodología

La presente tesis cuantitativa presenta un tema poco estudiado, la cual posee un alcance exploratorio, debido a que, luego de realizar la revisión de literatura, el investigador se percató de que existen ideas vagas relacionadas al tema de estudio.

El objetivo principal es determinar los efectos de los parámetros de simulación (warm up, números semilla y paso de simulación) en las variables de eficiencia del modelo en Vissim de la intersección ubicada en avenida Salaverry con avenida El Ejercito en el distrito de San Isidro, Lima, por lo que para lograr ello, será necesario seguir los pasos descritos a continuación

En primer lugar, se da énfasis a la revisión de literatura, en la cual se ahondar en conceptos relacionados a la simulación en diferentes escalas (micro, meso, macro). Paralelamente, para poder entender las definiciones y aplicaciones de los parámetros de simulación, se utilizan fuentes como las guías del Federal Highway Administration (FHWA, 2004), las cuales, a pesar de su antigüedad, poseen conceptos importantes para el desarrollo de esta investigación.

Por otro lado, también se emplean libros como el de Elefteriadou (2014), el cual es usado para estudiar la teoría de Car Following, la cual es implementada en modelos como el de Wiedemann, Distancia de seguridad dinámica y Distancia segura de Gipps.

Complementariamente, se definen los parámetros de simulación warm up, número semilla y paso de simulación y, luego, se ejemplifican mediante casos encontrado en papers. Con esto se da evidencia del uso de variables por defecto a nivel mundial.

Finalmente, se definen algunas características del software Vissim, para ello se navegó en las páginas web de PTV Group, además se muestra la relación con el modelo de Wiedemann y cómo es que este es implementado a través de la ecuación de distancia requerida entre vehículo seguido y seguidor.

Luego de la revisión de literatura, se realiza la descripción de la zona de estudio mediante la revisión del modelo de la intersección ubicada en avenida Salaverry con avenida El Ejercito en el distrito de San Isidro,

Lima. Ahora bien, con el fin de hallar resultados, se desarrolla la metodología explicada en los siguientes párrafos.

El primer caso involucra una variación del *warm up*, con el fin de determinar el valor que permita obtener una serie de resultados de tiempo de viaje. Para ello se probará con el *warm up* del proyecto, de 600 y 900 segundos, todos ellos con números aleatorios con diferencia constante y 10 pasos de simulación por segundo de simulación, es decir, los valores recomendados por PTV. El segundo caso se enfoca más en los números semilla, para el cual se emplearán de manera aleatoria y con diferencia constante, tomando en cuenta al *warm* del proyecto y los pasos de simulación estándar. Finalmente, en el tercer caso, se implementarán 1, 10 y 20 pasos de simulación por segundos de simulación con *warm up* de 600 segundos y los números semilla estándar (figura 8).

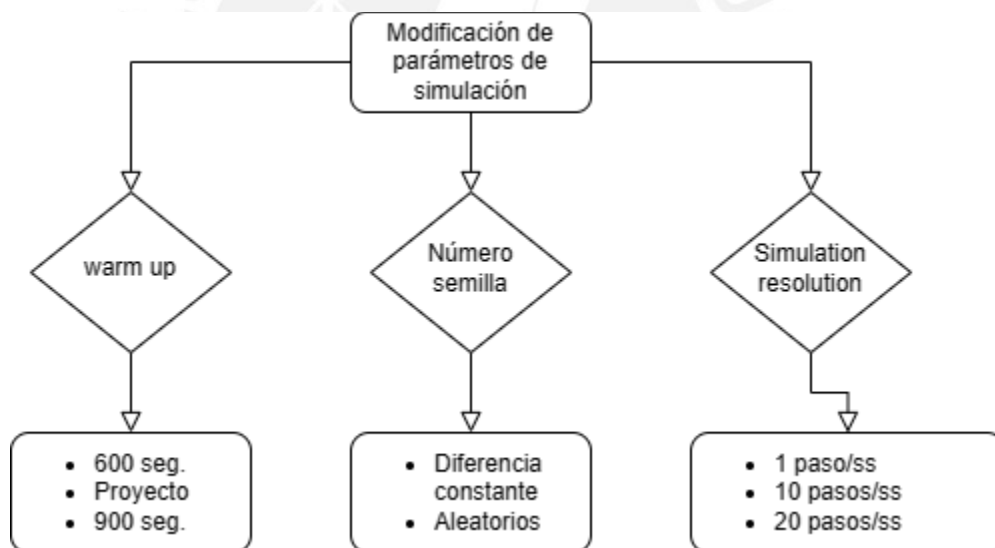


Figura 8 Diagrama de flujo de propuesta metodológica (Elaboración propia)

Ahora bien, luego de determinar los parámetros de eficiencia, se realizará un análisis estadístico con los resultados para poder observar las variaciones en las respuestas y luego se propondrán conclusiones y recomendaciones al final de la investigación.

4 Obtención y análisis de resultados

4.1 Descripción del modelo de estudio

La intersección semaforizada ubicada en San Isidro, Lima, Perú es el modelo de estudio de la presente investigación. La imagen satelital es mostrada en la figura 9. El número de carriles y el ancho de estos en los accesos son consistentes con la intersección. La avenida Salaverry está conformada por vías ida y vuelta, las cuales contienen dos carriles cada dirección, además de una ciclovía al centro de la avenida que colinda con áreas verdes.

En la figura 10 se muestra a más detalle la geometría de esta avenida, para la cual el acceso desde el Norte (N) permite que los vehículos volteen a la derecha o a la izquierda con el fin de ingresar al acceso Este (E) u Oeste (O) de la avenida El Ejercito.

Por otro lado, la avenida El Ejercito con tiene accesos con dos carriles en ida y vuelta; sin embargo, contiene ciclovía; no obstante, se aprecia que existen varios paraderos de buses. Además, se observa que solo permite giro a la derecha desde el Este y giro a la izquierda desde el Oeste.

Ahora bien, en la figura 11 se muestra el plano de la intersección avenida El Ejército y Salaverry, luego de haber aplicado propuestas de mejora como el añadir cruceros elevados, aumento de ancho de vereda, incremento de áreas verdes, instalación de paraderos estratégicos, rediseño de la ciclovía, entre otros.

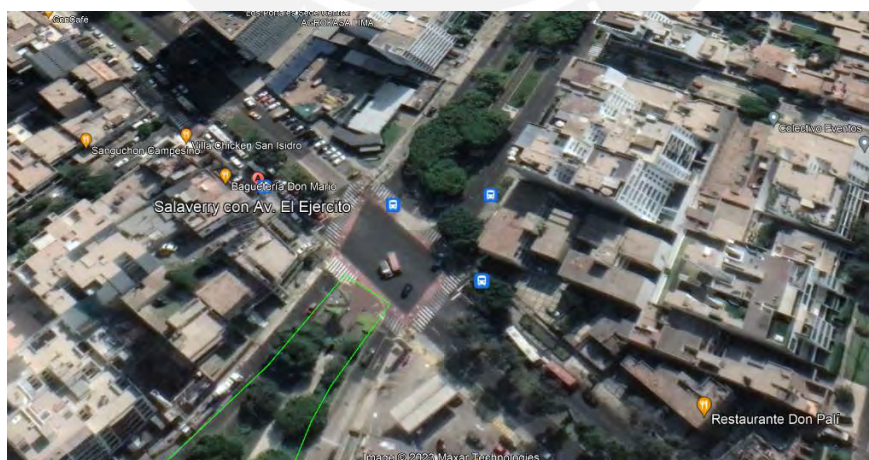


Figura 9 *Intersección avenida El Ejército con avenida Salaverry (Adaptado de Google Earth (2022))*



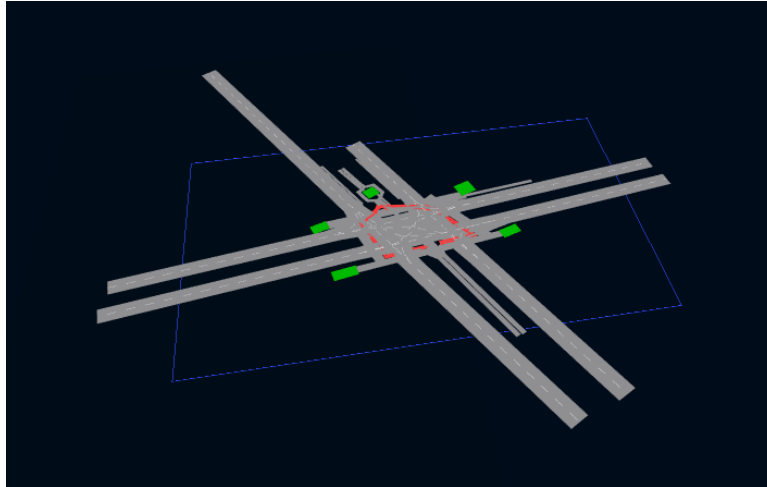
*Figura 10 Intersección Avenida Salaverry con Avenida El Ejercito sin rediseño
(Bachmann, 2023)*



*Figura 11 Intersección Avenida Salaverry con Avenida El Ejercito con rediseño
(Bachmann, 2023)*

El modelo en Vissim utilizado en la investigación de Bachmann (2023) (figura 12) presenta parámetros de simulación estándar, es decir, warm up de 600 segundos y 10 pasos de simulación. Además,

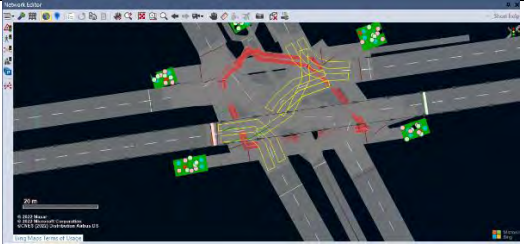

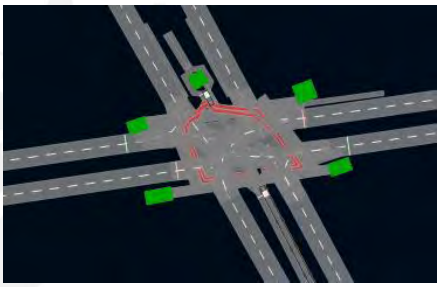

el número semilla utilizado es de 1 con un incremento de 3 random seed por corrida. Adicionalmente, el periodo de simulación es de 4200 segundos, lo cual resulta de la suma de 3600 segundos con 600 segundos de warm up, mencionado anteriormente.



***Figura 12 Modelo en Vissim de la intersección Avenida el Ejército con Avenida Salaverry
(Elaboración propia)***

Por otro lado, en la tabla 7 se muestra el listado de contadores de tiempos de viaje vehicular para la intersección de avenida Salaverry con El Ejército, para la cual se visualiza una breve descripción de cada uno con sus respectivas orientaciones de acuerdo a un sistema de coordenados geográfico Norte, Sur, Este y Oeste. Como se puede observar, los contadores de tiempo de viaje para vehículos motorizados son r12 y r21, los cuales se ubican en la avenida El Ejército, mientras que para vehículos no motorizados son cns y csn, los cuales pertenecen a la avenida Salaverry.

Tabla 7 Descripción de listado de contadores de tiempo de viaje vehicular (Adaptado de Bachmann (2023))

Contador de tiempo de viaje vehicular	Descripción	Figuras (14, 15, 16, 17)
r12	Contador vehicular motorizado avenida El Ejército (Oeste - Este)	 <p data-bbox="971 657 1385 688">Figura 13 Contador Oeste-Este</p>
r21	Contador vehicular motorizado avenida El Ejército (Este - Oeste)	 <p data-bbox="971 955 1385 987">Figura 14 Contador Este-Oeste</p>
csn	Contador vehicular no motorizado avenida Salaverry (Sur - Norte)	 <p data-bbox="971 1312 1385 1344">Figura 15 Contador Sur-Norte</p>
cns	Contador vehicular no motorizado avenida Salaverry (Norte - Sur)	 <p data-bbox="971 1648 1385 1680">Figura 16 Contador Norte-Sur</p>

4.2 Análisis de parámetros de simulación por defecto en Vissim

Para empezar, se realiza el análisis del caso de valor por defecto de cada parámetro de simulación, para el cual, las magnitudes se muestran en la figura 18. Como se puede observar, el valor del periodo de análisis es de 3600 segundos de simulación, el cual incluye un warm up de 600 segundos (figura 19); el simulation resolution tiene una magnitud de 10 pasos de simulación por cada segundo simulado; la variación de números semilla es constante en una unidad y empieza con valor de 42 y, finalmente, se muestra que el programa se ejecuta 15 veces para la obtención de resultados.

Ahora, una vez terminado de correr el programa, se obtiene un listado de valores de parámetros de eficiencia, los cuales son exportados a Excel y ordenados como se puede mostrar en la sección de ANEXOS. Por otro lado, con fines comparativos, se extraen los valores de media y desviación estándar para cada contador de tiempo de viaje.

Tabla 8 *Media y desviación estándar para cada contador del caso de análisis por defecto*

(Elaboración propia)

Contador	Media (\bar{X}_1)	Desviación Estándar (σ_1)
1	10.86	1.04
2	15.43	0.6
3	74.31	12.66
4	100.61	8.14

En relación con los valores de las medias de los contadores 3 y 4, se puede afirmar que estos son considerablemente mayores, debido a que estos están relacionados a vehículos no motorizados, los cuales desarrollan velocidades menores a los motorizados. De manera similar, los valores de desviación estándar de los contadores 3 y 4 son mayores que de 1 y 2, por lo que la dispersión de resultados es más significativa.

4.3 Variaciones en Warm Up

4.3.1 Warm up del proyecto

En primer lugar, para determinar el warm up del proyecto es necesario obtener el número de vehículos del sistema por tiempo de simulación. Para lograr ello, se ejecutó el programa 15 veces en intervalos

de 5 minutos y se utilizaron los data collection points para obtener los resultados. Finalmente, se extrajo la información relevante (ANEXOS) para obtener las gráficas mostradas en la figura 17. Como se puede observar, la obtención de resultados se realizó para la avenida El Ejército, Salaverry y la suma total de ambas con el fin de observar si el warm up del proyecto es el mismo. En definitiva, el warm up del proyecto resulta en 15 minutos aproximadamente para todos los casos, pues a partir de ese valor se puede visualizar que las áreas por encima y por debajo de las líneas rojas son similares.

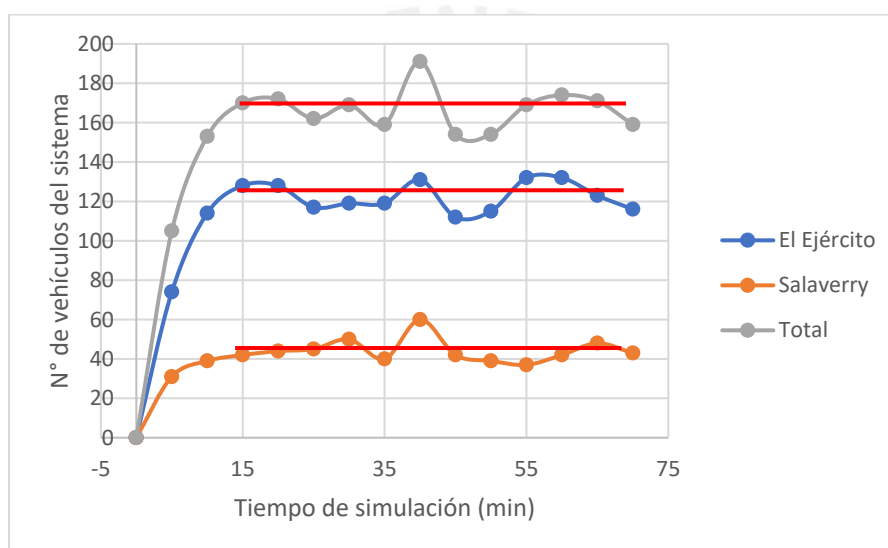


Figura 17 Warm up del proyecto (Elaboración propia)

En particular, debido a que el valor del warm up del proyecto coincide con el de 900 segundos, el análisis comparativo se reduce a 2 casos de 600 y 900 segundos de simulación. Estos resultados se mostrarán en los siguientes acápite.

4.3.2 Warm up de 900 segundos

De forma similar, para determinar la media y desviación estándar de cada contador utilizando un warm up de 900 segundos, se utilizó un tiempo de simulación de 3600 segundos, números semilla con variación constante, simulation resolution de 10 pasos de simulación por segundo y una ejecución de 15 corridas de software.

De esta manera, se obtienen los valores del tiempo de simulación para cada contador en las 15 corridas (ANEXOS) y, luego, se extraen los valores de media y desviación estándar para el caso warm up de 900 segundos.

Aparentemente, los resultados de la tabla 9, son parecidos al de la tabla 8. Esto se puede observar a través de la similitud de las magnitudes y a su comportamiento de media y desviación estándar de los casos 3 y 4, con respecto a 1 y 2.

Tabla 9 *Media y desviación estándar para cada contador del caso warm up de 900 segundos*

(Elaboración propia)

Contador	Media (\bar{X}_1)	Desviación Estándar (σ_1)
1	10.88	0.96
2	15.47	0.64
3	74.56	12.95
4	101.42	8.79

Finalmente, con el fin de determinar si se cumple la hipótesis de investigación relacionada al warm up, se realiza un análisis de prueba de hipótesis como se observa en la tabla 10. Como se puede observar, el valor de la función pivote para una t-student es menor que el valor de t correspondiente a un nivel de significancia de 5%, por lo que la hipótesis nula se acepta y, por ende, se rechaza la alternativa. Con esto se puede aseverar que los resultados de cada caso son similares y la hipótesis de investigación sería incorrecta, pues la diferencia de resultados entre los casos warm up 600 y 900 segundos no es tan significativa, de hecho son bastante similares.

Tabla 10 Prueba de hipótesis: Caso warm up de 600 y proyecto (900 segundos) (Elaboración propia)

Contador	t	t0.05	Conclusión
1	0.08068715	1.7613	Ho se acepta
2	0.24206146	1.7613	Ho se acepta
3	0.07476802	1.7613	Ho se acepta
4	0.35689608	1.7613	Ho se acepta

4.4 Variaciones en Números Semilla

4.4.1 Números semilla aleatorios

Ahora, para poder analizar el caso de números semilla aleatorios, se utilizó un warm up de 600 segundos, junto a un tiempo de simulación de 3600 segundos con un simulation resolution de 10 pasos de simulación por segundo y números semillas aleatorios. Estos fueron elegidos a partir de la función ALEATORIO de Excel y fueron introducidos en Vissim para poder obtener resultados de tiempo de viaje. En los ANEXOS se pueden observar las tablas obtenidas para cada contador del parámetro de eficiencia.

Asimismo, en la tabla 11 se muestran las magnitudes de media y desviación estándar para cada contador. Como se puede observar, los valores de media van aumentando con los contadores, al igual que la desviación estándar, por lo que se puede afirmar que el comportamiento es diferente con respecto al del caso warm up. Además, se puede apreciar que la desviación estándar de los contadores 3 y 4 son altas, lo cual significa una distribución bastante amplia de resultados en las ciclovías, posiblemente, debido a la interacción con vehículos motorizados y al comportamiento de los ciclistas.

Tabla 11 Media y desviación estándar para cada contador del caso números semilla aleatorios (Elaboración propia)

Contador	Media (\bar{X}_1)	Desviación Estándar (σ_1)
1	11.23	1.06
2	15.88	1.07
3	72.74	8.43
4	99.69	9.78

Luego, con el fin de determinar si la hipótesis de investigación es correcta o no, se realiza la prueba estadística, la cual analiza el caso de números semilla aleatorios y con diferencia constante (tabla 12). Como se puede observar, los valores resultantes de la función pivote son menores a la magnitud que marca la transición entre la zona de aceptación y rechazo de hipótesis nula, por lo que la asunción nula se acepta y, por ende, la alternativa se descarta. Esto significa que los resultados del caso de números semilla constantes y aleatorios son similares y, por ende, la hipótesis de investigación es correcta. Para poder observar el análisis a más detalle, puede visualizar las tablas de prueba de hipótesis en los ANEXOS.

Tabla 12 Prueba de hipótesis: Caso números semilla aleatorios y con diferencia constante
(Elaboración propia)

Contador	t	t0.05	Conclusión
1	1.36080097	1.7613	Ho se acepta
2	1.64584347	1.7613	Ho se acepta
3	0.72016246	1.7613	Ho se acepta
4	0.36463078	1.7613	Ho se acepta

4.5 Variaciones en Pasos de Simulación

4.5.1 Simulation resolution de 1 paso de simulación/ss

Para realizar los análisis en los casos de simulation resolution se utilizó un tiempo de simulación de 3600 segundos con un warm up de 600 segundos, además números semilla con diferencia constante y los diferentes valores de simulation resolution. En este inciso, se analiza un valor de 1 paso de simulación por segundo de simulación, para el cual se obtuvo una tabla de resultados para el tiempo de viaje, la cual se muestra en los ANEXOS.

De manera de resumen, se muestra la tabla 13, en la cual se pueden apreciar las medias y desviaciones estándar correspondientes a cada contador. Como se observa, las medias de 3 y 4 son considerablemente mayores con respecto a 1 y 2, esto se debe, directamente, a que 3 y 4 corresponden a vehículos no motorizados, lo cual conlleva a que los tiempos de viaje sean mayores. Luego, se evidencia que la desviación estándar de 3 y 4 son mayores respecto a 1 y 2, lo cual se puede deber a las condiciones físicas de los ciclistas.

Tabla 13 *Media y desviación estándar para cada contador del caso 1 paso de simulación por segundo de simulación (Elaboración propia)*

Contador	Media (\bar{X}_1)	Desviación Estándar (σ_1)
1	11.40	1.32
2	15.39	0.72
3	73.33	11.82
4	100.76	9.11

Ahora, con el fin de determinar si la hipótesis de investigación es correcta, se realiza una prueba estadística. Como se observa en la tabla 14, se determinó para todos los contadores que la hipótesis nula se acepta, debido a que el valor determinado por la función pivote es menor al que separa la zona de aceptación con la de rechazo. Esto significa que las magnitudes halladas para 10 pasos de simulación con respecto al de 1, no tienen mucha diferencia, es decir, los resultados son bastante similares.

Tabla 14 *Prueba de hipótesis: Caso 1 y 10 pasos de simulación por segundo de simulación (Elaboración propia)*

Contador	t	t0.05	Conclusión
1	1.58440228	1.7613	Ho se acepta
2	0.21516574	1.7613	Ho se acepta
3	0.32111029	1.7613	Ho se acepta
4	0.06377031	1.7613	Ho se acepta

4.5.2 *Simulation resolution de 20 pasos de simulación/ss*

En cuanto al caso de simulation resolution de 20 pasos de simulación por segundo de simulación, se utilizan las mismas condiciones que el inciso anterior. De manera ilustrativa, se muestra la tabla 15, en la cual se observan las medias y desviaciones estándar, las cuales poseen un comportamiento similar al caso de 1 paso de simulación por un segundo de simulación.

Tabla 15 *Media y desviación estándar para cada contador del caso 20 pasos de simulación por segundo de simulación (Elaboración propia)*

Contador	Media (\bar{X}_1)	Desviación Estándar (σ_1)
1	10.90	0.96
2	15.40	0.67
3	77.28	12.35
4	110.66	10.44

Finalmente, se realiza la prueba de hipótesis del caso comparativo entre 10 y 20 pasos de simulación por segundo de simulación. La tabla 16 muestra que los resultados de los contadores 1, 2 y 3 aceptan la hipótesis nula, mientras que el contador 4 la rechaza, lo cual involucra que se acepte la hipótesis alternativa y, por ende, se confirmaría la hipótesis de investigación. No obstante, debido a que la mayoría de contadores la rechazan, se considera que el resultado 4 es atípico y se deba, posiblemente, a las características estocásticas de la simulación.

Tabla 16 *Prueba de hipótesis: Caso 10 y 20 pasos de simulación por segundo de simulación (Elaboración propia)*

Contador	t	t0.05	Conclusión
1	0.16137431	1.7613	Ho se acepta
2	0.17341716	1.7613	Ho se acepta
3	0.93139761	1.7613	Ho se acepta
4	3.72830293	1.7613	Ho se rechaza

5 Discusión de Resultados

5.1 Conclusiones

- De acuerdo a lo visto en la obtención y análisis de resultados, se puede concluir que, para el presente modelo de intersección, no existe una variación considerable entre los casos de warm up de 600 segundos y 900 segundos.
- De la misma manera, el efecto no es notorio en el caso de análisis de números semilla aleatorios y diferenciados con manera constante, sin embargo, era lo que se esperaba de acuerdo a la hipótesis de investigación.
- Asimismo, no hay una variación alta en lo que respecta al simulation resolution, pues como se pudo observar, se aprobaron las hipótesis nulas y, por ende, se rechazaron las alternativas.
- Cabe mencionar que existe un porcentaje muy pequeño de que las hipótesis alternativas se acepten, debido a las características estocásticas de la simulación de sistemas a través de modelos en Vissim.
- Se puede colegir que, debido a que no existe una teoría de comportamiento, específicamente, para ciclistas, puede conllevar a que las desviaciones estándar sean altas. Esto se debe a que Vissim simula a los ciclistas como si fueran vehículos motorizados, lo cual no corresponde a estos.

5.2 Recomendaciones

- En primer lugar, sería recomendable realizar un análisis multivariable, pues en esta tesis se desarrolló una metodología de trabajo por casos, lo cual no involucra un alcance tan amplio, como el mencionado, anteriormente.

- En segundo lugar, es factible calibrar el modelo de la intersección en Vissim, pues esto conlleva que el sistema simulado se comporte de una manera más real y, por ende, los parámetros de simulación sean los más óptimos para plantear propuestas de mejora.
- Por último, es recomendable realizar la prueba de normalidad de Shapiro Wilk, pues con ello se puede determinar si la muestra se comporta como una distribución normal. Con ello se puede estar seguro de que utilizar la distribución t-student para una ejecución en Vissim de 15 corridas es correcto.



6 Referencias Bibliográficas

- Alcalá Ramos, M. A. (2016). *Micro simulación del tráfico de la intersección de las avenidas Bolívar, Córdova y calle Andalucía empleando el software VISSIM 6*.
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6685>
- Bahmankhah, B. (2019). *Impact of motor vehicles-bicycles interaction on route selection, traffic performance, emissions and safety*. <https://ria.ua.pt/handle/10773/29356>
- Bharadwaj, N., Kumar, P., Arkatkar, S. S., & Joshi, G. (2019). Deriving capacity and level-of-service thresholds for intercity expressways in India. <https://Doi-Org.Ezproxybib.Pucp.Edu.Pe/10.1080/19427867.2018.1563269>, 12(3), 182–196.
<https://doi.org/10.1080/19427867.2018.1563269>
- Burghout, W., Koutsopoulos, H. N., & Andreasson, I. (2006). A discrete-event mesoscopic traffic simulation model for hybrid traffic simulation. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 1102–1107. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2006.1707369>
- Chen, Y., Wen, C., Jiang, C., & Jiang, X. (2021). Global sensitivity analysis of VISSIM parameters for project-level traffic emissions: a case study at a signalized intersection. <https://Doi-Org.Ezproxybib.Pucp.Edu.Pe/10.1080/09593330.2021.1934737>, 43(24), 3801–3820.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1934737>
- Chura Canahua, S. F. (2019). *Rediseño y microanálisis de la intersección de los jirones Oquendo, Tacna, Los Incas y Av. La Torre, Puno*. <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/147126>
- Eidmar, E., & Hultman, J. (2014). *Traffic Network Evaluation using Microscopic Simulation and Analytical Modelling. A Study of the Traffic Situation Arising after a High Profile Event at a Planned Football Stadium in Falkenberg (Master's thesis)*. Chalmers University of Technology.
- El software de planificación de tráfico líder en el mundo | PTV Visum*. (2023).
<https://www.ptvgroup.com/es/soluciones/productos/ptv-visum/>
- Elefteriadou, L. (2014). *An Introduction to Traffic Flow Theory*. 84. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8435-6>
- Fellendorf, M., & Vortisch, P. (2001). *Validation of the Microscopic Traffic Flow Model VISSIM in Different Real-World Situations Understanding the conditions of acceptability of walk-sharing View project Scenario Generation and Assessment Methods for Testing and Validation of Automated Driving Systems View project Validation of the Microscopic Traffic Flow Model VISSIM in Different Real-World Situations*. <https://www.researchgate.net/publication/268521190>
- Fontalvo Arrieta, K., & Guárdela Vasquez, P. (Director). (2013). *Modelación del tránsito vehicular con el software pvt vissim tramo Bomba el Gallo - Bomba el Amparo*. <https://doi.org/10.1/JQUERY.MIN.JS>
- Ge, Q., Zurich, E., Menendez, M., Verità, M., & Ascona, J. (2012). *Sensitivity Analysis for Calibrating VISSIM in Modeling the Zurich Network STRC 12 th Swiss Transport Research Conference Sensitivity Analysis for Calibrating VISSIM in Modeling the Zurich Network*.
- Gipps, P. G. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(2), 105–111. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(81\)90037-0](https://doi.org/10.1016/0191-2615(81)90037-0)

- Harris, T. M., Nourinejad, M., & Roorda, M. J. (2017). A Mesoscopic Simulation Model for Airport Curbside Management. *Journal of Advanced Transportation*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/4950425>
- Landolsi, J., Rehim, F., & Kalboussi, A. (2018). A macroscopic first-order traffic simulation with a modified dynamic node approach. *Https://Doi-Org.Ezproxybib.Pucp.Edu.Pe/10.1080/19427867.2018.1511320*, 12(1), 45–53. <https://doi.org/10.1080/19427867.2018.1511320>
- Law, A. (2014). *SIMULATION MODELING AND ANALYSIS* (A. Law, Ed.; 5th ed.).
- Law, A., & Kelton, D. (2000). *Simulation Modeling and Analysis* (A. Law & D. Kelton, Eds.).
- Maza, R., & Ivonne, Z. (2020). *Análisis del tráfico y propuesta de mejora en la intersección de mejora en la Av. Arnaldo Márquez y la calle Nazca en la ciudad de Lima*. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/16522>
- Meza Campos, F. (2018). *Micro simulación intermodal en la intersección de la Av. General Vivanco con la calle Manuel Ugarteche con el software vissim 8*. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/13146>
- Ni, D. (2003). 2DSIM: A prototype of nanoscopic traffic simulation. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, 47–52. <https://doi.org/10.1109/IVS.2003.1212881>
- Park, B. (Brian), & Won, J. (2006). *Microscopic Simulation Model Calibration and Validation Handbook*.
- Pilares, G. J., Asesor, M., & Carlos, I. J. (2023). *Análisis de tránsito peatonal y de ciclistas en sector 10 del distrito de Miraflores y microsimulación de desplazamientos vehiculares, peatonales y de ciclistas utilizando el software Vissim 9.0 en una intersección del sector*. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/24360>
- PTV Group. (2021). *Traffic Simulation Software | PTV Vissim | PTV Group*. <https://www.ptvgroup.com/en/solutionsproducts/ptv-vissim/>
- PTV Group. (2022). *USER MANUAL VISSIM 3.70*.
- Rehim, F., & Landolsi, J. (2013). The impact of traffic dynamic and wind angle on vehicular emission dispersion. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 21, 1–6. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2013.01.009>
- Saturn Software. (2023). <https://saturnsoftware2.co.uk/>
- Storani, F., di Pace, R., Bruno, F., & Fiori, C. (2021). Analysis and comparison of traffic flow models: a new hybrid traffic flow model vs benchmark models. *European Transport Research Review*, 13(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/S12544-021-00515-0/FIGURES/11>
- Tajudin, I., & Widodo, W. (2000). Optimization Model of Unsignalized Intersection to Signalized Intersection Using PTV.VISSIM (Study Case: Imogiri Barat and Tritunggal Intersection, Yogyakarta, Indonesia). *INTERNATIONAL JOURNAL OF INTEGRATED ENGINEERING*. <https://doi.org/10.30880/ijie.00.00.0000.00.0000>

- Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software.* (2004).
- TransCAD Transportation Planning Software.* (2023). <https://www.caliper.com/tcovu.htm>
- TRANSYT 16 Enhancements - TRL Software.* (2023). <https://trlsoftware.com/products/junction-signal-design/transyt/transyt-16-enhancements/>
- Treiber, M., & Kesting, A. (2013). Traffic flow dynamics: Data, models and simulation. *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*, 1–503. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-32460-4/COVER>
- Wiedemann, R. (1974). *Wiedemann, R., Simulation des Strassenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Band 8, Karlsruhe, Germany. 1974. - Búsqueda.*
<https://www.bing.com/search?q=Wiedemann%2C+R.%2C+Simulation+des+Strassenverkehrsflusse.s.+Schriftenreihe+des+Instituts+f%C3%BCr+Verkehrswesen+der+Universit%C3%A4t+Karlsruhe%2C+Band+8%2C+Karlsruhe%2C+Germany.+1974.&cvid=c631151e47744115ab966a59e5b5d5a0&aqs=edge..69i57.661j0j1&pglt=299&FORM=ANNTA1&PC=U531>
- Wu, J., Radwan, E., & Abou-Senna, H. (2017a). Determination if VISSIM and SSAM could estimate pedestrian-vehicle conflicts at signalized intersections. *Https://Doi-Org.Ezproxybib.Pucp.Edu.Pe/10.1080/19439962.2017.1333181*, 10(6), 572–585.
<https://doi.org/10.1080/19439962.2017.1333181>
- Wu, J., Radwan, E., & Abou-Senna, H. (2017b). Determination if VISSIM and SSAM could estimate pedestrian-vehicle conflicts at signalized intersections.
Https://Doi.Org/10.1080/19439962.2017.1333181, 10(6), 572–585.
<https://doi.org/10.1080/19439962.2017.1333181>
- Xing, Y., Lu, J., Lu, L., Jiang, C., & Cai, X. (2014). Comprehensive Safety Assessment Model of Road Long Tunnel Based on VISSIM. *Changed Publisher: TSI Press, 20(4)*, 501–514.
<https://doi.org/10.1080/10798587.2014.934595>
- Yang, M., Wang, W., Wang, B., & Han, J. (2013). Performance of the priority control strategies for bus rapid transit: Comparative study from scenario Microsimulation using VISSIM. *Discrete Dynamics in Nature and Society, 2013*. <https://doi.org/10.1155/2013/398938>
- Zhang, L., Zhang, S., Zhou, B., Jiao, S., & Huang, Y. (2021). An Improved Car-Following Model considering Desired Safety Distance and Heterogeneity of Driver's Sensitivity. *Journal of Advanced Transportation, 2021*. <https://doi.org/10.1155/2021/6693433>