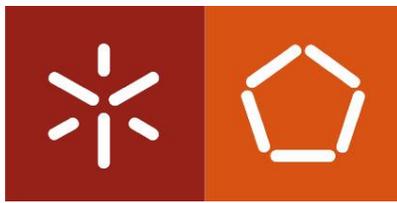




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Jaime Andrés Gómez Arias

**Modelación y calibración de tránsito
usando el software PTV VISSIM.
Estudio de caso de una intersección vial
en la ciudad de Guimarães, Portugal**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Jaime Andrés Gómez Arias

**Modelación y calibración de tránsito usando el software
PTV VISSIM. Estudio de caso de una intersección vial en
la ciudad de Guimarães, Portugal**

Disertación de Maestría
Ciclo de estudios integrados en Ingeniería Civil
Área de Especialización: Planeamiento e infraestructuras de
transporte.
Grado de doble titulación Universidade do Minho –
Universidad Industrial de Santander

Trabajo realizado bajo la orientación del:
Profesor Doctor Paulo Jorge Gomes Ribeiro
Universidade do Minho

Co-orientación:
Profesor Omar Giovanni Sánchez Rivera
Universidad Industrial de Santander

julio de 2017

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo quiero agradecer a Dios, por permitirme cumplir una etapa más de mi vida académica, y por la fortaleza brindada en los obstáculos presentes en la realización de este proyecto de grado.

Al profesor Paulo Jorge Gomes Ribeiro, por la orientación incondicional en cada una de las fases del proyecto.

Al profesor Omar Giovanny Sánchez Rivera, por la ayuda proporcionada para la escritura del proyecto.

A la empresa PTV GROUP, por haberme proporcionado una licencia completa del software PTV VISSIM, para el desarrollo del modelo de la intersección vial.

A mi madre, María Edy Arias Delgado, por su apoyo constante en la distancia, a mis amigos y compañeros de la Universidad Industrial de Santander en Colombia y a todas aquellas personas que de una u otra forma hicieron posible la realización de este proyecto.

Resumen

La micro simulación de tránsito es una herramienta que facilita los estudios y análisis de la red vial de las ciudades, con el fin de evaluar y mejorar el funcionamiento operacional, aumentando la capacidad de las vías. Así mismo, ayuda a planear de una mejor manera la malla vial de las ciudades y a tomar las mejores decisiones cuando se tienen varias opciones para la construcción o reforma de las carreteras, intersecciones o intercambiadores.

El presente trabajo muestra el estudio de una intersección vial controlada por señales semafóricas y reglas de prioridad, en la ciudad de Guimarães, Portugal, por medio de la micro simulación de tránsito con el software PTV VISSIM 9.0. Para llevar a cabo el análisis, fue necesario recopilar datos en campo, ajustar valores para los principales parámetros utilizados por el software, y realizar una adecuada calibración y validación del modelo creado.

Con el modelo calibrado y validado, fue posible proponer soluciones y evaluar escenarios alternativos, en lo que concierne a el aumento del volumen vehicular y mejoras en los tiempos de las fases de los semáforos.

Palabras clave: Micro simulación; funcionamiento operacional; PTV Vissim; calibración y validación.

Abstract

The micro-simulation of traffic is a tool that facilitates the studies and analysis of a city's road network, in order to evaluate and improve the operational performance, increasing the capacity of the roads. It also helps to better plan the road network of cities and make the best decisions when there are several options for the construction or reform of roads, intersections or interchanges.

The present work shows the study of a traffic intersection controlled by traffic lights and priority rules, in the city of Guimarães, Portugal, by means of the micro simulation of traffic with the PTV software VISSIM 9.0. To carry out the analysis, it was necessary to collect data in the field, to adjust values for the main parameters used by the software, and to carry out an adequate calibration and validation of the model created.

With the calibrated and validated model, it was possible to propose solutions and to evaluate alternative scenarios, regarding the increase of vehicular volume and improvements in the times of the phases of the traffic lights.

Keywords: Microsimulation; operational performance; PTV Vissim; calibration and validation.

Resumo

A micro-simulação de trânsito é uma ferramenta que facilita os estudos e análise da rede rodoviária das cidades, com o fim de avaliar e melhorar o funcionamento operacional, aumentando a capacidade das estradas. De igual modo, ajuda a planear de uma melhor maneira a rede rodoviária das cidades e a tomar as melhores decisões quando existem várias opções para a construção ou reforma das estradas, intersecções e nós.

O presente trabalho apresenta o estudo de uma intersecção controlada por sinais luminosos e regras de prioridade, na cidade de Guimarães, Portugal, por meio da micro simulação de trânsito com o software PTV VISSIM 9.0. Para fazer a análise, foi necessário recopilar dados em campo, ajustar valores para os principais parâmetros utilizados pelo software, e realizar uma adequada calibração e validação do modelo criado.

Com o modelo calibrado e validado, foi possível propor soluções e avaliar cenários alternativos, como o aumento do volume veicular e melhoras nos tempos nas fases dos sinais luminosos.

Palavras-chave: Micro-simulação; funcionamento operacional; PTV Vissim; calibração y validação.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Encuadramiento	1
1.2 Objetivos del trabajo.....	3
1.3 Organización del trabajo.....	4
2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1 Generalidades	5
2.2 Tipos de modelación de tráfico	8
2.3 Ventajas de la micro simulación de tráfico	10
2.4 Limitaciones y desventajas de los modelos de micro simulación de tráfico	11
2.5 Paquetes de software de micro simulación existentes en el mercado.....	11
2.5.1 Comparación entre los software de micro simulación de tráfico (PTV Vissim y Aimsun)	14
2.5.1.1 Características generales de la simulación	14
2.5.1.2 Características de los conductores	15
2.5.1.3 Extracción de datos.....	17
2.5.1.4 Calibración y parámetros.....	18
2.5.1.5 Evaluación final de los software PTV Vissim y Aimsun	19
2.6 Software de micro simulación PTV Vissim	19
2.6.1 Bases del modelo de simulación de tráfico	21
2.6.1.1 Seguimiento de vehículo	22
2.6.1.2 Modelos de movimiento lateral	25
2.6.1.3 Control por señales semafóricas	27
2.6.2 Casos de aplicación	28
3. METODOLOGÍA PARA LA CREACIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MODELO DE MICRO SIMULACIÓN EN PTV VISSIM	33
3.1 Recolección de datos geométricos y espacio público de la intersección vial.....	34
3.2 Recolección de datos en campo.....	34
3.2.1 Volúmenes vehiculares.....	34

3.2.2 Velocidad de los vehículos	35
3.2.3 Volúmenes peatonales	35
3.2.4 Velocidad de los peatones	35
3.2.5 Longitud de las filas de espera	36
3.2.6 Tiempos de viaje de vehículos	36
3.2.7 Tiempos de ciclo y fases de los semáforos	36
3.2.8 Tiempos de parada de los buses de transporte público.....	36
3.3 Metodología de calibración y validación.....	37
3.3.1 Calibración	37
3.3.2 Validación.....	37
4. CASO DE ESTUDIO	39
4.1 Descripción general de las calles	39
4.2 Proceso de modelación	43
4.2.1 Malla vial de la intersección	43
4.2.2 Áreas de conflicto	44
4.2.3 Modelación de vehículos	45
4.2.3.1 Volúmenes vehiculares.....	46
4.2.3.2 Velocidades de los vehículos.....	51
4.2.3.3 Aceleración máxima y deseada, desaceleración máxima y deseada	56
4.2.4 Modelación de peatones	57
4.2.4.1 Volúmenes peatonales	57
4.2.4.2 Velocidad de los peatones	59
4.2.5 Modelación de semáforos	60
4.2.6 Modelación del transporte público	67
4.2.7 Modelación de estacionamientos.....	71
4.2.8 Elementos para generar resultados de la modelación.....	71
4.2.9 Parámetros adicionales de simulación.....	74
4.3 Calibración del modelo.....	75
4.3.1 Parámetros fijos	76
4.3.2 Parámetros a modificar	77
4.4 Validación del modelo.....	78
4.4.1 Longitudes de las filas de espera	78

4.4.2 Flujos vehiculares	81
4.4.3 Tiempos de viaje de los vehículos	81
4.5 Análisis de los resultados del modelo de micro simulación	83
4.5.1 Filas de espera en los semáforos.....	83
4.5.2 Demora promedio de los vehículos	87
4.6 Identificación de problemas en la intersección.....	88
4.7 Soluciones y análisis de escenarios alternativos	89
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	97
5.1 Conclusiones generales.....	97
5.2 Propuestas de trabajos futuros	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
ANEXOS	103
Anexo 1: Datos del aforo vehicular	103
Anexo 2: Datos recogidos de las velocidades de los vehículos.....	106
Anexo 3: Datos de los conteos de las filas de espera	108

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

DMRB – Design Manual for Roads and Bridges

TRB – Transportation Research Board

PTV – Planung Transport Verkehr

ITS – Intelligent Transportation Systems

KIT - Karlsruhe Instituto de Tecnología.

API – Application Programming Interfaces.

HCM – High Capacity Manual

TP – Transporte Público

AASHTO - The American Association of State Highway Transportation Officials

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo clásico de transporte de los cuatro pasos (Ortúzar & Willumsen, 2011)	6
Figura 2 - Nivel de detalle de los modelos de simulación (SS, 2017).....	9
Figura 3 - Relación y función de los principales software PTV (PTV Group, 2017)	20
Figura 4 - Representación esquemática de los módulos de PTV VISSIM (Barceló, 2010).....	21
Figura 5 - Lógica de seguimiento de vehículo de Wiedemann (Vissim, 2016)	23
Figura 6 – Proceso de la metodología para la creación, calibración y validación del modelo de micro simulación.	33
Figura 7 - Intersección vial en estudio. Adaptada de Google Earth	39
Figura 8 – Avenida Alameda Dr. Alfredo Pimenta	40
Figura 9 – Avenida São Gonçalo.....	40
Figura 10 – Avenida Conde de Margaride	41
Figura 11 – Calle Paio Galvão.....	41
Figura 12 – Calle Gil Vicente.....	42
Figura 13 – Rotonda. Tomada de Google Earth	42
Figura 14 – Malla vial creada en PTV VISSIM 9.0	43
Figura 15 - Áreas de conflicto dadas en la rotonda sentido Sur – Norte.....	44
Figura 16 – Movimientos vehiculares para la realización del aforo vehicular.....	46
Figura 17 - Conteo por tipos de vehículos en cada uno de los accesos a la intersección en la hora 17:30 - 18:30	47
Figura 18 - Ruta de la A. Conde Margaride a la calle Paio Galvão	49
Figura 19 - Ruta de la A. Conde Margaride a la A. Alameda Dr. Alfredo Pimenta	49
Figura 20 - Ruta de la A. Conde Margaride a la avenida São Gonçalo.....	49
Figura 21 - Ruta de retorno de la avenida Alameda Dr. Alfredo Pimenta a la misma avenida.....	50
Figura 22 - Ruta de la A. Alameda Dr. Alfredo Pimenta a la avenida São Gonçalo	50
Figura 23 – Ruta de la A. Alameda Dr. Alfredo Pimenta a la calle Paio Galvão.....	50
Figura 24 – Ruta de la calle Gil Vicente a la A. São Gonçalo	50
Figura 25 – Ruta de la calle Gil Vicente a la A. Alameda Dr. Alfredo Pimenta.....	50
Figura 26 - Ruta de la calle Gil Vicente a la calle Paio Galvão	50
Figura 27 - Ruta de la calle São Gonçalo a la A. Alameda Dr. Alfredo Pimenta	50
Figura 28 - Ruta de la calle São Gonçalo a la calle Paio Galvão	50
Figura 29 - Ruta de retorno de la calle São Gonçalo a la misma calle.....	50
Figura 30 – Distancia de medición para velocidades de los vehículos	51

Figura 31 – Histograma de frecuencias acumuladas de la velocidad de los vehículos ligeros	52
Figura 32 - Histograma de frecuencias acumuladas de la velocidad de los buses	53
Figura 33 - Histograma de frecuencias acumuladas de la velocidad de los vehículos pesados	54
Figura 34 - Histograma de frecuencias acumuladas de la velocidad de las motos.....	55
Figura 35 - Áreas y rutas peatonales en los atravesamientos regidos por semáforos.....	58
Figura 36 - Áreas y rutas peatonales en los atravesamientos sin semáforos	58
Figura 37 – Diagrama de fases de la Avenida Conde Margaride en el software PTV Vissim.	62
Figura 38 – Diagrama de fases de la Avenida São Gonçalo Rotonda en el software PTV Vissim.....	63
Figura 39 - Diagrama de fases de la calle Gil Vicente en el software PTV Vissim.....	64
Figura 40 - Diagrama de fases de la calle Paio Galvão en el software PTV Vissim.....	65
Figura 41 - Diagrama de fases de la Rotonda sentido Sur – Norte en el software PTV Vissim	66
Figura 42 - Diagrama de fases de toda la intersección vial en el software PTV Vissim.....	67
Figura 43 – Paradas de buses con bahía en la Avenida São Gonçalo y parada de bus en la calzada en la Avenida Alameda Doutor Alfredo Pimenta.....	68
Figura 44 – Parte del recorrido del bus de la línea 13 con sus respectivas paradas	69
Figura 45 – Ubicación de las distancias para calcular el tiempo de viaje promedio de los vehículos.....	73
Figura 46 – Contadores de tiempo de viaje ubicados desde la avenida Conde de Margaride..	74
Figura 47 – Modelo creado en PTV Vissim	75
Figura 48 – Fila de espera en la avenida Conde de Margaride.....	84
Figura 49 - Ejemplo 1 de Fila de espera en la avenida Conde de Margaride en el software PTV Vissim	84
Figura 50 – Ejemplo 2 de Fila de espera en la avenida Conde de Margaride en el software PTV Vissim	85
Figura 51 – Fila de espera en la rotonda sentido Norte – Sur	85
Figura 52 – Fila de espera en la rotonda sentido Norte – Sur en el software PTV Vissim	86
Figura 53 – Fila de espera en la calle Gil Vicente.....	86
Figura 54 – Fila de espera en la calle Gil Vicente en el software PTV Vissim	86
Figura 55 – Diagrama de fases propuesta para los semáforos de la intersección.....	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 – Lista de los modelos de micro simulación	12
Tabla 2 – Clasificación de acuerdo a los objetivos de simulación (Algers, et al., 1998)	12
Tabla 3 - Características generales de la simulación. Adaptado de (Melo, et al., 2005).....	15
Tabla 4 - Características de los conductores. Adaptado de (Melo, et al., 2005)	17
Tabla 5 – Extracción de datos. Adaptado de (Melo, et al., 2005)	18
Tabla 6 – Calibración y parámetros. Adaptado de (Melo, et al., 2005)	19
Tabla 7 – Evaluación final de los software	19
Tabla 8 - Conteo por tipos de vehículos en cada uno de los accesos a la intersección en la hora 17:30 - 18:30.....	47
Tabla 9 – Composiciones vehiculares de los accesos de la intersección.....	49
Tabla 10 – Estadística descriptiva de las velocidades de los vehículos ligeros	52
Tabla 11 – Tabla de frecuencias de las velocidades de los vehículos ligeros	52
Tabla 12 - Estadística descriptiva de las velocidades de los buses	53
Tabla 13 - Tabla de frecuencias de las velocidades de los buses	53
Tabla 14 - Estadística descriptiva de las velocidades de los vehículos pesados	54
Tabla 15 - Tabla de frecuencias de las velocidades de los vehículos pesados	54
Tabla 16 - Estadística descriptiva de las velocidades de las motos.....	55
Tabla 17 - Tabla de frecuencias de las velocidades de las motos.....	55
Tabla 18 – Conteo de peatones en los atravesamientos peatonales.....	57
Tabla 19 – Datos de Velocidad de los peatones medidos en campo	59
Tabla 20 - Datos del semáforo de vehículos de la Avenida Conde de Margaride	61
Tabla 21 - Datos del semáforo de peatones de la Avenida Conde de Margaride.....	61
Tabla 22 - Datos del semáforo de vehículos de la Avenida São Gonçalo Rotonda	62
Tabla 23 - Datos del semáforo de peatones de la Avenida São Gonçalo Rotonda.....	62
Tabla 24 - Datos del semáforo de vehículos de la calle Gil Vicente.....	63
Tabla 25 - Datos del semáforo de peatones de la calle Gil Vicente	64
Tabla 26 - Datos del semáforo de vehículos de la Calle Paio Galvão.....	64
Tabla 27 - Datos del semáforo de peatones de la Calle Paio Galvão	65
Tabla 28 - Datos del semáforo de vehículos de la Rotonda sentido Sur – Norte	66
Tabla 29 - Datos del semáforo de peatones de la Rotonda sentido Sur – Norte	66
Tabla 30 – Número de buses de transporte público por cada acceso de la intersección vial en la hora de máxima demanda vehicular	68

Tabla 31 – Mediciones de tiempos de parada de buses en la calle Paio Galvão, Avenida Conde de Margaride y Alameda Dr. Alfredo Pimenta.....	70
Tabla 32 - Longitud de los tipos de vehículos (Coches, 2017)	78
Tabla 33 – Resultados de los conteos de las filas de espera en las calles con semáforo.....	79
Tabla 34 – Filas de espera máxima y promedio medidas en campo para cada calle con semáforo	80
Tabla 35 – Tabla de validación para las filas de espera máxima y promedio	80
Tabla 36 – Validación del modelo teniendo en cuenta los flujos vehiculares.....	81
Tabla 37 – Datos y promedios de los tiempos de viaje medidos en campo de los vehículos ..	82
Tabla 38 – Validación del modelo teniendo en cuenta los tiempos de viaje de los vehículos .	83
Tabla 39 – Resultados de las filas de espera en los accesos con semáforos.....	83
Tabla 40 – Clasificación del nivel de servicio según HCM (TRB, 2010).....	87
Tabla 41 – Tiempos promedio de demora en los accesos de la intersección	87
Tabla 42 – Rangos para definir el número de carriles para giros a la izquierda (Costa & Macedo, 2008).....	89
Tabla 43 - Datos de accesos con movimientos de giro a la izquierda.....	90
Tabla 44 – Tiempo propuesto de las fases de los semáforos (vehicular y peatonal) de la Avenida Conde de Margaride.....	91
Tabla 45 - Tiempo propuesto de las fases de los semáforos (vehicular y peatonal) de la Avenida São Gonçalo	91
Tabla 46 - Tiempo propuesto de las fases de los semáforos (vehicular y peatonal) de la calle Gil Vicente.....	91
Tabla 47 - Tiempo propuesto de las fases de los semáforos (vehicular y peatonal) de la Rotonda sentido Sur – Norte	92
Tabla 48 - Tiempo propuesto de las fases de los semáforos (vehicular y peatonal) de la calle Paio Galvão	92
Tabla 49 – Diferencias entre los tiempos de los semáforos propuestos y actuales de la Avenida Conde de Margaride y São Gonçalo (Rotonda Norte – Sur).....	93
Tabla 50 - Diferencias entre los tiempos de los semáforos propuestos y actuales de la calle Gil Vicente.....	93
Tabla 51 - Diferencias entre los tiempos de los semáforos propuestos y actuales de la rotonda sentido Sur – Norte y de la calle Paio Galvão	94
Tabla 52 – Filas de espera máxima y promedio con los semáforos propuestos.....	94
Tabla 53 – Tiempos promedio de demora de los vehículos con los semáforos propuestos	94

Tabla 54 – Volúmenes vehiculares para cada aumento.....	95
Tabla 55 - Filas de espera máxima y promedio con el aumento del volumen vehicular.....	95
Tabla 56 - Tiempos promedio de demora de los vehículos con el aumento del flujo vehicular	96

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Encuadramiento

Una red vial es uno de los activos más importantes de cualquier país, ya que se encuentra íntimamente relacionada con su desenvolvimiento social y económico; dicha red está constituida por un amplio conjunto de infraestructuras como los caminos urbanos o calles y respectivos puntos de intersección, designados por cruzamientos o cruces de caminos (Cal y Mayor, 2007).

La interacción de los flujos y movimientos a nivel de los cruzamientos o de las intersecciones, genera obligatoriamente puntos de conflicto que pueden representar puntos de embotellamiento vehicular y deficiente desempeño de la red vial, especialmente en el medio urbano (AASHTO, 2001). Por eso, es importante estudiar y analizar el desempeño y funcionamiento de las intersecciones, intentando aumentar la eficiencia en la circulación de los movimientos direccionales de las diferentes corrientes de tránsito, así como la seguridad de los usuarios (peatones, ciclistas, conductores) a través de la resolución de dichos puntos de conflicto y de los problemas que más se evidencian en las intersecciones.

El análisis y la evaluación de una intersección pueden ayudar el mejoramiento de su capacidad vial, para esto, es necesario tener en cuenta ciertos criterios que tienen base en el volumen vehicular, retrasos generados por los controladores de tránsito y la saturación del flujo vehicular (García, et al., 2015). Los criterios antes mencionados permiten calcular el nivel de servicio de la intersección, que según el Manual de Capacidad de Carreteras del 2010 de los Estados Unidos de América, es: una medida de calidad que describe las condiciones de funcionamiento dentro de un flujo de tránsito, en general, en términos de medidas de servicios tales como la velocidad y el tiempo de viaje, la libertad de maniobra, las interrupciones de tráfico, el confort y la comodidad (TRB, 2010).

Al conocer el nivel de servicio que la infraestructura de una intersección ofrece al usuario, se determina si ésta requiere alguna acción correctiva para mejorar su funcionalidad (García, et al., 2015).

Por consiguiente, es necesario definir, bosquejar y analizar un conjunto de soluciones alternativas para mejorar o disminuir los problemas específicos en los cruzamientos, como cuestiones de siniestralidad y congestión crónica.

Así, es importante percibir el comportamiento y las interacciones entre los diferentes modos de transporte que no contemplan las metodologías convencionales de una forma dinámica, como las del Highway Capacity Manual – HCM (TRB, 2010), que son utilizadas en los estudios de tránsito, debiendo de esta forma utilizar métodos que se adapten mejor y traduzcan la variabilidad que la realidad nos ofrece, siendo necesario utilizar y estudiar técnicas de simulación, más propiamente de micro simulación, para el dimensionamiento y evaluación del desempeño de las diversas soluciones y escenarios de las intersecciones.

En la micro simulación de tráfico y transporte se abordan modelos que representan de una manera simplificada una parte del mundo real, donde es posible observar y analizar ciertos elementos importantes como la velocidad media de los vehículos, el tiempo de espera en los cruzamientos, la longitud máxima de las filas de espera, y el nivel de servicio; con el propósito de replicar el comportamiento de las intersecciones (Barceló, 2010).

El creciente poder de las tecnologías informáticas, la evolución de los software de ingeniería y la ventaja de sistemas inteligentes de transporte han hecho que los simuladores de tráfico se conviertan en una de las herramientas más usadas para realizar análisis de transporte en aspectos como diseño y evaluación de sistemas de tráfico. La grandiosa habilidad de estos simuladores para emular la variabilidad en el tiempo de los fenómenos del transporte hace que realmente sean considerados un instrumento único para captar la gran complejidad de los sistemas de tráfico (Ortúzar & Willumsen, 2011).

En los últimos años, la micro simulación se ha movido del ámbito académico al mundo profesional. Actualmente se encuentra disponible en el mercado una gran variedad de software de simulación de tráfico, que están siendo utilizados por miles de usuarios, consultores, investigadores y agencias públicas alrededor de todo el mundo. Sin embargo, la simulación de tráfico todavía carece de un tratamiento unificado, cada año se publican docenas de artículos en revistas científicas sobre su teoría y aplicación, pero realmente el único tratamiento integral se encuentra en los manuales de usuario de varios productos de software (Barceló, 2010).

1.2 Objetivos del trabajo

Con este trabajo se pretende analizar un modelo de micro simulación para estudiar y crear soluciones en intersecciones viales, con el fin de evitar, principalmente, fenómenos de congestión y siniestralidad. Para tal efecto será realizada una aplicación práctica que corresponderá a un estudio de caso que permita conocer el funcionamiento y desenvolvimiento de escenarios de evolución de tránsito en una intersección regida por señales luminosas (semáforos) y reglas de prioridad.

El principal objetivo de este trabajo consiste en realizar la modelación, calibración y validación de una intersección vial mediante la micro simulación, con el fin de analizar su desempeño, proponer soluciones a los principales problemas y evaluar escenarios alternativos, a través del software especializado PTV VISSIM.

Para llevar a cabo el objetivo principal, es necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Presentar un estado de arte sobre la micro simulación, principalmente en relación a las intersecciones viales, y realizar una comparación entre dos software de micro simulación, profundizando en el conocimiento de sus características, funcionamiento y datos que necesitan para su aplicación, con el fin de escoger el programa informático que permita simular de una mejor manera la intersección vial.
- Plantear una metodología para la recolección de datos en campo, para la creación, calibración y validación de un modelo de micro simulación, teniendo en cuenta los parámetros del software PTV VISSIM.
- Efectuar la debida recopilación de todos los datos necesarios en campo, crear el modelo de micro simulación, realizar la calibración y validación del mismo.
- Desarrollar un caso de estudio que permita analizar los resultados obtenidos a través de la simulación del modelo calibrado y validado, con el fin de proponer posibles soluciones a los problemas encontrados y evaluar escenarios alternativos.

1.3 Organización del trabajo

Con el objetivo de cumplir de manera satisfactoria los objetivos propuestos, este trabajo está organizado en cinco capítulos, siendo el presente capítulo de introducción en donde se encuentra el encuadramiento, los objetivos de la realización de este proyecto de grado y la organización del mismo.

El capítulo dos está destinado para el estado del arte, es decir, un resumen de las investigaciones hechas por otros autores, la respectiva información teórica sobre la simulación de transporte, principalmente de la micro simulación; una comparación entre dos software de micro simulación, con el fin de encontrar el programa que será utilizado en este trabajo, y las principales características del software escogido para la realización del caso de estudio.

En el tercer capítulo se encontrará la metodología para la creación, calibración y validación de un modelo de micro simulación enfocado a una intersección vial, que corresponderá sobre todo a un análisis de la fase de afectación y asignación de tráfico del modelo clásico de transporte de los cuatro pasos, utilizando el software PTV Vissim.

El cuarto capítulo muestra la realización y aplicación de un caso de estudio, describiendo paso a paso el proceso de modelación, calibración y validación, el análisis de los resultados y las posibles soluciones y escenarios alternativos para la intersección vial de la ciudad de Guimarães, Portugal.

En el quinto capítulo son presentadas las conclusiones generales del trabajo y las propuestas para la realización de trabajos futuros.

Finalmente, se presentan las referencias bibliográficas consultadas para realización de este trabajo de grado y los anexos del documento.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Generalidades

Actualmente en muchas de las ciudades del planeta se presentan diversos casos donde se evidencian graves problemas de transporte y movilidad, afectando de cierta manera la sustentabilidad de las ciudades, es decir, los ámbitos económicos, sociales y ambientales. Estos problemas se generan básicamente por una deficiente infraestructura vial (geometría y mantenimiento), por una mala planeación de la misma, y por eventos extraordinarios (desajuste entre oferta y procura), generando congestión vehicular, principalmente en las zonas urbanas donde se intersecan las vías y hay gran cantidad de desplazamientos vehiculares.

A medida que se presentan congestiones en las vías, se afecta el ámbito económico de la ciudad, dado a que las demoras en los viajes, lleva a que los usuarios gasten más dinero y tiempo. De igual manera se afecta el ámbito social, ya que entre más se invierte tiempo en los desplazamientos, se puede compartir menos con los familiares y personas cercanas; y por último se ve afectado el ámbito ambiental, debido a la gran contaminación que se genera al existir congestiones de gran magnitud.

Para encontrar soluciones de una manera más práctica y didáctica, fueron creados una serie de paquetes computacionales que permiten crear modelos para simular y entender la realidad de los transportes y la movilidad, interactuando con diferentes tipos de vehículos (ligeros, pesados, motocicletas), sistemas de transporte público (metro, buses con carril exclusivo, tranvía, trenes), ciclistas y peatones. Estos modelos, son creados a partir de la simulación, donde se debe tener en cuenta la previsión de los impactos al aplicar diversas medidas de gestión del tráfico (Ortúzar & Willumsen, 2011). Las medidas incluyen la coordinación de señales luminosas, los sistemas de un solo sentido en los carriles, los diferentes tipos de control en las intersecciones (prioridad de la carretera principal, glorietas y semáforos), sistemas de información para el conductor y señalización (Luk & Tay, 2006).

La micro simulación es, entonces, una forma de representar y simular condiciones reales de la situación del transporte en una determinada área o región, teniendo en cuenta diversos factores y fenómenos variantes a través del tiempo; lo que permite analizar y mejorar los escenarios

negativos que se presentan en la red vial (congestionamiento, accidentalidad y embotellamiento).

En la simulación de un sistema vial, intervienen diferentes factores que crean la dinámica de la red vial, estos son: **el componente humano**, el cual se visualiza en tres categorías: usuarios del sistema vial (peatones, pasajeros y conductores), siendo este último de gran influencia en el comportamiento de la red, y **el componente de infraestructura física**, el cual lo conforma la infraestructura geométrica de la malla vial, los sistemas reguladores de tránsito y los vehículos en sus diferentes categorías, como transporte público o privado (Suarez, 2007).

Para conseguir un mayor nivel de exactitud y complejidad, algunos simuladores, utilizan un modelo de micro simulación que les permita operar a nivel individual. Sin embargo, esto requiere de un alto nivel de procesamiento computacional (Rodríguez & Figueroa, 2012).

Existe una herramienta fundamental para pronosticar la demanda futura y el rendimiento de un sistema de transporte, conocido como el modelo clásico de transporte de los cuatro pasos, típicamente definido a escala regional o municipal (McNally, 2007). Los modelos de transporte permiten obtener cierta información cuantitativa sobre el futuro desempeño en una red de transporte, para evaluar diferentes alternativas. A seguir, será descrito brevemente el modelo, teniendo en cuenta los aportes realizados en (Viegas, 2011), (Castiglione, et al.,2015) y (Ortúzar & Willumsen, 2011). En la Figura 1, se muestra la forma general del modelo.

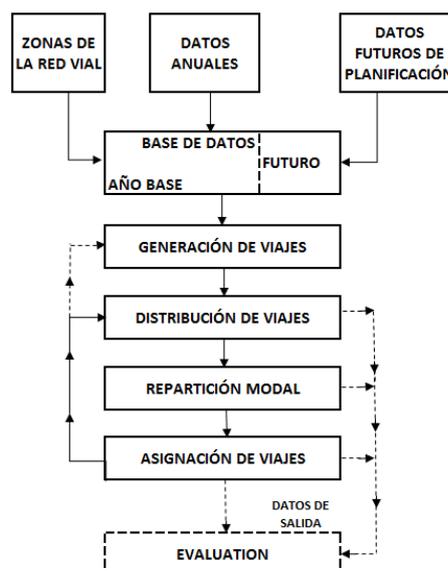


Figura 1 - Modelo clásico de transporte de los cuatro pasos (Ortúzar & Willumsen, 2011)

El proceso inicia con la **generación de viajes**, donde el objetivo principal es obtener la cantidad de viajes generados y atraídos por cada una de las zonas, para diversos propósitos de viajes (actividades), teniendo en cuenta la existencia de instalaciones educativas y recreativas, los niveles de actividad económica, centros comerciales, zona de oficinas, entre otros. Este primer paso se relaciona directamente con una simple pregunta que se formulan los conductores de la red de transporte: ¿Voy o no voy?, estimando de una manera preliminar la matriz Origen – Destino del sistema de transporte.

En el segundo paso (**distribución de viajes**), se tiene como referencia responder a la siguiente pregunta: ¿Para dónde voy?, es decir, obteniendo y sabiendo el número de viajes que se van a realizar, es necesario estimar la fracción de los viajes que se desplazan a cada zona de la red, haciendo parejas entre los orígenes y los destinos para crear y consignar los viajes en la matriz Origen – Destino.

A seguir, el proceso continúa con la **selección o repartición modal**, donde se debe tener en cuenta la siguiente pregunta: ¿Con qué modo de transporte me voy a desplazar?, en base a eso, es necesario dividir el total de los viajes entre cada pareja de zonas por modos, para esto, se debe tener información detallada de la red y la provisión de transporte público y privado. Como resultado, se obtienen varias matrices Origen – Destino con los viajes de cada modo de transporte.

Finalizando con el proceso, se realiza la **atribución o afectación de tránsito a la red**, donde se obtiene como resultado final del modelo, la cantidad de viajes que pasan por cada una de las calles en diferentes modos de transporte, respondiendo así a la pregunta ¿Por cuál camino voy?, de esta manera se obtienen las diferentes matrices Origen – Destino asignadas a las diferentes redes de transporte (red vial, red de transporte público, peatonal, etc.) determinando las rutas que tomarán los conductores del sistema de transporte. Es este paso el más importante para la micro simulación, ya que se asignan las cantidades de vehículos de cada modo de transporte en cada una de las rutas determinadas para la intersección vial.

Además del modelo de los cuatro pasos dónde se consigue generar, estimar y atribuir los viajes de los diferentes modos de transporte a la red, es de vital importancia realizar una calibración y validación del modelo de micro simulación realizado.

La calibración y validación son pasos estrictamente ligados y necesarios, debido a que, si los modelos realizados no son calibrados y validados, pueden generar resultados engañosos y sin confiabilidad (Park, et al., 2006).

La idea principal de la calibración consiste en ajustar algunos parámetros importantes del modelo (velocidad deseada de los vehículos, aceleración máxima y deseada de los mismos, velocidad de los peatones, distancia media de separación entre vehículos y obstáculos estáticos) con el fin de disminuir la diferencia entre los resultados obtenidos a través de la simulación y los datos medidos en campo.

A pesar de que se han realizado varias investigaciones sobre los métodos de calibración, aún no se ha propuesto formalmente un proceso o guía que se deba cumplir en todos los casos, esto debido a que cada modelo se realiza para analizar variables específicas, dependiendo de lo que se quiera estudiar y analizar.

La validación del modelo es un proceso que se realiza después de la calibración, realizando una comparación entre los resultados obtenidos mediante la simulación y datos medidos en campo (longitud máxima y promedio de la fila de espera, flujos y tiempos vehiculares), generando un método iterativo, en el cual, se debe seguir calibrando parámetros de la simulación hasta conseguir una cercanía o similitud entre los datos.

2.2 Tipos de modelación de tráfico

El modelado de tráfico se puede clasificar en los siguientes tres tipos (Luk & Tay, 2006): simulación microscópica, macroscópica y mesoscópica.

- Simulación microscópica: Esta técnica se relaciona directamente con la teoría del flujo de tráfico y el comportamiento del conductor se rige por un conjunto de ecuaciones, tales como el seguimiento vehicular, el cambio de carril, la aceptación de la brecha y dispersión del pelotón. El movimiento de un vehículo en una simulación microscópica se traza en una red de carreteras a través del tiempo, con un incremento de tiempo de una fracción de segundo. Por lo tanto, es posible una simulación detallada de la interacción vehículo-carretera bajo la influencia de una medida de control. Esta técnica es útil para una amplia gama de aplicaciones, pero requiere de más recursos computacionales. Están implicados grandes números de generadores aleatorios, la

calibración de estos modelos requiere de más esfuerzo, y es difícil optimizar los parámetros del modelo.

- **Simulación macroscópica:** En este tipo de simulación los vehículos no se simulan de forma individual, sus movimientos son simulados como paquetes en una red, con un lapso de tiempo de uno o varios segundos. Se caracterizan por ser representaciones continuas del flujo de tránsito, se refieren a medidas generales como la relación entre flujo, velocidad y densidad. Estas características del modelo pierden mucho detalle, pero ganan en habilidad para tratar los problemas grandes dentro de tiempos de ejecución cortos (Melo, et al., 2005). La simulación macroscópica es determinista, por naturaleza, y es útil para el diseño y optimización de redes.
- **Simulación híbrida (mesoscópica):** Esta técnica combina una simulación microscópica detallada de algunos componentes clave de un modelo (por ejemplo, operaciones de intersección) con los modelos analíticos (por ejemplo, relaciones de flujo de velocidad para la asignación de tráfico). Esta técnica se conoce como simulación mesoscópica, donde se utiliza una metodología para simular pelotones de vehículos como si fueran uno solo (Suarez, 2007).

La siguiente Figura muestra de una manera más clara y didáctica, la clasificación de los diferentes tipos de simulación existentes en cuanto al nivel de detalle.

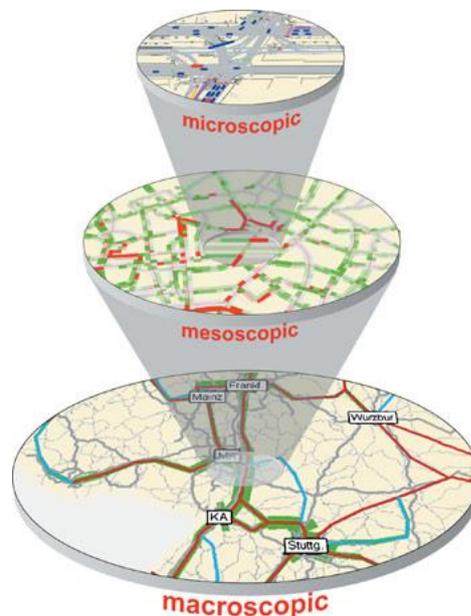


Figura 2 - Nivel de detalle de los modelos de simulación (SS, 2017)

Para la realización del caso de estudio pertinente a este trabajo de grado, es más adecuado realizar una simulación microscópica, ya que, conviene saber en una mayor proporción la interacción del vehículo con la intersección vial, analizar de una mejor forma el comportamiento individual de cada usuario y obtener resultados tales como la longitud de la fila de espera máxima, el tiempo perdido en los accesos de la intersección vial, el flujo de vehículos simulado, entre otros.

2.3 Ventajas de la micro simulación de tráfico

La mayor ventaja de la micro simulación de tráfico está relacionada con la creación de modelos que pueden producir resultados visuales, permitiendo discutir y analizar situaciones complejas de propuestas de tráfico y transporte del mundo real. De una manera más amplia, permiten una representación visual de problemas y soluciones más comprensibles para los gerentes, modeladores de proyectos e ingenieros a la hora de tomar decisiones importantes frente a la situación de la movilidad y transporte en diversas ciudades del mundo.

Según (Luk & Tay, 2006), la micro simulación ofrece ventajas con respecto a las técnicas tradicionales de análisis de tráfico en tres campos específicos: la claridad, precisión y flexibilidad.

- **Claridad:** Es posible por medio de la micro simulación observar en una pantalla de visualización en tiempo real las operaciones de tráfico de un área determinada. Los diferentes software permiten obtener animaciones fáciles de comprender para comprobar que la red está funcionando de la manera como se esperaba, y que el comportamiento de los vehículos se está modelando de forma sensata. Con la micro simulación, lo que se ve, es lo que se obtiene, es decir, si un modelo de red no tiene un buen aspecto, es porque probablemente no está bien hecho (Druitt, 2008).
- **Precisión:** Mediante la posibilidad de modelar el comportamiento de vehículos de forma individual a través de redes congestionadas, existe la posibilidad de un modelado más preciso de las operaciones de tráfico en intersecciones complejas o simples. Los conductores de los vehículos toman la propia decisión sobre la velocidad, el cambio de carril y la elección de la ruta específica, lo que podría representar de una mejor manera lo que se da en el mundo real, caso contrario lo que sucede en el modelo de macro

simulación, donde, todos los vehículos se comportan de igual manera y se suponen valores fijos de flujos de saturación.

- **Flexibilidad:** Se puede evaluar una mayor gama de problemas y soluciones que con métodos convencionales, por ejemplo, prioridades de transporte público, facilidades de demanda peatonal, gestión de filas de espera en las intersecciones, puestos de peaje, obras viales, ondas de choque, incidentes (accidentes viales), fusiones de carreteras secundarias, entre otros. De igual manera, es posible modular la interacción entre diferentes tipos de vehículos, transporte público y peatones. Permite analizar situaciones y resultados de diferentes variables, alternando valores como: los volúmenes vehiculares, la velocidad media de los vehículos, los tiempos de las fases de los semáforos, entre otros.

2.4 Limitaciones y desventajas de los modelos de micro simulación de tráfico

La principal limitación de la micro simulación es que ninguna modelación puede representar de manera exacta lo que ocurre en la realidad, especialmente, el comportamiento humano del conductor, peatones y ciclistas; por eso, se debe realizar un adecuado método de calibración y validación del modelo, para lograr acercarse lo máximo posible a los datos recogidos y vistos en campo.

En algunos casos, no es posible simular una red completa de alguna área en específico, debido a que algunas versiones o licencias de los paquetes computacionales, tienen un número limitado de creación de nodos y carreteras (links), o se requiere de una gran capacidad de funcionamiento del computador utilizado.

De modo similar, en determinadas ocasiones existen limitaciones para conseguir o medir todos los datos necesarios en la red que se quiere analizar, ya sea por costos altos o falta de instrumentos; por lo que es posible que no se pueda calibrar y validar de la mejor forma el modelo.

2.5 Paquetes de software de micro simulación existentes en el mercado

Actualmente existen numerosos paquetes de software que están disponibles para llevar a cabo estudios relacionados a la simulación de tráfico, para realizar planeaciones de tránsito en las ciudades, identificar problemas en la red vial y encontrar soluciones a los mismos.

En (Algers, et al., 1998) se realizó una lista de los principales software en ese tiempo, manteniéndose hasta ahora como los más principales en cada país y continente. El estudio se realizó mediante un cuestionario enviado a los diseñadores de modelos identificados, obteniéndose un número total de 58 paquetes computacionales, de los cuales, fueron analizados y listados 32.

Tabla 1 – Lista de los modelos de micro simulación

Model	Organisation	Country
AIMSUN 2	Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona	Spain
ANATOLL	ISIS and Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement	France
AUTOBAHN	Benz Consult - GmbH	Germany
CASIMIR ⁴	Institut National de Recherche sur les Transports et la Sécurité	France
CORSIM ⁵	Federal Highway Administration	USA
DRACULA	Institute for Transport Studies, University of Leeds	UK
FLEXSYT II	Ministry of Transport	Netherlands
FREEVU	University of Waterloo, Department of Civil Engineering	Canada
FRESIM	Federal Highway Administration	USA
HUTSIM	Helsinki University of Technology	Finland
INTEGRATION	Queen's University, Transportation Research Group	Canada
MELROSE	Mitsubishi Electric Corporation	Japan
MICROSIM	Centre of parallel computing (ZPR), University of Cologne	Germany
MICSTRAN	National Research Institute of Police Science	Japan
MITSIM	Massachusetts Institute of Technology	USA
MIXIC	Netherlands Organisation for Applied Scientific Research - TNO	Netherlands
NEMIS	Mizar Automazione, Turin	Italy
PADSIM	Nottingham Trent University - NTU	UK
PARAMICS	The Edinburgh Parallel Computing Centre and Quadstone Ltd	UK
PHAROS	Institute for simulation and training	USA
PLANSIM-T	Centre of parallel computing (ZPR), University of Cologne	Germany
SHIVA	Robotics Institute - CMU	USA
SIGSIM	University of Newcastle	UK
SIMDAC	ONERA - Centre d'Etudes et de Recherche de Toulouse	France
SIMNET	Technical University Berlin	Germany
SISTM	Transport Research Laboratory, Crowthorne	UK
SITRA-B+	ONERA - Centre d'Etudes et de Recherche de Toulouse	France
SITRAS	University of New South Wales, School of Civil Engineering	Australia
TRANSIMS	Los Alamos National Laboratory	USA
THOREAU	The MITRE Corporation	USA
TRAF-NETSIM	Federal Highway Administration	USA
VISSIM	PTV System Software and Consulting GMBH	Germany

En la misma investigación (Algers, et al., 1998), se clasificaron los modelos dependiendo de los objetivos de la simulación de la siguiente manera:

Tabla 2 – Clasificación de acuerdo a los objetivos de simulación (Algers, et al., 1998)

Urban	Motorway	Combined	Other
CASIMIR	AUTOBAHN	AIMSUN2	ANATOLL
DRACULA	FREEVU	CORSIM	PHAROS
HUTSIM	FRESIM	FLEXSYT II	SHIVA
MICSTRAN	MIXIC	INTEGRATION	SIMDAC
NEMIS	SISTM	MELROSE	
NETSIM		MICROSIM	
PADSIM		MITSIM	
SIGSIM		PARAMICS	
SIMNET		PLANSIM-T	
SITRA-B+		TRANSIMS	
SITRAS		VISSIM	
THOREAU			

Los modelos urbanos, de autopista y combinados abordan, desde el punto de vista de los diseñadores de modelos, la cuantificación de los beneficios de los sistemas inteligentes de transporte – ITS “Intelligent Transportation Systems”, principalmente de los sistemas avanzados de información para el viajero y los sistemas avanzados de gestión del tráfico. También abarcan estudios de control de tráfico dinámico, esquemas de gestión de incidentes, estrategias de orientación en ruta en tiempo real, controles adaptativos de señales de intersección y sistemas de control de carriles. Además, algunos modelos evalúan el impacto y la sensibilidad de los parámetros de diseño alternativos (número de carriles, longitud de las intersecciones convergentes, curvaturas del camino y regulaciones de cambio de carril).

La principal diferencia entre estos modelos es que algunos se encuentran creados para analizar de una mejor forma el ámbito urbano (dentro de las ciudades), las situaciones que ocurren en las autopistas, y el análisis combinado de los dos aspectos. En cuanto a los modelos clasificados como: otros, fueron diseñados para cumplir objetivos muy específicos, tales como el modelado al nivel táctico de conducción y el análisis de algoritmos de vehículos inteligentes (con el fin de ayudar a escribir programas de inteligencia artificial en la conducción de vehículos en el tráfico), para evaluar las condiciones de seguridad y confort de una línea de automóviles en un único carril, simular estrategias y predecir las filas de espera en las cabinas de los peajes (Algers, et al., 1998).

En un informe de investigación de AUSTROADS (máxima organización de las agencias australianas de transporte) realizada por (Luk & Tay, 2006), se llegó a la conclusión de que los dos software para micro simulación de tráfico líderes en el mercado son AIMSUN y VISSIM. De acuerdo con otras tesis de grado de maestría en ingeniería civil (Suarez, 2007) y (Melo, et al., 2005), los dos programas de micro simulación que generan mayor confianza en cuanto a los resultados reportados por la evaluación técnica son los modelos VISSIM con el 90% de cumplimiento con respecto a las características evaluadas (características de los conductores, generalidades de simulación, calibración y parámetros, y extracción de datos) y AIMSUN con el 81 %.

Por tanto, con el fin de elegir el software que más beneficios genere al representar el comportamiento real del conductor, de los vehículos y del funcionamiento de la red vial, se realizará una comparación entre AIMSUN y VISSIM, bajo ciertos parámetros que serán

detallados a continuación, mostrando con mejor detalle los porcentajes de cumplimiento referidos en el párrafo anterior.

2.5.1 Comparación entre los software de micro simulación de tráfico (PTV Vissim y Aimsun)

La metodología utilizada para la elección del modelo, con base en (Suarez, 2007), se basó en la comparación en paralelo de 42 características que originaron los siguientes grupos: características generales de la simulación, características de los conductores, extracción de datos, calibración y parámetros.

2.5.1.1 Características generales de la simulación

Dentro de estos parámetros, se encuentran los siguientes:

- Disponibilidad del código fuente: Facilita la forma de entender el modelo y su modificación.
- Interacción con otros modelos: Permite realizar enlaces con módulos de otro software para complementar los análisis, herramientas y procesamiento de los datos.
- Editores gráficos de la red: Facilita el uso del modelo (construcción, manejo y visualización).
- Editor gráfico de red extensible: Permite la configuración de códigos externos, parámetros en conjunto con la creación y configuración de la red.
- Ejecución en computador personal.
- Estructura orientada a objetos: Representan simulaciones más fáciles de modificar y mejorar.
- Modelación de semáforos controlados: Evalúan diferentes fases semafóricas dependiendo de los controladores.

En la Tabla 3, se puede observar la comparación de las características nombradas anteriormente.

Tabla 3 - Características generales de la simulación. Adaptado de (Melo, et al., 2005)

Característica	Aimsun	Vissim
Disponibilidad del código fuente		
Interacción con otros modelos	EMME/2 SCATS, TRANSYT 7F	CID, VNP, VISUM, VISTRO
Herramientas para el procesamiento posterior	✓	
Editores gráficos de la red	✓	✓
Editor gráfico de la red (extensible)	✓	
Se ejecuta en PC personal	Servidor	✓
Estructura orientada a objetos	✓	✓
Modelación de semáforos controlados	✓	✓

2.5.1.2 Características de los conductores

Para la modelación del comportamiento de los conductores, se deben tener en cuenta las siguientes características de los modelos:

- Medición de brechas aceptadas, cambios de carril, modelo del seguimiento de vehículos y velocidades de giro.
- Reacción al tiempo de amarillo en los semáforos: Este parámetro depende del tipo de conductor (edad, sexo) y tipo de vehículo (ligero, pesado, motocicleta).
- Tiempo de reacción del conductor: Este parámetro refleja las habilidades del modelo para representar la demora entre la identificación de una colisión y la aplicación de medidas para evadirla como frenado, aceleración o cambio de carril. La reacción de los conductores depende de diversos factores (experiencia, edad, entre otros).
- Movimiento en las intersecciones: Para la evaluación de medidas de seguridad es importante que la simulación de los movimientos de los vehículos en las intersecciones sea con la mayor veracidad posible.
- Porcentaje de variación de la aceleración o deceleración: Permite configurar diversas características de los diferentes tipos de vehículos en la red de transporte.
- Límites en la distancia de visibilidad: Permiten modelar obstrucciones en las vías, como curvas, árboles, edificaciones, entre otros.
- Condición de ceda el paso circulando: Permite utilizar operaciones de ceder el paso sin que los vehículos paren por completo antes de reincorporarse el flujo.

- Interacción de vehículos y peatones: Permite realizar configuraciones en los parámetros para evaluar efectos en la seguridad de los peatones en varias alternativas.
- Mezclamiento “amigable”: Está relacionado con el fenómeno en el que algunos conductores reducen la velocidad para dejar que otros vehículos se incorporen al tránsito de una manera más segura, como ocurre en la realidad.
- Modelación del comportamiento para el mezclamiento en vías multicarriles: Es típico para los vehículos que se incorporan al flujo del carril principal para cruzarse en la trayectoria de un vehículo cercano que viaja en la misma dirección que la del vehículo que entra y comienza a acelerar en el carril adyacente. De esta manera, el vehículo próximo puede continuar a su velocidad actual sin tener que frenar por el vehículo que se incorpora.
- Modelación del derecho de vía en intersecciones: Permite modelar eventos conflictivos, en donde algunos comportamientos en los giros generan eventos que frenan el flujo que tiene el derecho de vía.
- Modelación y registro de maniobras erradas: Permite contabilizar el número de rechazos o faltas del proceso de aceptación de brechas.
- Maniobras de estacionamiento: Los estacionamientos generan situaciones de conflicto e impacto en la seguridad de las vías.
- Modelación de las señales de giro: Permite utilizar señalización vertical en las calles, para generar mayor seguridad y fluidez en la circulación de los automóviles.
- Giros en U: Permite este tipo de giros, que generalmente generan situaciones de conflicto y afectan la seguridad de la red de transporte.
- Orígenes y destinos en intersecciones: Algunos vehículos generan situaciones de conflicto al no girar en las intersecciones porque su origen o destino se ubica en las esquinas de dichas intersecciones (tiendas, supermercados, gasolineras), generalmente se prefieren los modelos que pueden simular estas situaciones a los que no lo pueden hacer.

La comparación de las características puede verse en la Tabla 4.

Tabla 4 - Características de los conductores. Adaptado de (Melo, et al., 2005)

Característica	Aimsun	Vissim
Medidas de las brechas	✓	✓
Medidas de los cambios de carril	✓	✓
Medidas del modelo de seguimiento de vehículos	✓	✓
Medidas de la velocidad de giro		✓
Reacción al amarillo	✓	✓
Tiempo de reacción del conductor	✓	✓
Movimientos en las intersecciones	✓	✓
Porcentaje de variación de la aceleración y deceleración	✓	✓
Límites en la distancia de visibilidad	✓	✓
Ceda el paso en movimiento	✓	✓
Interacción de vehículos y peatones	✓	✓
Mezclamiento amigable	✓	✓
Mezclamiento multicarriles		✓
Derecho de vía en intersecciones	✓	✓
Registro de maniobras erradas	✓	✓
Maniobras de estacionamiento		✓
Señales de giro		
Giros en U	✓	✓
Orígenes y destinos en intersecciones		✓

2.5.1.3 Extracción de datos

Para comparar la extracción de datos, fue necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Estado de los vehículos y exportación a archivos: Indica que el simulador puede exportar las variables relacionadas con el estado de los vehículos (velocidad, ubicación en la red vial, aceleración, tiempo de viaje) a un archivo que pueda ser procesado externamente.
- Formato del archivo de animación público.
- API – por sus siglas en inglés (Application Programming Interface): Habilidad para extraer datos detallados de la simulación.
- Archivos de salida configurables: Permite esconder o mostrar algunas estadísticas de los archivos de salida.
- Exportación de eventos de aceptación de brechas.
- Exportación de eventos de rechazo de brechas.

- Exportación de eventos de cambio de carril.
- Las variables del estado de los vehículos incluyen ubicación en el plano.

En la Tabla 5, se puede observar la comparación de las características.

Tabla 5 – Extracción de datos. Adaptado de (Melo, et al., 2005)

Característica	Aimsun	Vissim
Estado de los vehículos exportable a archivos	✓	✓
Formato de archivo de animación público		✓
API Disponible	✓	✓
Archivos de salida configurables	✓	✓
Exportación de eventos de aceptación de brechas	✓	✓
Exportación de eventos de rechazo de brechas	✓	✓
Exportación de eventos de cambios de carril	✓	✓
Ubicación de los vehículos en el plano	✓	✓
Incluye estadísticas de conflictos		✓

2.5.1.4 Calibración y parámetros

Las siguientes características están relacionadas a los parámetros de la simulación microscópica que el usuario puede seleccionar.

- Tiempos de ciclo de variables: Las simulaciones que permiten el ajuste del tiempo para cada paso, permiten evaluaciones de sensibilidad a las medidas sobre el tiempo de paso.
- Tiempos de paso menores a 1 segundo: Representa el ajuste del tiempo para cada paso de la simulación.
- El criterio de aceptación de brecha cambia con las demoras: Muchos conductores cambian su comportamiento dependiendo del tiempo que llevan esperando para incorporarse en alguna vía.
- Longitud de los vehículos: Este parámetro afecta la seguridad en las maniobras.
- Avances variables: Los diferentes tipos de conductores avanzan de diferente manera con respecto al vehículo que van siguiendo.
- Progreso variable en la descarga de las filas de espera.

La comparación de las características se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6 – Calibración y parámetros. Adaptado de (Melo, et al., 2005)

Característica	Aimsun	Vissim
Tiempos de paso variables	✓	✓
Tiempos de paso < 1.0 s	✓	✓
Criterio de aceptación de brechas variable con las demoras	✓	✓
Longitud del vehículo	✓	✓
Avances variables	✓	✓
Progreso variable en la descarga de las colas	✓	✓

2.5.1.5 Evaluación final de los software PTV Vissim y Aimsun

Como conclusión de la comparación entre los dos paquetes computacionales, se elaboró una tabla con los resultados finales, realizando un total de parámetros evaluados afirmativamente en cada clasificación y calculando el porcentaje de la suma de las características positivas de cada uno de ellos bajo el total de las características evaluadas.

Tabla 7 – Evaluación final de los software

CARACTERÍSTICAS	CUMPLIMIENTO DE CARACTERÍSTICAS	
	Aimsun	Vissim
Características generales de simulación	7	5
Características de los conductores	14	18
Extracción de datos	7	9
Calibración y parámetros	6	6
Total de características cumplidas	34	38
Porcentaje	81%	90%

Según los resultados obtenidos de la comparación, se decidió por escoger el software VISSIM para la realización del caso de estudio. El programa informático cuenta con una licencia gratuita en su versión de estudiante, pero para este trabajo de grado, fue suministrada una licencia completa por la empresa creadora del software PTV VISSIM.

2.6 Software de micro simulación PTV Vissim

PTV Vissim es una herramienta informática para la simulación microscópica y multimodal del tráfico, desarrollada por la empresa alemana PTV – Planung Transport Verkehr AG. El modelo se desarrolló en los inicios de los años 70 en la Universidad de Karlsruhe en Alemania; para 1973 se inicia la comercialización y distribución por parte de PTV América. En 1995 se aplica

en Norte América por primera vez en la ciudad de Eugene en Estados Unidos, en 1999 se realizó la actualización con el modelo de seguimiento de vehículos en autopista, en el 2001 se integró con la plataforma VISUM (modelador de planificación de transporte y sistema de información geográfica) y por último en 2004 se creó una nueva interface gráfica de usuario (Suarez, 2007).

Está desarrollado en código C++, y específicamente hecho para hacer simulaciones de modelos microscópicos de tránsito, incluyendo transportes públicos y movilidad peatonal, simulando así el flujo de transito multimodal, de carros, vehículos de mercancías, buses, trenes, tranvías, metros, motocicletas, bicicletas y personas (Duarte, 2013).

VISSIM hace parte de una serie de programas informáticos, que están relacionados entre sí en el mundo de la simulación y el transporte. En la Figura 3, se puede observar la relación y principal función de los principales software: PTV Visum, PTV Vistro y PTV Vissim.

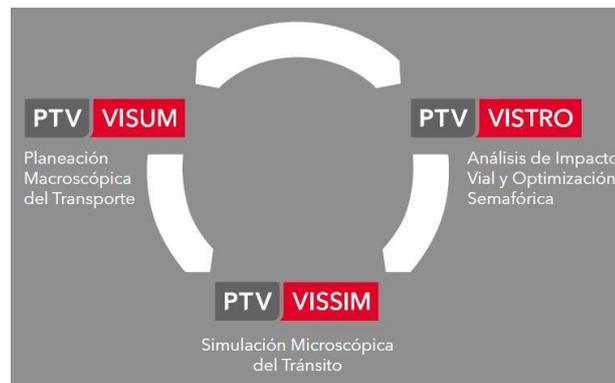


Figura 3 - Relación y función de los principales software PTV (PTV Group, 2017)

Todos los simuladores de tráfico necesitan de un modelo matemático para representar el sistema de movimiento, para simular los aspectos técnicos y organizacionales del movimiento (1). Es también necesario un módulo para generar los vehículos y personas en la simulación (2), y al ser éste un simulador con modelos microscópicos existe también un módulo para hacer el control de tránsito (3). Estos tres módulos son dependientes unos de otros, tal como se muestra en la Figura 4, siendo que, durante la simulación, los tres módulos se encuentran activos y con constantes dependencias activas de los otros módulos. Además de los tres módulos, existe otro (4) que es responsable de la salida de resultados de las simulaciones (Duarte, 2013).



Figura 4 - Representación esquemática de los módulos de PTV VISSIM (Barceló, 2010)

2.6.1 Bases del modelo de simulación de tráfico

El comportamiento de conducción es un parámetro muy importante, debido a que los conductores no tienen la misma forma de conducir en todos los países del mundo, es decir, hay que tener en cuenta factores que determinan el factor de agresividad a la hora de conducir.

El comportamiento de los conductores se refleja en diferentes variables, las cuales pueden ser: velocidades, distancias de seguridad en detención y en marcha, brechas, tiempos de reacción e inclusive dependen de las características físicas de los vehículos y del tipo de conductor (Suarez, 2007).

Según el manual de usuario de PTV Vissim en su versión 9.0 (Vissim, 2016), el modelo de simulación de tráfico está basado en la **teoría del seguimiento de vehículo**, en los **modelos de movimiento lateral** (selección/cambio de carril y comportamiento lateral), y el **control por señales semafóricas**.

En cada uno de los modelos nombrados, existen parámetros claves, que intervienen en el cálculo de las variables, y, por lo tanto, afectan directamente en los resultados finales de la simulación. A continuación, se muestra una descripción teórica de los principales parámetros obtenidos en el manual de usuario del software (Vissim, 2016).

2.6.1.1 Seguimiento de vehículo

La teoría del seguimiento vehicular es la base de todos los micro simuladores de tráfico. Consiste en una descripción de cómo se comporta un vehículo al ir detrás de otro (Fernández, et al., 2013).

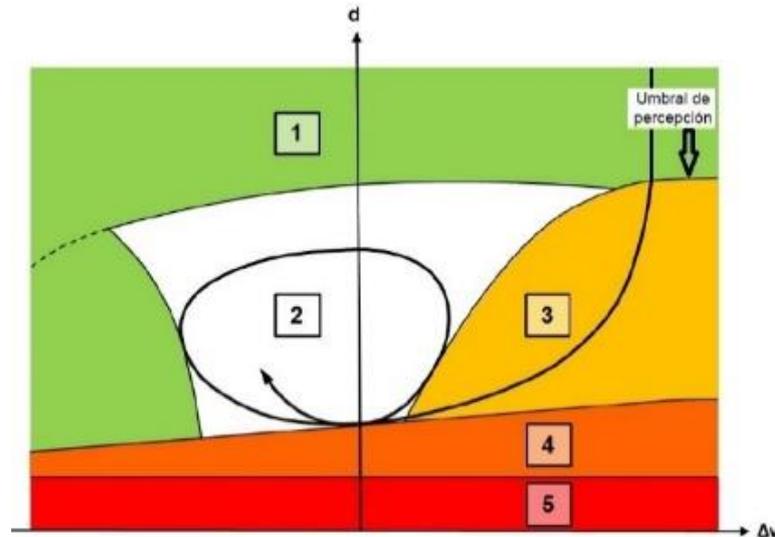
En contraste con modelos menos complejos que usan velocidad constante y lógica determinística de seguimiento de vehículo, Vissim utiliza el modelo psico-físico de comportamiento de conductor desarrollado por Wiedemann en 1974. El concepto básico de este modelo es que el conductor de un vehículo en movimiento más veloz empieza a desacelerar cuando alcanza su umbral de percepción individual hacia un vehículo en movimiento más lento. Dado que el conductor que se desplaza a mayor velocidad no puede determinar exactamente la velocidad del otro carro más lento, por lo tanto, su velocidad descenderá por debajo de dicho vehículo hasta que él nuevamente inicia a acelerar ligeramente luego de alcanzar otro umbral de percepción. Esto resulta en un proceso iterativo de aceleración y desaceleración (Vissim, 2016).

El modelo del software ha sido calibrado a través de múltiples mediciones de campo en el instituto de estudios de transporte del instituto de tecnología de Karlsruhe (KIT - Karlsruhe Instituto de Tecnología), Alemania. Las mediciones recientes garantizan que los cambios en el comportamiento de conducción y las capacidades técnicas de los vehículos sean tenidas en cuenta.

La percepción y reacción del conductor están representadas por un conjunto de umbrales y distancias deseadas. Estos umbrales representan diferentes áreas que están asociadas a diversas situaciones de la interacción entre un vehículo y el vehículo que está frente a él. Estas áreas se presentan cuando (Suarez, 2007):

- El vehículo no está influenciado por un vehículo que viaje al frente.
- El vehículo está influenciado porque el conductor percibe un vehículo al frente con una velocidad más baja que la de él.
- El vehículo empieza un proceso de seguimiento.
- El vehículo se encuentra en una situación de emergencia.

Por lo tanto, el proceso de conducción de acuerdo a las condiciones dadas se asocia a las diferentes áreas, las cuales son representadas gráficamente mediante el modelo de Wiedemann en la Figura 5.



Leyendas

Ejes: d : Distancia, Δv : Diferencia de velocidad	3 : Estado de aproximación (Reacción)
1 : Estado de flujo libre (Sin reacción)	4 : Estado de frenado (Desaceleración)
2 : Estado de seguimiento (Reacción inconsciente)	5 : Estado de colisión

Figura 5 - Lógica de seguimiento de vehículo de Wiedemann (Vissim, 2016)

El software posee dos tipos de modelos denominados Wiedemann 74, diseñado para modelación idónea del tráfico urbano (zonas de entrecruzamiento), y Wiedemann 99, realizado para el comportamiento de conducción en autopistas. Para este trabajo, fue escogido el modelo de Wiedemann 74, ya que la intersección vial pertenece a una zona netamente urbana.

A continuación, se presentan los parámetros más importantes en el modelo escogido y que afectan en una mayor proporción los resultados obtenidos en la simulación. Las características de cada parámetro se encuentran definidos en el manual de usuario del software (Vissim, 2016). Estos parámetros serán tenidos en cuenta para la realización de la calibración en la sección 4.3.

- Distancia promedio en detención (ax): Este parámetro define la distancia deseada promedio entre vehículos detenidos. El valor por defecto es de 2 metros, con una desviación estándar de 0,3 metros.

- Parte aditiva de la distancia de seguridad (bx_{add}) y parte multiplicativa (bx_{mult}): Estos dos factores son usados para calcular la distancia de seguridad “d” entre dos vehículos. Los valores por defecto son de 2 y 3 respectivamente.

La distancia “d” es calculada de la siguiente manera:

$$d = ax + bx \quad (1)$$

Donde ax es la distancia promedio en detención, y bx es:

$$bx = (bx_{add} + bx_{mult} * z) * \sqrt{v} \quad (2)$$

Donde v es la velocidad de del vehículo en km/h y z es un valor de una distribución normal con un rango de 0 a 1 alrededor de 0,5; con una desviación estándar de 0,15.

- Distancia en detención para obstáculos estáticos: Si esta opción está activada en el software, los vehículos utilizarán el valor ingresado por el usuario (0,5 metros por defecto) como distancia de parada entre todos los obstáculos estáticos existentes (semáforos, áreas de conflicto, señales de pare). Si esta opción no está activada, los vehículos usarán un valor normalmente distribuido en un rango entre 0,15 y 0,5 metros.
- Comportamiento de acercamiento suave: Si esta opción está activada, los vehículos reducen la velocidad cuando se aproximan a obstáculos en reposo.
- Distancia de visión frontal: Este parámetro está relacionado con la distancia que un vehículo puede observar hacia adelante con el fin de reaccionar a otros vehículos en frente o al lado de éste (dentro del mismo tramo de carretera). Este parámetro permite ingresar dos valores, la distancia mínima y máxima. Para áreas urbanas la distancia mínima tiene gran importancia, debido a que los carros están más juntos unos de otros y necesitan mayor atención para desplazarse. El valor depende de la velocidad de aproximación. El manual de usuario recomienda usar una distancia de 20 metros. La distancia máxima hace referencia a aquellos casos donde deben ser reconocidas señales o semáforos con mucho tiempo de anticipación.
- Distancia de visión trasera: Este parámetro tiene el mismo concepto del parámetro anterior. Es la distancia que un vehículo puede observar hacia atrás con el fin de reaccionar a otros vehículos detrás de él. Es recomendado que para zonas urbanas la distancia mínima sea de 20 metros.

- Número de vehículos observados: Este parámetro afecta en que los vehículos puedan predecir otros movimientos de vehículos acordemente. Para comportamientos urbanos, es recomendable usar un valor de 4 vehículos.

2.6.1.2 Modelos de movimiento lateral

Los movimientos laterales de los vehículos en el software están estructurados en la selección de vía y decisión de cambiar de carril; y en el comportamiento lateral vehicular.

- Selección y cambio de carril

El conductor del vehículo se enfrenta a la decisión de seleccionar un carril por el cual transitar con una mejor interacción, para esto, se realizan generalmente tres pruebas (Fellendorf & Vortisch, 2010). En primer lugar, el conductor decide si quiere salir del carril actual (en el caso que esté interactuando con otros vehículos). En seguida, se comprueba si en los carriles vecinos hay una mejor situación de interacción vehicular, es decir, si permite una mejor fluidez vehicular o permite alcanzar la velocidad deseada más adelante. Si uno de los carriles vecinos proporciona una mejor interacción, la última comprobación es si es posible realizar el cambio de carril considerando los vehículos que se aproximan.

Sin embargo, la selección del carril se rige a menudo por cambios de carril obligatorios para giros deseados en las intersecciones viales. En la codificación de red de Vissim, cada conector de tramo de vía tiene dos distancias: la distancia de cambio de carril y la distancia de parada de emergencia. La distancia de cambio de carril se evidencia cuando un conductor se da cuenta de del cambio de dirección que tiene que realizar para dirigirse a la otra vía; los valores típicos oscilan entre 100 y 500 metros. La distancia de emergencia es la distancia a la que el conductor se tiene que detener al darse cuenta de que no ha podido moverse los carriles necesarios para cambiar de dirección (Fellendorf & Vortisch, 2010).

La lógica actual de cambio de carril en el software se usa para decidir la posibilidad de cambiar al carril vecino. Esto se da gracias a la selección de la vía para los cambios de carril libres u obligatorios basados en la aceptación de la brecha, lo que se define como la disposición que tiene un conductor para desacelerar y dejar que el conductor pueda ingresar de manera segura a la vía concurrida. El valor de esta desaceleración para los cambios de carril obligatorios depende directamente de la distancia a la posición de parada de emergencia de la vía donde

tiene que ser completado el cambio de carril, es decir, en donde el conductor se vuelve más agresivo debido a que está más cerca del punto de una parada de emergencia (Fellendorf & Vortisch, 2010).

Parámetros que se pueden modificar en el cambio de carril:

- Desaceleración de los vehículos que transitan por el carril deseado y de los vehículos que quieren cambiar de carril: Son parámetros que definen la agresividad de los conductores al tratar de cambiar de carril.
- Tiempo de espera antes de la eliminación: Este valor está relacionado con el tiempo máximo que un vehículo puede esperar por una brecha en la posición de parada de emergencia del conector para cambiar de carril, con el fin de continuar con su ruta (cambio obligatorio de carril). Cuando se alcanza este tiempo, el vehículo es retirado de la red y se generará un mensaje de advertencia al final de la simulación.
- Separación mínima (frontal o trasera): Este parámetro define la distancia mínima al vehículo de adelante que debe estar disponible para un cambio de carril en una condición de detención.
- Factor de reducción de la distancia de seguridad: Este parámetro representa un valor que disminuye la distancia que hay entre dos vehículos para efectuar el cambio de carril, dando más seguridad a la maniobra.
- Desaceleración máxima para frenado por cooperación: Corresponde a el valor de desaceleración máximo permitido que un vehículo puede aplicar para dejar entrar a otro vehículo en su propio carril. El valor por defecto es de -3 m/s^2 , y no será tenido en cuenta para la calibración del modelo, debido a que es un factor a tener en cuenta principalmente en la simulación de autopistas.

- Comportamiento lateral de los vehículos

Los siguientes parámetros son los más importantes para describir el comportamiento lateral de los vehículos al transitar por la red vial.

- Posición de los vehículos en el carril: Se puede seleccionar la posición en la que se desplazan los vehículos en el carril a flujo libre (centro, derecha, o izquierda).

- Distancia lateral con vehículos del siguiente carril: Si esta opción está activada, los vehículos consideran la posición lateral de los automotores que se desplazan en los carriles adyacentes y mantienen la distancia lateral mínima. Para este propósito, los vehículos pueden incluso ajustar su posición lateral en su propio carril.
- Fila de espera en forma de diamante: Esta opción permite que las filas de espera se modelen de una forma más realista, como por ejemplo en el caso de las motos, donde no se ubican unas atrás de otras, sino que pueden estar al lado.
- Velocidad longitudinal mínima que permite movimientos laterales: Este valor debe asegurar que los vehículos puedan moverse lateralmente si están prontos a detenerse.
- Distancia mínima lateral: Las distancias mínimas para el sobrepaso de vehículos entre sí dentro del mismo carril y la distancia lateral con vehículos en los carriles adyacentes está definida para detención (0 km/h) así como para 50 km/h. Para otros valores de velocidad, el valor de distancia mínima apropiada es obtenida por interpolación lineal. Los valores por defecto son 0,2 metros para una velocidad de 0 km/h y de 1 metro para 50 km/h. Es decir, la distancia mínima que debe existir para que un carro sobrepase a un bus que se detuvo en frente de él, corresponde a 0,2 metros.

De igual manera, el software permite definir parámetros para que un vehículo pueda adelantar una moto en el mismo carril. En el modelo no fue tomado en cuenta esta opción, debido a que la cantidad de motos representa únicamente el 1% del total de vehículos.

2.6.1.3 Control por señales semafóricas

PTV Vissim tiene una serie de opciones y parámetros importantes que definen el comportamiento de los conductores en frente de un control semafórico cuando se encuentra en amarillo. Existen dos modelos de decisión:

- Verificación continua: los vehículos asumen que la luz amarilla dura 2 segundos y continuamente deciden en cada paso de tiempo si proceden a atravesar hasta haber pasado el semáforo. El vehículo no frenará, si su desaceleración máxima no le permite detenerse en la línea de pare o si se requiere un valor mayor a $4,6 \text{ m/s}^2$ para detenerse.

El vehículo frena si éste no puede pasar el semáforo dentro de los 2 segundos al continuar con su velocidad actual.

- Una decisión: En esta opción los conductores deciden una sola vez, teniendo en cuenta que la probabilidad de que el conductor se detenga cuando el semáforo está en amarillo, es calculada de la siguiente manera:

$$p = \frac{1}{1 + e^{-\alpha - \beta_1 v - \beta_2 dx}} \quad (3)$$

Donde la velocidad actual v y la distancia desde el frente del vehículo a la línea de pare dx son variables independientes y α , β_1 , β_2 corresponden a tres parámetros de ajuste. Los valores de parámetros estándar suministrados han sido obtenidos a partir de datos empíricos, lo cual implica que deben ingresarse los factores de probabilidad apropiados.

Para el modelo fue escogido el método de verificación continua, el cual, simula de una manera más realista lo que sucede en la realidad.

También existe otro parámetro que condiciona el comportamiento de los conductores frente a un semáforo, y está relacionado a la reacción cuando el semáforo está en el preciso momento de cambio de rojo a amarillo. Se puede seleccionar la opción “Seguir” (igual que en fase de verde) o “Parar” (igual que en fase de rojo).

2.6.2 Casos de aplicación

PTV Vissim ofrece una serie de aplicaciones dependiendo del tipo de modelo que se quiera realizar. Las principales aplicaciones se muestran a seguir (PTV, 2017): Intersecciones y semaforización, sistemas multimodales, peatones y transporte público.

- Intersecciones y semaforización

Es posible modelar desde las intersecciones más sencillas, pasando por las típicas intersecciones semaforizadas, hasta los esquemas operativos más específicos posibles. Es posible representar y analizar cualquier geometría de intersección, y cualquier esquema de prioridad y semaforización.

Se puede leer o introducir, y posteriormente optimizar, matrices de tiempos de interface y programas semaforicos creados externamente. Así, es posible proporcionar controles de tiempo

fijo basados en grupos de señales gracias a la representación clara de diagramas de tiempos en un editor gráfico, donde se pueden reconocer rápidamente los posibles problemas de tiempos de seguridad y corregirlos.

De igual manera, es posible configurar modelos vehiculares de forma realista, incluyendo elementos de control específicos por carril y tipo de vehículo, por ejemplo, puede controlarse por distintas señales semafóricas una bicicleta y un auto que se encuentren en el mismo carril.

Es importante resaltar que también es posible determinar el grado de obediencia a la señal de alto para distintos tipos de vehículos, de esta manera, se puede analizar la afectación en la operación de una intersección al existir vehículos o peatones que pasen el semáforo en rojo, y si esa situación incrementa o reduce la capacidad y demoras promedio en la intersección.

- Sistemas multimodales

El software PTV Vissim permite proyectar todos los tipos de medios de transporte y simular su interacción. Para poder representar con exactitud la selección de ruta, un cambio de carril o el comportamiento de seguimiento. En PTV Vissim, hay varios modelos implementados que el usuario puede adaptar a las circunstancias locales mediante parámetros. Entre ellos hay el modelo de seguimiento de “Wiedemann”, un modelo de cambio de carriles basado en reglas y el modelo Social “Force” para la dinámica de peatones.

También es posible simular y planificar de forma integral, es decir, contemplar el tráfico mixto cuando, por ejemplo, los autos y las bicicletas comparten una vía, circulan sobre carriles segregados o incluso adelantamientos en un mismo carril.

- Peatones

En las ciudades, los peatones, los ciclistas y el tráfico motorizado se encuentran interactuando en un espacio reducido. Por ello, la contemplación de los flujos de personas y su interacción con los acontecimientos del tráfico circundantes son una parte importante de la planificación urbanística y vial. Así, en PTV Vissim, se pueden desarrollar relaciones de trasbordo intermodales, interacciones vehículo-peatón complejas y escenarios de evacuación que ayudan a los planificadores y los responsables de la toma de decisiones a seleccionar la estrategia de desalojo adecuada para edificios, túneles o estadios.

En Vissim, el movimiento de peatones está basado en el modelo de fuerza social (Helbing & Molnár, 1995). La idea básica consiste en modelar el impulso elemental para el movimiento con fuerzas análogas a la mecánica Newtoniana. Desde las fuerzas sociales, psicológicas y físicas, resulta una fuerza total, que entonces resume el parámetro físico de la aceleración. Las fuerzas que influyen un movimiento de peatones son causadas por la intención de alcanzar su destino, así como por otros peatones y obstáculos. El software presenta una serie de parámetros que modifican el movimiento y comportamiento de los peatones, entre ellos se encuentran valores que están relacionados con el tiempo de relajación o reacción, la fuerza social entre peatones y la velocidad con la que circulan.

Este modelo de simulación fue validado de tres maneras: en primer lugar, los parámetros macroscópicos fueron calculados y comparados con datos empíricos, en segundo lugar, se aseguró que los efectos microscópicos como situaciones de formación de línea de contraflujo y formación de bandas en situaciones de cruces de flujos fueran reproducidas, y, en tercer lugar, se buscó una impresión realista de las animaciones resultantes.

- Transporte público

Como base para la simulación del servicio de transporte público (TP), se pueden construir de forma flexible de líneas de TP, tanto ferroviarias como rodadas, con varios tipos de vehículo y se les asignan los horarios correspondientes de las rutas de línea.

Además, se pueden especificar en las líneas de TP, varios tipos de vehículo, horarios, paradas, tipos de parada y tiempos de detención, así como modelar las prioridades existentes.

Para determinar el tiempo de estancia de los vehículos en las paradas, el software distingue entre tres tipos de modelados variables: tiempo de estancia según una distribución de tiempo, tiempo de estancia calculado y tiempo de estancia simulado.

- Tiempo de estancia según una distribución de tiempo: Con este procedimiento, el tiempo de estancia correspondiente se toma de una distribución del tiempo de espera. En él, el usuario puede definir la distribución del tiempo de espera, por ejemplo, según datos recogidos en campo.
- Tiempo de estancia calculado: Aquí, el tiempo de estancia se calcula según un tiempo de subida y bajada medio por pasajero, definible por el usuario, y la

cantidad de pasajeros que suben y bajan. Además, se puede especificar el proceso de subida y bajada mediante ajustes específicos en el uso de las puertas (subida y bajada, o solo subida, o solo bajada). También se pueden proyectar la distribución porcentual de pasajeros que suben y bajan en cada vehículo y parada, los intervalos de tiempo según la demanda del uso de las líneas de TP y la asignación de destinos de los pasajeros, incluida su distribución en varias líneas de TP.

- Tiempo de estancia simulado: El módulo de peatones PTV Viswalk permite un análisis y observación más detallado del comportamiento de las personas (micro simulación de peatones). Con él, se pueden valorar la eficacia y la influencia de la geometría de las formas de parada en el comportamiento de trasbordo de los pasajeros, así como el desarrollo del tráfico en su conjunto, tanto en el transporte individual como en el transporte público de pasajeros. La representación visual de peatones en interacción con las líneas de TP dentro de la geometría de las paradas permite identificar rápidamente posibles puntos débiles en los procesos de subida y bajada y crear así mejoras del plan.

3. METODOLOGÍA PARA LA CREACIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MODELO DE MICRO SIMULACIÓN EN PTV VISSIM

Este trabajo está basado en la **atribución de tránsito a la red o afectación del tráfico**, que corresponde a la última fase del modelo de los cuatro pasos, ya que, se aplicarán en la intersección vial la cantidad de viajes que pasan por cada una de las calles en diferentes modos de transporte.

En este capítulo se presentará una breve descripción de los pasos que serán necesarios realizar para crear, calibrar y validar el modelo de micro simulación de una intersección vial en el software PTV Vissim. Como resumen, se muestra en la siguiente Figura el proceso realizado para la metodología.

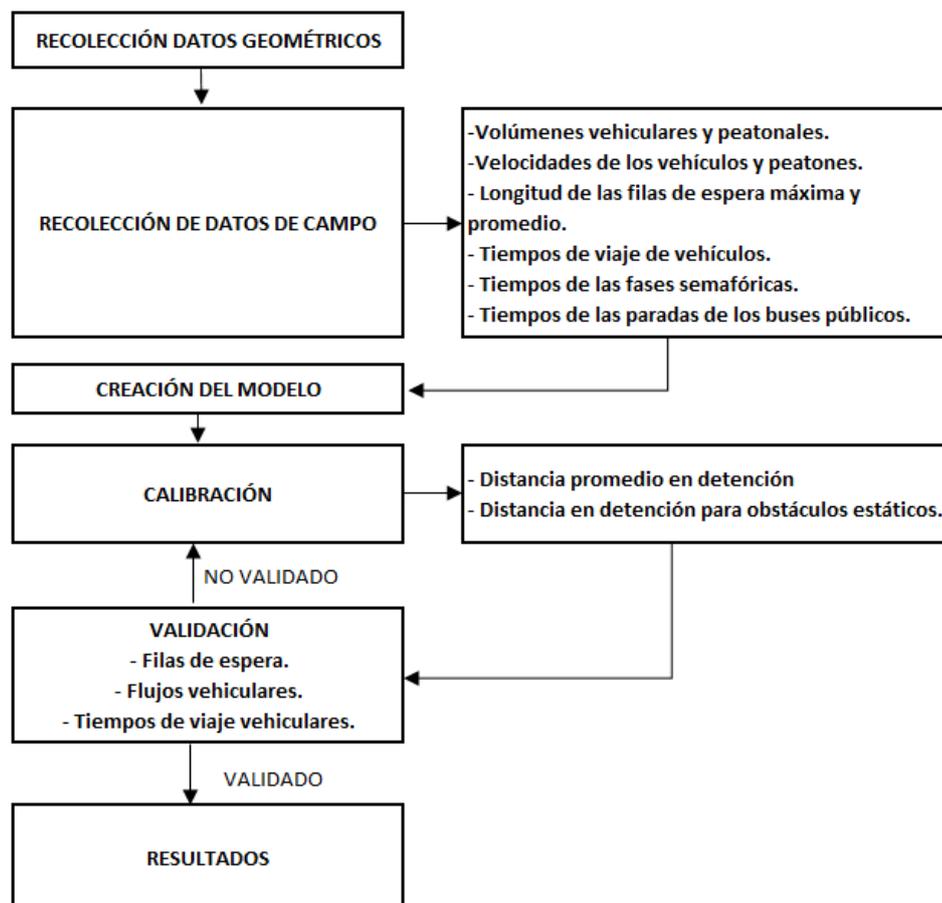


Figura 6 – Proceso de la metodología para la creación, calibración y validación del modelo de micro simulación.

3.1 Recolección de datos geométricos y espacio público de la intersección vial

De manera preliminar, es necesario obtener los siguientes datos de la intersección vial:

- Número y ancho de carriles en cada calle.
- Pendiente de las calles.
- Ubicación de las paradas de transporte público.
- Identificación de la existencia de zonas estacionamientos.
- Identificación de las zonas de atravesamiento de peatones.
- Imagen satelital para utilizar de fondo al momento de crear el modelo.
- Rutas y horarios de transporte público.

De manera a aprovechar las herramientas tecnológicas actuales, se utilizará el programa Google Earth para obtener los datos. Cabe resaltar, que pueden existir errores en la medición de algunos datos, como en el ancho de los carriles, debido a la precisión del software.

3.2 Recolección de datos en campo

Identificando la manera cómo funciona el software PTV Vissim, se deben tomar los siguientes datos en campo: Volúmenes y velocidades de los vehículos y peatones, longitud de las filas de espera, tiempos de viaje de vehículos, tiempos de ciclo y fases de los semáforos; y tiempos de parada de los buses de transporte público. Los métodos que serán implementados fueron escogidos para facilitar las mediciones en campo, y teniendo en cuenta la falta de equipamientos especializados para su aplicación.

3.2.1 Volúmenes vehiculares

El método para obtener los volúmenes vehiculares se llevará a cabo mediante un conteo manual en la intersección, ubicando 1 aforador en cada movimiento definido. Cada aforador debe registrar el número y tipo de vehículos (ligeros, pesados, buses y motos) en intervalos de 15 minutos, durante un rango de tiempo donde se pueda obtener la hora de máxima demanda horaria. Esta metodología puede incurrir en errores humanos a la hora de realizar los conteos.

Para la recolección de los siguientes datos en campo, es importante definir antes la hora máxima de demanda horaria, con el fin de tomar los valores únicamente en dicha hora.

3.2.2 Velocidad de los vehículos

Para realizar las mediciones de la velocidad de los vehículos se debe definir una distancia en alguna zona de la intersección, y medir el tiempo que demoran en recorrer dicha distancia los automotores que se encuentran en flujo libre. Se debe tener en cuenta que el software utiliza las velocidades deseadas, y, por lo tanto, sólo se deben medir los tiempos de los vehículos que no paran en ninguna circunstancia.

La velocidad se asumió constante en los vehículos, y se calculó con la siguiente ecuación.

$$v = \frac{d}{t} \quad (4)$$

Donde d es la distancia del tramo definido y t es el tiempo que demoran en recorrerlo. Cabe aclarar, que esta metodología puede incurrir en mayores grados de error a que si se utilizara tecnología avanzada (pistola radar de velocidad).

3.2.3 Volúmenes peatonales

Con el fin de obtener el número de peatones que cruzan en cada uno de los atravesamientos peatonales, se debe realizar un conteo manual en periodos de 15 minutos, (únicamente en la hora de máxima demanda), teniendo en cuenta que, para mayor facilidad de ingresar los datos al programa, se deben contar las personas en cada dirección del atravesamiento. Esta metodología puede incurrir en errores humanos a la hora de realizar los conteos.

3.2.4 Velocidad de los peatones

La metodología para medir la velocidad de los peatones es exactamente la misma que para la medición de la velocidad de los vehículos. En este caso se debe medir el tiempo que demoran las personas en pasar los atravesamientos peatonales y por medio del programa Google Earth, estimar las distancias de dichos atravesamientos. Este método puede incurrir en grados de errores, por asumir que la velocidad es constante y por la imprecisión a la hora de medir las distancias en Google Earth.

3.2.5 Longitud de las filas de espera

La metodología para medir las filas de espera consiste en contar el número de vehículos que se acumulan en cada ciclo de los semáforos. Si la calle presenta más de un carril, se debe medir la fila de espera en el carril que tenga el mayor número de vehículos. Teniendo en cuenta que el software arroja los resultados de la fila de espera en metros y no en función del número de vehículos, también se debe tener en cuenta el tipo de vehículos que se encuentran en la fila de espera. Estas mediciones serán utilizadas para llevar a cabo la validación del modelo en la sección 4.4.

3.2.6 Tiempos de viaje de vehículos

Para los tiempos de viaje de los vehículos deben definirse una serie de distancias en la intersección, de tal manera que se puedan medir los tiempos que demoran los vehículos en recorrer dicha distancia. Estas mediciones serán utilizadas para llevar a cabo la validación del modelo en la sección 4.4.

3.2.7 Tiempos de ciclo y fases de los semáforos

La metodología consiste en realizar las mediciones de tiempo de cada fase de los semáforos (tiempos de verde, rojo, amarillo, verde intermitente y amarillo intermitente) y relacionar los tiempos de cada grupo de ellos. Para realizar dicha relación se procede a medir el número de segundos que lleva en la fase de rojo el semáforo peatonal de alguna calle cuando el semáforo peatonal de la otra calle cambie de rojo a verde. De esa manera se debe realizar con los demás semáforos peatonales, consiguiendo establecer una relación de todos los semáforos de la intersección.

3.2.8 Tiempos de parada de los buses de transporte público

La metodología consiste sencillamente en medir el tiempo de estancia de cada bus de transporte público en las paradas, durante la hora de máxima demanda. Se debe tener en cuenta si los buses tienen la posibilidad de realizar las paradas en bahías exclusivas, o si deben detenerse en el mismo carril donde circulan los demás vehículos.

3.3 Metodología de calibración y validación

El proceso de calibración y validación que será usado se definirá teniendo en cuenta los métodos aplicados en los trabajos de grado realizados por (Suarez, 2007) y (Zúñiga, 2011). Deben definirse diversas variables que sean posibles medir y observar en campo para realizar la calibración, como la velocidad media de los automotores, la velocidad de los peatones, la separación media entre vehículos en detención y la distancia de separación con obstáculos estáticos; y definir otras variables para la validación, como los valores de los flujos vehiculares, tiempos de viaje, y la longitud de las filas de espera.

3.3.1 Calibración

El primer paso para realizar la calibración consiste en observar detalladamente el modelo para identificar errores notables en el comportamiento de los conductores y la red vial de la intersección.

Seguidamente se debe identificar las variables que más afectan en los resultados de la simulación, y dividirlos en dos categorías. En la primera categoría se deben agrupar los parámetros que según el criterio del modelador no deben ser ajustados, es decir, mantenerlos fijos, debido a que representan una veracidad alta en el comportamiento de los vehículos en la intersección vial; y en la segunda categoría, identificar los parámetros en los que existe alguna incertidumbre y que, al afectarlos, cambian considerablemente el resultado de la simulación (Vilarinho, 2008). Cabe resaltar, que es mejor agrupar pocos valores en la segunda categoría, para facilitar el proceso de calibración. El método consiste en variar los parámetros de la segunda categoría de manera iterativa, hasta lograr validar el modelo satisfactoriamente.

El proceso de calibración y los parámetros escogidos para cada categoría se presentan en la sección 4.3.

3.3.2 Validación

Para la validación del modelo a partir de los flujos vehiculares, se utilizará el estadístico GEH, proveniente de Geoffrey E. Havers, quien lo inventó en los años 70 mientras trabajaba como planificador de transporte en Londres, Inglaterra. Aunque su forma matemática es similar a una prueba de chi cuadrado, no es una verdadera prueba estadística. Más bien, es una fórmula

empírica que ha demostrado ser útil para una variedad de propósitos de análisis de tráfico. La fórmula es expresada de la siguiente manera:

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M-C)^2}{M+C}} \quad (5)$$

Dónde M es el volumen de tráfico por hora obtenido por la simulación y C es el conteo de tráfico horario obtenido en campo.

El uso de GEH como criterio de aceptación para los modelos de micro simulación está reconocido en el manual de diseño de carreteras y puentes de la agencia de carreteras del Reino Unido – DMRB por sus siglas en inglés (Design Manual for Roads and Bridges) (England, 2015), en las guías de modelos de micro simulación de Wisconsin (Wisconsin, 2011), en las guías de modelación de transporte de Londres (Smith & Blewitt, 2010) y en otras referencias.

Para el trabajo de modelado de tráfico un GEH inferior a 5 se considera un buen ajuste entre los volúmenes horarios modelados y observados. Según el DMRB, el 85% de los volúmenes en un modelo de tráfico deben tener un GEH inferior a 5. Valores de GEH en el rango de 5 a 10 suponen una investigación y corrección más profunda de los datos; y la existencia de valores de GEH mayores a 10 representa una alta probabilidad de que haya un problema con el modelo de demanda de viajes o los datos, esto podría ser algo tan simple como un error de entrada de datos, o tan complicado como un serio problema de calibración del modelo (England, 2015).

Además del estadístico GEH para validar los flujos vehiculares, también se utilizará la diferencia relativa entre los tiempos de viaje vehiculares y las filas de espera promedio y máxima medidos en campo y los obtenidos mediante la simulación. La diferencia relativa, se calcula de la siguiente manera:

$$Diferencia\ relativa = \frac{|A-B|}{A} * 100 \quad (6)$$

Donde A es el valor observado en campo, y B es el valor obtenido mediante la micro simulación. La diferencia relativa de los datos obtenidos debe ser menor al 10% para que se considere válido el modelo analizado. (Zúñiga, 2011). En la sección 4.4 se mostrarán los resultados de la validación.

4. CASO DE ESTUDIO

Para la aplicación del modelo de micro simulación fue escogida la intersección vial entre la “Avenida Conde de Margaride”, la “Rua Gil Vicente”, la “Rua Paio Galvão”, la “Avenida São Gonçalo” y la “Avenida Alameda Doutor Alfredo Pimenta”, de la ciudad de Guimarães, Portugal, mostrada en la Figura 7.



Figura 7 - Intersección vial en estudio. Adaptada de Google Earth

4.1 Descripción general de las calles

Teniendo en cuenta los datos recogidos mediante Google Earth y simple observación en la intersección, se hace una descripción general de las calles que componen la intersección vial.

- Alameda Doutor Alfredo Pimenta

Es una avenida que cuenta con dos carriles por sentido de aproximadamente 3 metros de ancho. Tiene una parada de bus dentro de la zona analizada en el sentido Norte – Sur y una zona de atravesamiento de peatones. A lo largo de la avenida hay una diversa cantidad de estacionamientos, pertenece a una zona urbana de la ciudad de Guimarães y puede ser clasificada como una vía distribuidora principal debido a sus características físicas y a la

conexión que brinda para entrar y salir del centro histórico de la ciudad. Es una vía prácticamente plana, y se asume con una pendiente de 0%.



Figura 8 – Avenida Alameda Dr. Alfredo Pimenta

- Avenida São Gonçalo

La avenida São Gonçalo tiene dos carriles por sentido con un ancho aproximado de 3 metros. En el sentido Oriente – Occidente cuenta con dos bahías usadas como paradas de buses y en el otro sentido tiene estacionamientos a lo largo de la vía. Al igual que la Avenida Alameda Doutor Alfredo Pimenta también tiene una zona de atravesamiento de peatones. Esta avenida es una conexión entre la zona céntrica de la ciudad con el estadio de fútbol Dom Afonso Henriques y puede ser clasificada también como una distribuidora principal. Es una vía prácticamente plana, y se asume una pendiente de 0%.



Figura 9 – Avenida São Gonçalo

- Avenida Conde de Margaride

Cuenta con tres carriles de aproximadamente 3.1 metros, uno de ellos exclusivo para los carros que necesitan girar a la izquierda hacia el norte de la ciudad y los otros dos para ingresar al centro histórico. Puede ser clasificada como una distribuidora principal, realizando la conexión

entre la entrada Oeste de la ciudad con el centro histórico. Tiene una considerable cantidad de estacionamientos a lo largo de la vía, una parada de bus en la zona de estudio y está regida por un semáforo en la zona de la intersección. Su pendiente aproximada es del 6%.



Figura 10 – Avenida Conde de Margaride

- Calle Paio Galvão

Esta calle es considerada como una vía distribuidora local, ya que hace parte como tal del centro histórico de la ciudad. Tiene dos carriles de aproximadamente 3 metros, cuenta con un suelo empedrado, una zona de atravesamiento de peatones con semáforo y una parada de bus en la zona de estudio. Es una vía prácticamente plana.



Figura 11 – Calle Paio Galvão

- Calle Gil Vicente

Es una calle que tiene un carril de 3 metros de ancho, y puede ser considerada como una vía distribuidora local. Su suelo es empedrado, tiene estacionamiento a lo largo de su longitud, está regida por un semáforo en la zona de la intersección y permite únicamente realizar giros a la derecha hacia el norte de la ciudad.



Figura 12 – Calle Gil Vicente

- Rotonda o glorieta

En la zona central de la intersección existe una especie de rotonda o glorieta, que permite realizar diferentes movimientos y dónde tienen prioridad los carros que están dentro de ella.

En el sentido Norte – Sur de la rotonda, existe un semáforo para controlar el tráfico. En esa zona existen 3 carriles de aproximadamente 3 metros de ancho, uno de ellos exclusivo para girar a la izquierda y los otros dos para ingresar al centro histórico de la ciudad.

En el sentido Sur – Norte de la rotonda hay una señal de pérdida de prioridad, dándole el paso a los carros que circulan por la Calle Gil Vicente, así mismo, existe un semáforo peatonal, estacionamientos a lo largo de su longitud y una escuela secundaria llamada Francisco de Holanda.

En la zona central se ubica una gran fuente que limita el espacio de la intersección, pero da un aspecto visual agradable. Para el modelo fue asumida con pendiente del 0%.



Figura 13 – Rotonda. Tomada de Google Earth

4.2 Proceso de modelación

Para realizar de manera adecuada el modelo que representa la realidad de la intersección vial, fueron tenidos en cuenta los siguientes pasos: Malla vial de la intersección, áreas de conflicto, modelación de vehículos, peatones, semáforos, transporte público, estacionamientos, elementos para generar resultados de la modelación y parámetros adicionales de simulación.

4.2.1 Malla vial de la intersección

En esta parte del proyecto fue necesario ingresar y dar la escala necesaria a una imagen de fondo de la intersección (obtenida de Google Earth) para poder crear las calles y avenidas que la conforman, teniendo en cuenta el número de carriles, la existencia de carriles de adelantamiento, la pendiente, el ancho y longitud de las vías, y el sentido de dirección de las mismas.

Cabe resaltar que, para unir las vías creadas, se deben insertar conectores que definan cuántos y cuales carriles deben estar conectados entre sí. En la Figura 14, se puede apreciar el resultado de la malla vial en el software, incluidos los atravesamientos peatonales creados como calles de área peatonal.



Figura 14 – Malla vial creada en PTV VISSIM 9.0

4.2.2 Áreas de conflicto

Las áreas de conflicto son un elemento de la red que permiten regular conflictos entre vehículos/vehículos y vehículos/peatones en dos tramos o conectores diferentes (Vissim, 2016). Cada vez que se crea un cruce de calles o atravesamientos peatonales, se generan puntos de conflicto dónde es necesario definir cuál vía tiene prioridad sobre la otra y darle fluidez al modelo de manera realista.

Son la solución recomendada en la mayoría de casos ya que pueden ser modeladas fácilmente y el comportamiento resultante de los vehículos es más inteligente.

En la Figura 15, se puede observar un ejemplo de áreas de conflicto entre dos vías de tránsito vehicular, y entre una vía y un atravesamiento peatonal.

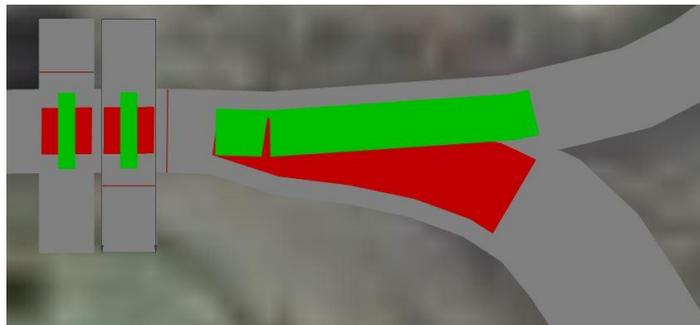


Figura 15 - Áreas de conflicto dadas en la rotonda sentido Sur – Norte.

En la figura anterior, se puede observar un entrecruzamiento entre los carros que se dirigen hacia la rotonda en sentido Sur-Norte y los carros que circulan por la calle Gil Vicente (parte derecha de la figura), y un atravesamiento peatonal (parte izquierda), que aunque está regido por un semáforo, es necesario definir la prioridad de los peatones. Las barras de color verde simbolizan que los vehículos que se dirigen por esa calle o los peatones tienen prioridad sobre la otra corriente de tráfico.

En los conflictos de cruce de calles (una vía atraviesa a la otra, caso del atravesamiento de los peatones en la Figura 15) y entrecruzamientos (dos vías se cruzan en dirección hacia otra vía, caso de la intersección de vehículos en la Figura 15), hay que tener en cuenta dos factores muy importantes para la simulación.

- Brecha frontal

Se refiere a la brecha mínima en segundos entre el borde trasero del vehículo en la vía principal y el borde delantero de un vehículo en la vía de menor jerarquía (Vissim, 2016):

- Para conflictos de cruce, la brecha frontal se refiere al tiempo mínimo transcurrido desde que el vehículo con el derecho de vía ha salido del área de conflicto hasta que el vehículo que cede el paso ingresa a ella.
- Para conflictos de entrecruzamiento, la brecha frontal se refiere al tiempo mínimo transcurrido desde que el vehículo con el derecho de vía está completamente dentro del área de conflicto antes que también el vehículo que cede el paso ingresa al área de conflicto.

Para cada clase de vehículo, se puede ingresar una brecha por separado. Para la modelación se ha decidido dejar el valor por defecto que tiene el software (0,5 segundos), debido a que es un valor que por observación en la intersección, define una situación aproximada a lo que acontece en la realidad.

- Brecha trasera

Es la brecha mínima en segundos entre el borde trasero del vehículo en la vía de menor jerarquía y el borde delantero del vehículo en la vía principal, por ejemplo, el tiempo que un vehículo que cede el paso debe proporcionar luego que éste ha salido del área de conflicto antes que un vehículo con el derecho de vía ingrese al área de conflicto. Esta brecha sólo se da en el caso de conflictos de cruce.

Para cada clase de vehículo, se puede ingresar una brecha por separado. Para la modelación se ha decidido dejar el valor por defecto que tiene el software (0,5 segundos), debido a que es un valor que por observación en la intersección, define una situación aproximada a lo que acontece en la realidad.

4.2.3 Modelación de vehículos

En el modelo se tuvieron en cuenta cuatro tipos de vehículos: Vehículos ligeros, pesados, buses y motos.

- Vehículos ligeros: incluyen vehículos sedán, hatchback, eléctricos para dos personas y furgonetas.
- Vehículos pesados: Camiones comerciales.
- Buses: Buses de transporte público.
- Motos.

Con el fin de realizar adecuadamente la modelación de los vehículos, se deben tener en cuenta los siguientes datos tomados en campo: volúmenes, velocidades y aceleraciones de los vehículos.

4.2.3.1 Volúmenes vehiculares

Para el aforo de los vehículos, fueron definidos los movimientos mostrados en la Figura 16, de forma que se pudiera llevar a cabo una adecuada recopilación de datos en la intersección.

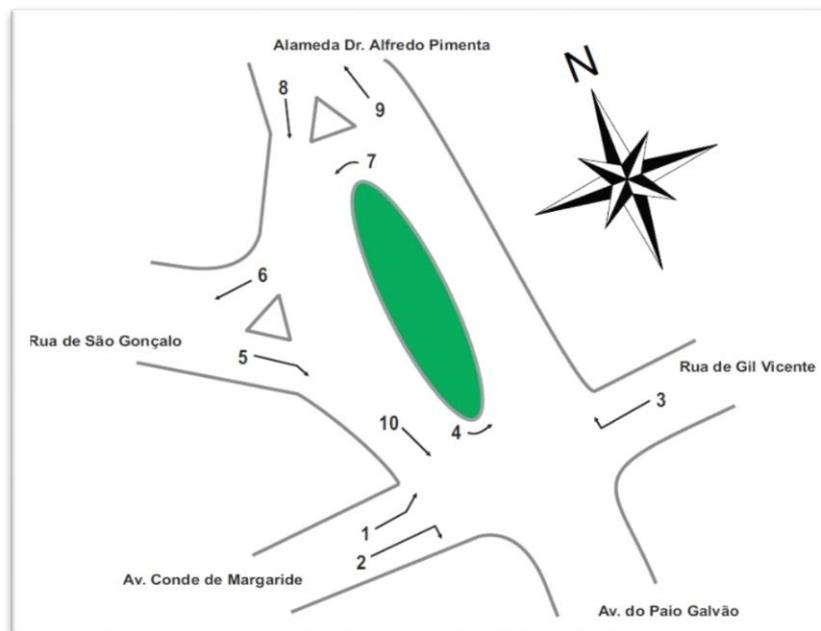


Figura 16 – Movimientos vehiculares para la realización del aforo vehicular

El conteo fue desarrollado en el ámbito de estudio de movilidad de los municipios de Braga, Guimarães, Barcelos y Famalicão en el año 2014, en un rango de tiempo de 2 horas en la mañana y 2 en la tarde. El periodo de tiempo de los conteos fue de 07:30 a las 09:30 y de las 16:30 a las 18:30.

Para validar y utilizar los datos del conteo de los vehículos en el modelo, fueron realizados dos conteos el día miércoles 12 de abril del 2017, en los accesos de la calle Gil Vicente y la Avenida Conde Margaride, obteniéndose como resultado valores muy parecidos con los contados en el año 2014 (aproximadamente 1% anual de diferencia). Es decir, durante los 3 años que pasaron, no ocurrieron grandes aumentos en la cantidad de vehículos que transitan por dicha zona (entre 5 a 10 vehículos). Por tal motivo, se validó utilizar los conteos del año 2014.

Realizando una observación de los datos obtenidos, se determinó que la hora de máxima demanda es desde las 17:30 hasta las 18:30, lo que quiere decir que esa será la hora en la que se realizará el modelo de micro simulación. Los resultados del aforo vehicular pueden encontrarse en el ANEXO 1.

En la Tabla 8 y la Figura 17, se puede observar el número y tipo de vehículos que ingresan a la intersección en cada calle.

Tabla 8 - Conteo por tipos de vehículos en cada uno de los accesos a la intersección en la hora 17:30 - 18:30

TIPO DE VEHICULO / ACCESO	MOTOS	LIGEROS	PESADOS	BUSES	TOTAL
AVENIDA CONDE DE MARGARIDE	3	504	4	27	538
AVENIDA SÃO GONÇALO	1	124	1	0	126
CALLE GIL VICENTE	2	298	1	8	309
ALAMEDA DR. ALFREDO PIMENTA	3	438	2	10	453
TOTAL	9	1364	8	45	1426

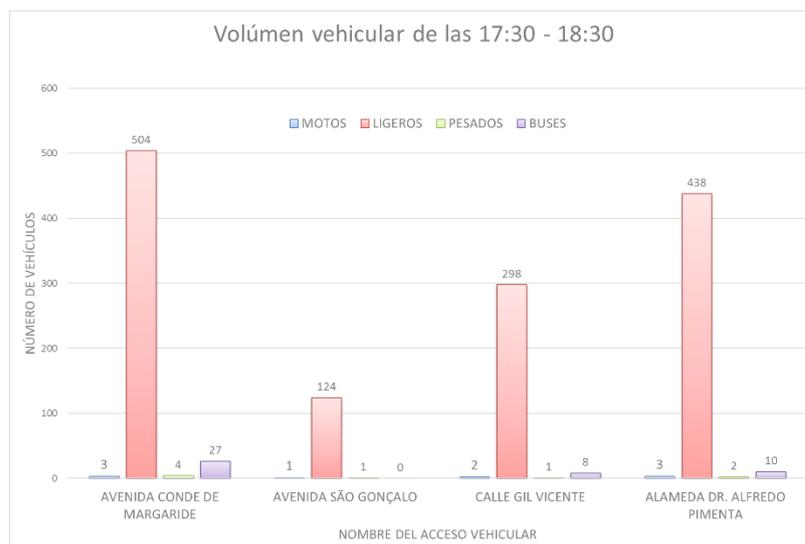


Figura 17 - Conteo por tipos de vehículos en cada uno de los accesos a la intersección en la hora 17:30 - 18:30

Claramente se evidencia una gran cantidad de vehículos ligeros en comparación con los otros tipos de automotores, siendo aproximadamente un 96% del total. Los dos accesos que generan más vehículos son la Avenida Conde de Margaride y la Alameda Dr. Alfredo Pimenta.

Los buses representan un 3% de la cantidad total de automotores, y la mayor parte de los buses que circulan en la intersección pertenecen al transporte público de la ciudad, aproximadamente un 82% del total de los buses. La modelación de ese tipo de vehículos está explicada en la sección 4.2.6

Las motos y vehículos pesados únicamente representan el 1% del total de vehículos, sin embargo, hay que tenerlos en cuenta en la modelación debido a que cada tipo de vehículo tiene diferentes características físicas y parámetros en el software.

Para ingresar la cantidad de vehículos, el programa tiene 2 opciones: **la asignación dinámica mediante una matriz Origen – Destino**, y **la asignación estática** a través de la cantidad de vehículos por hora generados en cada acceso o calle. La asignación dinámica es usada especialmente para redes de tránsito de mayor tamaño, dónde los conductores pueden tener varias opciones o rutas para dirigirse de un punto a otro, escogiendo esos desplazamientos por medio de evaluaciones de costo debido a factores como el tiempo de demora, la congestión vial, la distancia recorrida, entre otros. Para la modelación fue seleccionada la asignación estática con rutas definidas, ya que, en la intersección vial en estudio, los conductores no tienen muchas alternativas para dirigirse de un punto a otro, y deben seguir las rutas que les serán establecidas en el programa.

Teniendo el número de vehículos que se generan en cada acceso de la intersección, se procede a ingresar los datos al software teniendo en cuenta que se deben restar el número de buses que hacen parte del transporte público. El número de automotores fue ingresado en unidad de vehículos por hora y fue escogido el tipo de volumen estocástico, para generar fluctuaciones aleatorias del volumen de tráfico. Vale la pena resaltar en este punto, que se debió crear un tipo de vehículo para las motos, debido a que éstas no están creadas de manera predeterminada en el software PTV Vissim.

También se debe tener en cuenta que es necesario crear una composición de vehículos para cada acceso de la intersección, es decir, establecer la proporción de vehículos ligeros, pesados, buses

y motos para cada calle. En la Tabla 9, se muestran las composiciones de vehículos de todas las calles.

Tabla 9 – Composiciones vehiculares de los accesos de la intersección

Calle	Motos	Ligeros	Pesados	Buses	Total	%Motos	%Ligeros	%Pesados	%Buses	%Total
Avenida Conde Margaride	3	504	4	6	517	0.006	0.974	0.008	0.012	1
Sao Goncalo	1	124	1	0	126	0.008	0.984	0.008	0.000	1
Gil Vicente	2	298	1	2	303	0.007	0.983	0.003	0.007	1
Alameda Dr. Alfredo Pimenta	3	438	2	0	443	0.007	0.988	0.005	0.000	1

Una vez fueron ingresados los datos especificados anteriormente, se procedió a crear las rutas y giros posibles que deben realizar los vehículos para llegar de un punto a otro en la intersección vial. Para esto, fueron definidas 12 rutas (3 para cada acceso), teniendo en cuenta que debe especificarse la proporción de vehículos que deben seguir dichos recorridos. En las siguientes figuras se muestran las rutas definidas que parten desde la avenida Conde de Margaride, calle Gil Vicente, avenida São Gonçalo y avenida Alameda Dr. Alfredo Pimenta.



Figura 18 - Ruta de la A. Conde Margaride a la calle Paio Galvão



Figura 19 - Ruta de la A. Conde Margaride a la A. Alameda Dr. Alfredo Pimenta



Figura 20 - Ruta de la A. Conde Margaride a la avenida São Gonçalo



Figura 21 - Ruta de retorno de la avenida Alameda Dr. Alfredo Pimenta a la misma avenida



Figura 22 - Ruta de la A. Alameda Dr. Alfredo Pimenta a la avenida São Gonçalo



Figura 23 – Ruta de la A. Alameda Dr. Alfredo Pimenta a la calle Paio Galvão



Figura 24 – Ruta de la calle Gil Vicente a la A. São Gonçalo



Figura 25 – Ruta de la calle Gil Vicente a la A. Alameda Dr. Alfredo Pimenta



Figura 26 - Ruta de la calle Gil Vicente a la calle Paio Galvão



Figura 27 - Ruta de la calle São Gonçalo a la A. Alameda Dr. Alfredo Pimenta



Figura 28 - Ruta de la calle São Gonçalo a la calle Paio Galvão



Figura 29 - Ruta de retorno de la calle São Gonçalo a la misma calle

4.2.3.2 Velocidades de los vehículos

Para obtener las velocidades deseadas de los vehículos, se definió un tramo de la rotonda en sentido Sur – Norte con una distancia aproximada de 11 metros, desde un punto demarcado en la rotonda, hasta una línea demarcada de los estacionamientos (Figura 30) y se midieron los tiempos de los vehículos que no paran en el atravesamiento peatonal ubicado unos metros antes.



Figura 30 – Distancia de medición para velocidades de los vehículos

Se realizaron mediciones durante tres días (11, 12 y 13 de abril del 2017) en el rango de tiempo de las 16h – 18h, hasta alcanzar un valor suficiente de datos para cada tipo de vehículo (101 para vehículos ligeros, 42 para buses, 10 para vehículos pesados y 15 para motos). Fue difícil obtener un mayor número de datos para vehículos pesados y motos, ya que en la zona circulan muy pocos. El método puede incurrir en errores humanos, debido a la dificultad para medir el tiempo de manera precisa.

Los datos medidos en campo de la velocidad de los vehículos pueden observarse en el ANEXO 2.

Para ingresar los datos de las velocidades de los vehículos en el software, se debe realizar un estudio estadístico descriptivo de los datos para cada tipo de vehículo, logrando así, obtener un histograma de velocidades acumuladas y poder crear las curvas de velocidad deseada para los vehículos ligeros, pesados, buses y motos en el software.

Dichos estudios estadísticos fueron realizados con la ayuda del software STATGRAPHICS XVII, y a continuación se presentan los resultados obtenidos.

- Vehículos ligeros

Tabla 10 – Estadística descriptiva de las velocidades de los vehículos ligeros

Numero de datos	101
Promedio	27.15
Desviación Estándar	2.36
Mínimo	23.61
Máximo	32.11

Tabla 11 – Tabla de frecuencias de las velocidades de los vehículos ligeros

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Rel. Acum.
1	23	24	23.5	9	0.0891	9	0.0891
2	24	25	24.5	9	0.0891	18	0.1782
3	25	26	25.5	22	0.2178	40	0.396
4	26	27	26.5	16	0.1584	56	0.5545
5	27	28	27.5	12	0.1188	68	0.6733
6	28	29	28.5	7	0.0693	75	0.7426
7	29	30	29.5	9	0.0891	84	0.8317
8	30	31	30.5	10	0.099	94	0.9307
9	31	32	31.5	6	0.0594	100	0.9901
10	32	33	32.5	1	0.0099	101	1

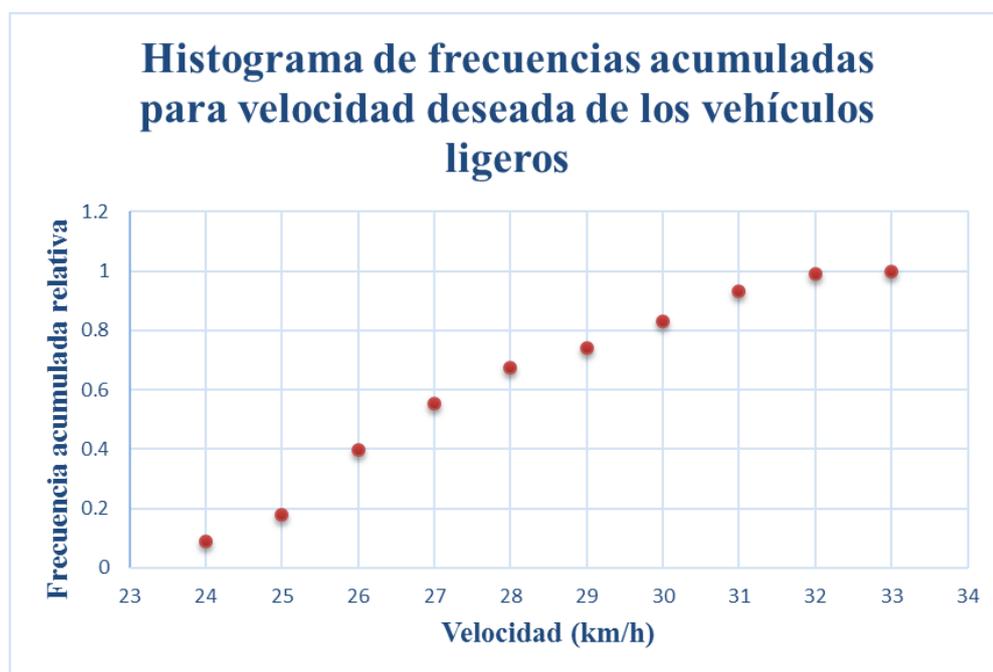


Figura 31 – Histograma de frecuencias acumuladas de la velocidad de los vehículos ligeros

- Buses

Tabla 12 - Estadística descriptiva de las velocidades de los buses

Numero de datos	42
Promedio	25.92
Desviación Estándar	1.09
Mínimo	24.25
Máximo	27.59

Tabla 13 - Tabla de frecuencias de las velocidades de los buses

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Rel. Acum.
1	24	25	24.5	10	0.2381	10	0.2381
2	25	26	25.5	14	0.3333	24	0.5714
3	26	27	26.5	7	0.1667	31	0.7381
4	27	28	27.5	11	0.2619	42	1

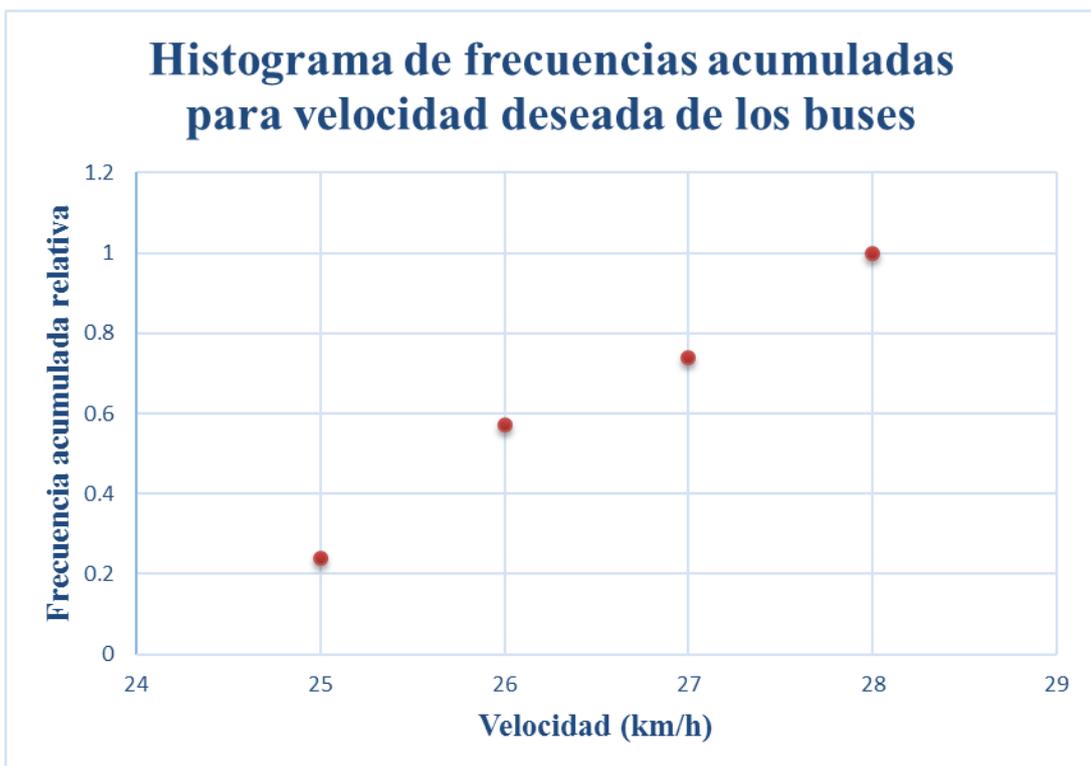


Figura 32 - Histograma de frecuencias acumuladas de la velocidad de los buses

- Vehículos pesados

Tabla 14 - Estadística descriptiva de las velocidades de los vehículos pesados

Numero de datos	10
Promedio	25.34
Desviación Estándar	0.97
Mínimo	24.04
Máximo	26.76

Tabla 15 - Tabla de frecuencias de las velocidades de los vehículos pesados

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Rel. Acum.
1	23	24	23.5	0	0	0	0
2	24	25	24.5	4	0.4	4	0.4
3	25	26	25.5	5	0.5	9	0.9
4	26	27	26.5	1	0.1	10	1

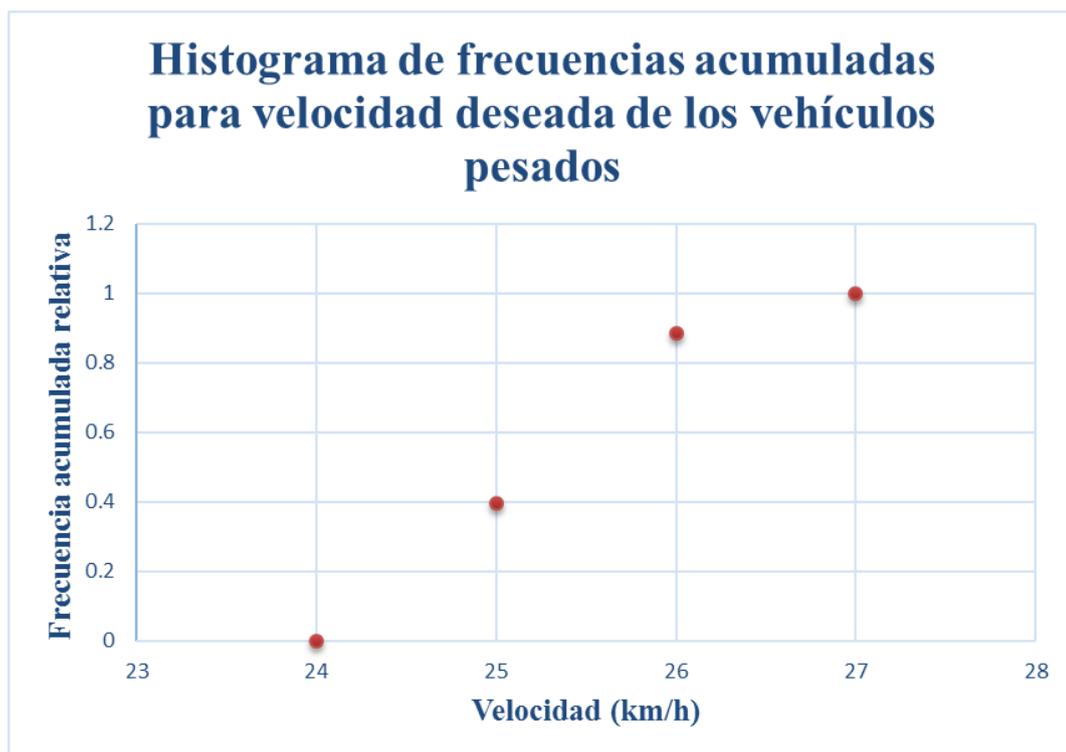


Figura 33 - Histograma de frecuencias acumuladas de la velocidad de los vehículos pesados

- Motos

Tabla 16 - Estadística descriptiva de las velocidades de las motos

Numero de datos	15
Promedio	26.78
Desviación Estándar	4.36
Mínimo	21.47
Máximo	34.75

Tabla 17 - Tabla de frecuencias de las velocidades de las motos

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Rel. Acum.
1	20	22	21	1	0.0667	1	0.0667
2	22	24	23	2	0.1333	3	0.2000
3	24	26	25	2	0.1333	5	0.3333
4	26	28	27	3	0.2000	8	0.5333
5	28	30	29	2	0.1333	10	0.6667
6	30	32	31	2	0.1333	12	0.8000
7	32	34	33	2	0.1333	14	0.9333
8	34	36	35	1	0.0667	15	1

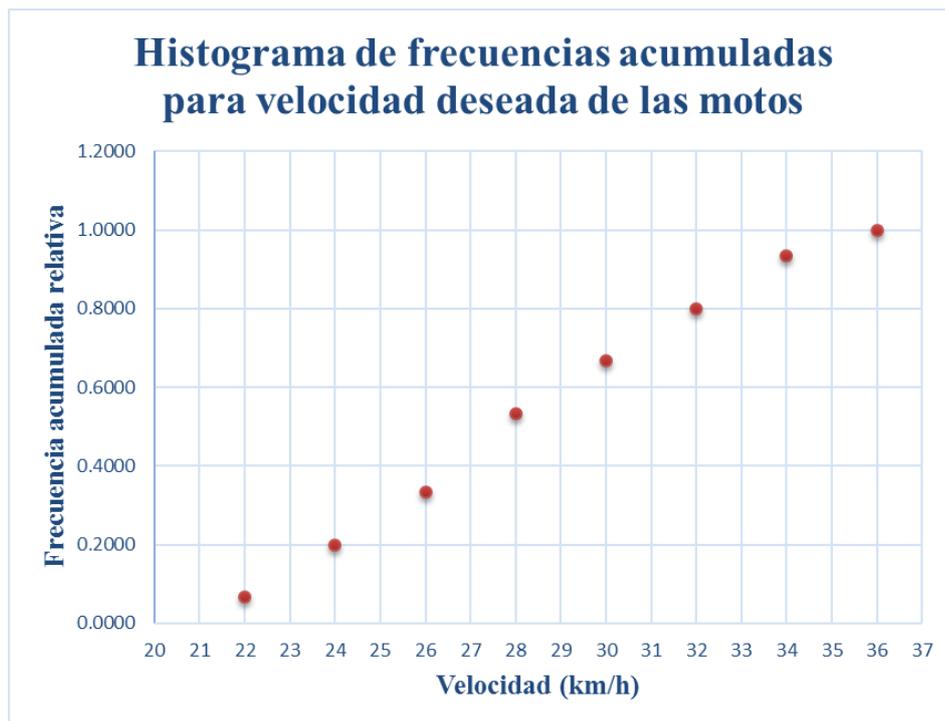


Figura 34 - Histograma de frecuencias acumuladas de la velocidad de las motos

Fueron creadas satisfactoriamente las curvas de la velocidad deseada para cada vehículo en el software, de manera que se simule un comportamiento más cercano a la realidad.

4.2.3.3 Aceleración máxima y deseada, desaceleración máxima y deseada

Vissim utiliza 4 tipos de funciones para representar la aceleración y desaceleración de los vehículos: Aceleración máxima, aceleración deseada, desaceleración máxima y desaceleración deseada.

- La aceleración máxima sólo se considera por los vehículos si se requiere una aceleración que exceda la aceleración deseada para mantener la velocidad en las pendientes o realizar un cambio de carril.
- La aceleración deseada es la aceleración que utilizan los vehículos en todas las demás situaciones, donde no necesiten aplicar la aceleración máxima.
- La desaceleración máxima se considera cuando los vehículos requieren detenerse de manera segura ante un obstáculo. Se ajusta en las calles que tienen pendiente de la siguiente manera: Se aumenta en $0,1 \text{ m/s}^2$ por cada 1% de pendiente positiva, y disminuye $0,1 \text{ m/s}^2$ por cada 1% de pendiente negativa.
- La desaceleración deseada es usada por los vehículos en diferentes situaciones del comportamiento, por ejemplo, disminuir la velocidad al acercarse a semáforos o a otros vehículos, en caso de que haya una distancia lateral insuficiente para sobrepasar dentro de un carril, entre otras.

La forma de ingresar o modificar estos datos, se realiza mediante una curva de aceleración vs velocidad, que deben ser calculadas de forma precisa mediante información recolectada en campo. Para este modelo se usaron las curvas por defecto del software, ya que no se dispone con un equipo especializado para medir de manera acertada los valores necesarios para crear las nuevas curvas. En el caso de las motos, se utilizaron las curvas definidas para los vehículos, ya que no existen datos por defecto del software para este tipo de vehículos. Esa decisión evidentemente es un error, pero debido a que en la intersección hay una cantidad casi despreciable de motos, se considera que no afecta los resultados de la simulación.

4.2.4 Modelación de peatones

Con el fin de realizar adecuadamente la modelación de los vehículos, se deben tener en cuenta los siguientes datos tomados en campo: volúmenes y velocidades de los peatones.

4.2.4.1 Volúmenes peatonales

Las mediciones de los volúmenes peatonales se realizaron los días 18, 19 y 20 de abril del 2017 para cada atravesamiento peatonal, desde las 17:30 hasta las 18:30.

En total existen 7 atravesamientos peatonales, 5 con semáforos y 2 con prioridad para los peatones. Los atravesamientos que afectan en una mayor proporción al funcionamiento de la intersección son los que no cuentan con semáforos, debido a que los carros tienen que parar cada vez que alguna persona quiera cruzar la calle. En la siguiente Tabla, se pueden encontrar los resultados obtenidos de los conteos realizados.

Tabla 18 – Conteo de peatones en los atravesamientos peatonales

Calle Paio Galvão		Calle Gil Vicente		Rotonda Sentido Sur-Norte		Avenida Conde de Margaride	
Atravesamiento	Número de peatones por hora	Atravesamiento	Número de peatones por hora	Atravesamiento	Número de peatones por hora	Atravesamiento	Número de peatones por hora
Oeste - Este	226	Norte - Sur	343	Oeste - Este	156	Norte - Sur	361
Este - Oeste	376	Sur - Norte	371	Este - Oeste	514	Sur - Norte	377

Avenida São Gonçalo (Triangulo)		Alameda Dr. Alfredo Pimenta		Avenida São Gonçalo (Rotonda)	
Atravesamiento	Número de peatones por hora	Atravesamiento	Número de peatones por hora	Atravesamiento	Número de peatones por hora
Norte - Sur	103	Oeste - Este	129	Oeste - Este	156
Sur - Norte	390	Este - Oeste	157	Este - Oeste	514

Para ingresar los peatones en la red vial, es necesario crear antes unas determinadas áreas peatonales de salida y llegada, donde se generarán de manera estocástica las personas que hayan sido asignadas. Así mismo, se deben crear de tal manera que estén conectadas mediante las calles de área peatonal (creadas anteriormente en la sección 4.2.1).

Una vez creadas dichas áreas, se podrán ingresar adecuadamente los peatones por hora que se han obtenido mediante el conteo manual, y seguidamente, crear las rutas que deben seguir las personas. Estas rutas deben iniciar y terminar en las áreas peatonales, teniendo en cuenta el sentido de la calle que las conecta.

En la Figura 35, se puede observar la creación de las áreas peatonales y las rutas que deben seguir las personas, en los atravesamientos que están regidos por semáforos. Los rectángulos

verdes representan las áreas donde se generan los peatones y los rojos representan las áreas a donde deben llegar los peatones. Las personas deben seguir las rutas creadas por el modelador. En la parte inferior de la figura 35, se puede observar la ruta (línea amarilla) que parte desde el rectángulo verde hasta el rojo.

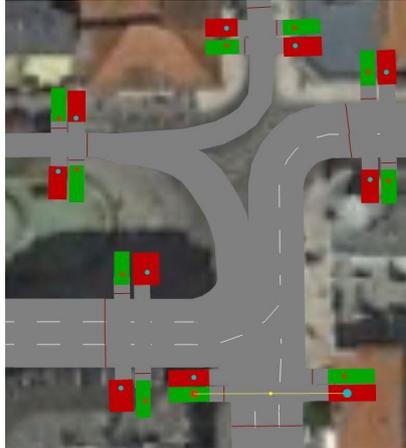


Figura 35 - Áreas y rutas peatonales en los atravesamientos regidos por semáforos

En los atravesamientos peatonales que no están regidos por semáforos, las áreas y rutas peatonales fueron creadas de la manera mostrada en la figura 36, donde se puede observar que los dos rectángulos son verdes, debido a que el mismo rectángulo puede servir de área de salida y de llegada. En los atravesamientos con semáforos no fue posible crear de la misma manera las áreas peatonales porque al cruzar la vía, las personas podían ser afectadas por el semáforo que estaba ubicado en el otro extremo de la calle y ser obligados a parar sin poder llegar al área de destino, por tanto, fue necesario separar las áreas, creando una calle de conexión diferente para cada ruta.

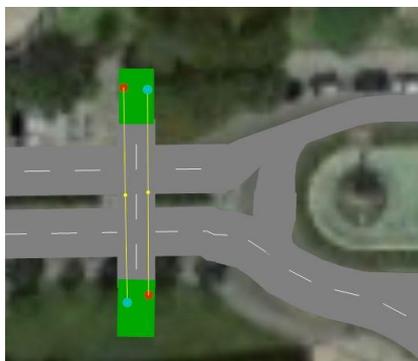


Figura 36 - Áreas y rutas peatonales en los atravesamientos sin semáforos

4.2.4.2 Velocidad de los peatones

El parámetro más importante a la hora de simular los peatones es la velocidad a la que se desplazan. Para la realización del modelo, fueron medidos 25 tiempos de personas por cada atravesamiento, generando un total de 175 mediciones. La obtención de los datos fue realizada el día jueves 20 de abril del 2017, en el rango de tiempo de las 15h-17h.

Los resultados de las mediciones hechas en campo se resumen en las siguientes tablas.

Tabla 19 – Datos de Velocidad de los peatones medidos en campo

Calle Paio Galvão		Calle Gil Vicente		Rotonda Sentido Sur-Norte		Avenida Conde de Margaride	
Velocidad promedio (m/s)	1.24	Velocidad promedio (m/s)	1.09	Velocidad promedio (m/s)	1.34	Velocidad promedio (m/s)	1.22
Velocidad mínima (m/s)	0.97	Velocidad mínima (m/s)	0.86	Velocidad mínima (m/s)	1.08	Velocidad mínima (m/s)	0.9
Velocidad máxima (m/s)	1.66	Velocidad máxima (m/s)	1.63	Velocidad máxima (m/s)	1.61	Velocidad máxima (m/s)	1.53
Total de datos	25	Total de datos	25	Total de datos	25	Total de datos	25

Avenida São Gonçalo (Triangulo)		Alameda Dr. Alfredo Pimenta		Avenida São Gonçalo (Rotonda)	
Velocidad promedio (m/s)	1.26	Velocidad promedio (m/s)	1.36	Velocidad promedio (m/s)	1.56
Velocidad mínima (m/s)	1.17	Velocidad mínima (m/s)	1.16	Velocidad mínima (m/s)	1.28
Velocidad máxima (m/s)	1.53	Velocidad máxima (m/s)	1.63	Velocidad máxima (m/s)	1.97
Total de datos	25	Total de datos	25	Total de datos	25

La velocidad a la que se desplazan los peatones depende de muchos factores externos y propios de la misma persona, entre ellos están: El sexo, la condición física, la edad, las condiciones atmosféricas, el tipo de superficie, el motivo del viaje, la hora del día, circulación libre o congestionada, entre otros (Costa & Macedo, 2008).

La situación de medición en campo corresponde a una circulación libre, lo cual significa que la velocidad promedio obtenida de todos los datos de 1,3 m/s representa la velocidad deseada de los peatones, sin embargo, teniendo en cuenta las recomendaciones del Manual de capacidad de carreteras del 2010 (TRB, 2010) y Austroads (1988), se usó una velocidad media de 1,2 m/s, la cual no difiere mucho de la hallada experimentalmente.

4.2.5 Modelación de semáforos

Debido a que la intersección está regida por medio de semáforos, fue necesario observar la clase de señales luminosas implementadas en la zona de estudio y obtener, por medio de mediciones en campo, el tiempo del ciclo y de las diferentes fases de los semáforos. Dichas mediciones fueron realizadas el día viernes 21 de abril del 2017.

En la intersección vial existen los siguientes tipos de semáforos: semáforo vehicular (rojo, verde y amarillo), semáforo vehicular (amarillo intermitente y verde), semáforo peatonal (rojo, verde y verde intermitente).

- Semáforo vehicular (rojo, verde y amarillo)

Este tipo de semáforos es el más común en gran parte del mundo, usado específicamente para los vehículos, dónde el color rojo significa que está prohibido el paso y los carros deben parar, el color amarillo simboliza también que está prohibido el paso a menos que el conductor se encuentre muy cerca de la línea de parada y no pueda frenar en condiciones de seguridad y el color verde significa que es permitido avanzar.

- Semáforo peatonal (rojo, verde y verde intermitente)

Esta clase de semáforos son usados principalmente para los peatones, dónde el color rojo significa que está prohibido el paso, el color verde simboliza que es permitido avanzar y el color verde intermitente significa que el paso es permitido pero que está muy cerca de cambiar al color rojo.

- Semáforo vehicular (amarillo intermitente y verde)

Este tipo de semáforos no es muy común, en la intersección en estudio es utilizado para los vehículos en zonas donde deben tener especial atención con el atravesamiento de peatones.

En el color amarillo intermitente está permitido avanzar, pero debe ser realizado con mucha precaución debido a que los peatones tienen prioridad, el color verde da prioridad a los vehículos, dejando en señal roja a los peatones.

Teniendo en cuenta los tipos de semáforos presentados anteriormente, es de gran importancia indicar cuales están presentes en cada calle y lugar de la intersección.

- Semáforos de la avenida Conde de Margaride.

En la Avenida Conde de Margaride se encuentra un semáforo convencional para los vehículos (rojo, amarillo y verde) y un semáforo convencional para los peatones (rojo, verde y verde intermitente) con sonido en simultaneo con la luz verde para apoyo en el atravesamiento de peatones con discapacidades visuales.

En las siguientes Tablas (20 y 21) se puede observar el resultado de las mediciones en campo de los tiempos de ciclo y de las diferentes fases.

Tabla 20 - Datos del semáforo de vehículos de la Avenida Conde de Margaride

Avenida Conde de Margaride	
Tipo de semáforo	Rojo, Amarillo y Verde
Usuario del semáforo	Vehículos
Tiempo del ciclo (Segundos)	80
Tiempo de Rojo (Segundos)	57
Tiempo de Amarillo (Segundos)	3
Tiempo de Verde (Segundos)	20

Tabla 21 - Datos del semáforo de peatones de la Avenida Conde de Margaride

Avenida Conde de Margaride	
Tipo de semáforo	Rojo, Verde y Verde intermitente
Usuario del semáforo	Peatones
Tiempo del ciclo (Segundos)	80
Tiempo de Rojo (Segundos)	29
Tiempo de Verde (Segundos)	47
Tiempo de Verde intermitente (Segundos)	4

Teniendo en cuenta los tiempos medidos en campo del ciclo semaforico de la Avenida Conde Margaride se puede observar que existe un tiempo de seguridad en el que los dos semáforos (vehicular y peatonal) se encuentran en rojo, este intervalo es conocido como tiempo de limpieza o rojo integral. Para este caso el tiempo de limpieza corresponde a 3 segundos.

En la siguiente figura se puede observar el diagrama de fases de los semáforos de la Avenida Conde Margaride, donde están registrados los diferentes tiempos de cada fase, de modo que se pueda apreciar más fácilmente el funcionamiento del semáforo.

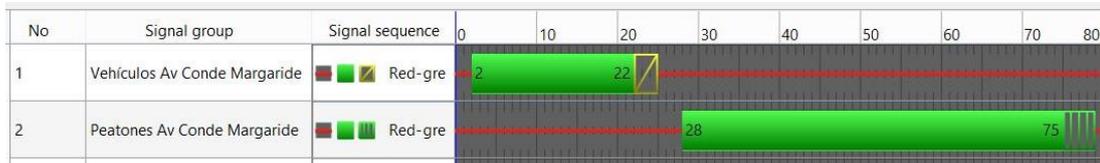


Figura 37 – Diagrama de fases de la Avenida Conde Margaride en el software PTV Vissim

- Semáforos de la avenida São Gonçalo Rotonda

En la Avenida São Gonçalo en la parte interior de la rotonda (sentido Norte – Sur) se encuentra un semáforo convencional para los vehículos (rojo, amarillo y verde) y un semáforo convencional para los peatones (rojo, verde y verde intermitente) con sonido en simultaneo con la luz verde para apoyo en el atravesamiento de peatones con discapacidades visuales.

En las siguientes Tablas (22 y 23) se pueden observar el resultado de las mediciones en campo de los tiempos de ciclo y de las diferentes fases.

Tabla 22 - Datos del semáforo de vehículos de la Avenida São Gonçalo Rotonda

Avenida São Gonçalo Rotonda	
Tipo de semáforo	Rojo, Amarillo y Verde
Usuario del semáforo	Vehículos
Tiempo del ciclo (Segundos)	80
Tiempo de Rojo (Segundos)	52
Tiempo de Amarillo (Segundos)	3
Tiempo de Verde (Segundos)	25

Tabla 23 - Datos del semáforo de peatones de la Avenida São Gonçalo Rotonda

Avenida São Gonçalo Rotonda	
Tipo de semáforo	Rojo, Verde y Verde intermitente
Usuario del semáforo	Peatones
Tiempo del ciclo (Segundos)	80
Tiempo de Rojo (Segundos)	33
Tiempo de Verde (Segundos)	44
Tiempo de Verde intermitente (Segundos)	3

Teniendo en cuenta los tiempos medidos en campo del ciclo semafórico de la Avenida São Gonçalo Rotonda se puede observar que el tiempo de limpieza corresponde a 3 segundos cuando el semáforo de los vehículos se encuentra en verde; y a 2 segundos cuando el semáforo de los peatones está en verde.

En la siguiente figura, se puede observar el diagrama de fases de los semáforos de la Avenida São Gonçalo Rotonda, donde están registrados los diferentes tiempos de cada fase, de modo que se pueda apreciar más fácilmente el funcionamiento del semáforo.

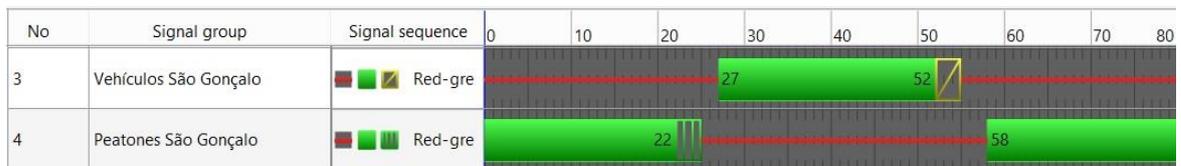


Figura 38 – Diagrama de fases de la Avenida São Gonçalo Rotonda en el software PTV Vissim

- Semáforos de la calle Gil Vicente

La calle Gil Vicente está regida por un semáforo convencional para los vehículos (rojo, amarillo y verde) y un semáforo convencional para los peatones (rojo, verde y verde intermitente) con sonido en simultaneo con la luz verde para apoyo en el atravesamiento de peatones con discapacidades visuales.

En las siguientes Tablas (24 y 25) se pueden observar el resultado de las mediciones en campo de los tiempos de ciclo y de las diferentes fases.

Tabla 24 - Datos del semáforo de vehículos de la calle Gil Vicente

Calle Gil Vicente	
Tipo de semáforo	Rojo, Amarillo y Verde
Usuario del semáforo	Vehículos
Tiempo del ciclo (Segundos)	80
Tiempo de Rojo (Segundos)	29
Tiempo de Amarillo (Segundos)	3
Tiempo de Verde (Segundos)	48

Tabla 25 - Datos del semáforo de peatones de la calle Gil Vicente

Calle Gil Vicente	
Tipo de semáforo	Rojo, Verde y Verde intermitente
Usuario del semáforo	Peatones
Tiempo del ciclo (Segundos)	80
Tiempo de Rojo (Segundos)	57
Tiempo de Verde (Segundos)	20
Tiempo de Verde intermitente (Segundos)	3

Teniendo en cuenta los tiempos medidos en campo del ciclo semafórico de la calle Gil Vicente se puede observar que el tiempo de limpieza corresponde a 3 segundos.

En la siguiente figura se puede observar el diagrama de fases de los semáforos de la calle Gil Vicente, donde están registrados los diferentes tiempos de cada fase, de modo que se pueda apreciar más fácilmente el funcionamiento del semáforo.

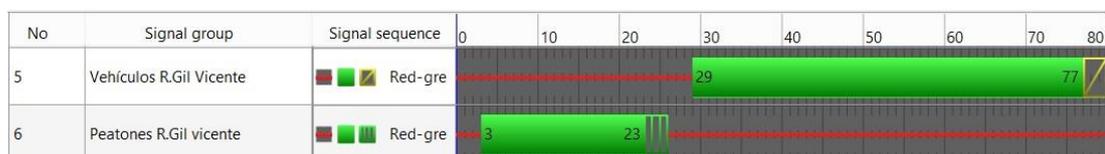


Figura 39 - Diagrama de fases de la calle Gil Vicente en el software PTV Vissim

- Semáforos de la calle Paio Galvão

En la calle Paio Galvão se encuentra un semáforo para los vehículos con colores de amarillo intermitente y verde; y un semáforo convencional para los peatones (rojo, verde y verde intermitente) con sonido en simultaneo con la luz verde para apoyo en el atravesamiento de peatones con discapacidades visuales.

En las siguientes Tablas (26 y 27) se pueden observar el resultado de las mediciones en campo de los tiempos de ciclo y de las diferentes fases.

Tabla 26 - Datos del semáforo de vehículos de la Calle Paio Galvão

Calle Paio Galvão	
Tipo de semáforo	Amarillo intermitente y Verde
Usuario del semáforo	Vehículos
Tiempo del ciclo (Segundos)	80
Tiempo de Amarillo intermitente (Segundos)	20
Tiempo de Verde (Segundos)	60

Tabla 27 - Datos del semáforo de peatones de la Calle Paio Galvão

Calle Paio Galvão	
Tipo de semáforo	Rojo, Verde y Verde intermitente
Usuario del semáforo	Peatones
Tiempo del ciclo (Segundos)	80
Tiempo de Rojo (Segundos)	60
Tiempo de Verde (Segundos)	17
Tiempo de Verde intermitente (Segundos)	3

Teniendo en cuenta los tiempos medidos en campo del ciclo semafórico de la calle Paio Galvão se puede observar que no existe tiempo de limpieza, es decir, en el momento en que el semáforo de los vehículos pasa de verde a amarillo intermitente, el semáforo de los peatones cambia de rojo a verde instantáneamente.

En la siguiente figura, se puede observar el diagrama de fases de los semáforos de la calle Paio Galvão, donde están registrados los diferentes tiempos de cada fase, de modo que se pueda apreciar más fácilmente el funcionamiento del semáforo.

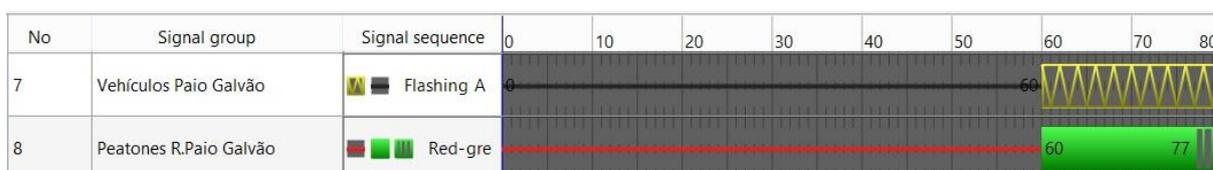


Figura 40 - Diagrama de fases de la calle Paio Galvão en el software PTV Vissim

- Semáforo de la rotonda sentido Sur - Norte

En la Rotonda en la parte del sentido Sur - Norte se encuentra un semáforo para los vehículos con colores de amarillo intermitente y verde; y un semáforo convencional para los peatones (rojo, verde y verde intermitente) con sonido en simultaneo con la luz verde para apoyo en el atravesamiento de peatones con discapacidades visuales.

En las siguientes Tablas (28 y 29) se pueden observar el resultado de las mediciones en campo de los tiempos de ciclo y de las diferentes fases.

Tabla 28 - Datos del semáforo de vehículos de la Rotonda sentido Sur – Norte

Rotonda Sentido Sur-Norte	
Tipo de semáforo	Amarillo intermitente y Verde
Usuario del semáforo	Vehículos
Tiempo del ciclo (Segundos)	80
Tiempo de Amarillo intermitente (Segundos)	27
Tiempo de Verde (Segundos)	53

Tabla 29 - Datos del semáforo de peatones de la Rotonda sentido Sur – Norte

Rotonda Sentido Sur-Norte	
Tipo de semáforo	Rojo, Verde y Verde intermitente
Usuario del semáforo	Peatones
Tiempo del ciclo (Segundos)	80
Tiempo de Rojo (Segundos)	53
Tiempo de Verde (Segundos)	24
Tiempo de Verde intermitente (Segundos)	3

Teniendo en cuenta los tiempos medidos en campo del ciclo semafórico en el sentido Sur – Norte de la rotonda se puede observar que no existe tiempo de limpieza, es decir, en el momento en que el semáforo de los vehículos pasa de verde a amarillo intermitente, el semáforo de los peatones cambia de rojo a verde instantáneamente.

En la siguiente figura, se puede observar el diagrama de fases de los semáforos en el sentido Sur – Norte de la rotonda, donde están registrados los diferentes tiempos de cada fase, de modo que se pueda apreciar más fácilmente el funcionamiento del semáforo.

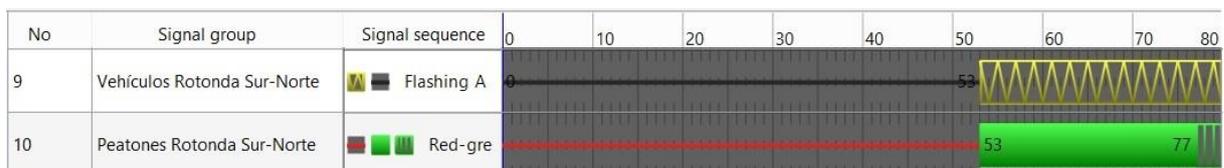


Figura 41 - Diagrama de fases de la Rotonda sentido Sur – Norte en el software PTV Vissim

De manera general, en la Figura 42 se puede observar el diagrama de fases de la intersección, donde se relacionan los diferentes semáforos de todas las calles, de modo que se pueda apreciar gráficamente su funcionamiento. El ciclo del grupo de semáforos corresponde a 80 segundos.

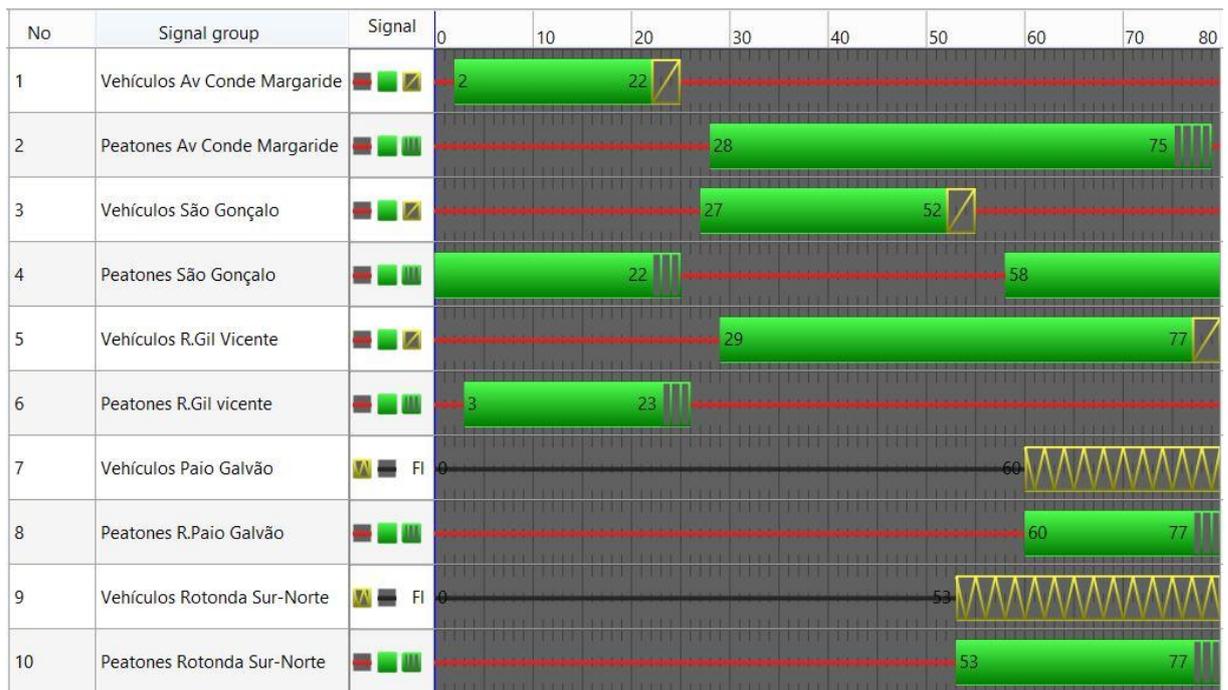


Figura 42 - Diagrama de fases de toda la intersección vial en el software PTV Vissim

4.2.6 Modelación del transporte público

Es de vital importancia tener en cuenta los recorridos de transporte público que circulan por la zona de estudio, debido a que, en las paradas de los buses, se generan atrasos en los demás vehículos. En la Avenida São Gonçalo existen bahías para que los buses puedan realizar las paradas de una forma más cómoda sin afectar de una manera significativa el flujo de los demás vehículos; en la calle Paio Galvão también existe una bahía, pero siempre está ocupada por estacionamiento ilegal en la hora que se está evaluando y haciendo la simulación del modelo (17:30-18:30), lo cual afecta el flujo normal del tránsito. Las otras dos paradas de buses (Alameda Doutor Alfredo Pimenta y Avenida Conde de Margaride) se encuentran ubicadas en los carriles de la derecha de la vía, afectando el flujo de los vehículos que tienen que esperar cuando los buses paran.

Existen numerosas rutas de transporte público que pasan por la intersección analizada, exactamente 15, lo que corresponde a un total de 37 buses circulando en la hora simulada. En la Tabla 30, se puede observar el número de buses de transporte público que ingresan a la intersección por cada una de las calles.

Tabla 30 – Número de buses de transporte público por cada acceso de la intersección vial en la hora de máxima demanda vehicular

ACCESO VEHICULAR	NÚMERO DE BUSES DE TRANSPORTE PÚBLICO
AVENIDA CONDE DE MARGARIDE	21
AVENIDA SÃO GONÇALO	0
CALLE GIL VICENTE	6
ALAMEDA DR. ALFREDO PIMENTA	10
TOTAL	37

Las rutas de los buses corresponden a las líneas 12,71,72,22,31,32,42,61,62,63,81,82,83,84 y la línea de la ciudad, y los horarios están disponibles vía web (TUG, 2017).

Para ingresar las rutas de transporte público en el modelo, es necesario crear de manera preliminar las paradas en sus respectivos puntos de la malla vial, teniendo en cuenta parámetros como: longitud de la parada, posición (en la calzada o en una bahía). En la Figura 43, se puede ver un ejemplo de los dos tipos de paradas creadas en el programa, representadas mediante los rectángulos rojos señalados.

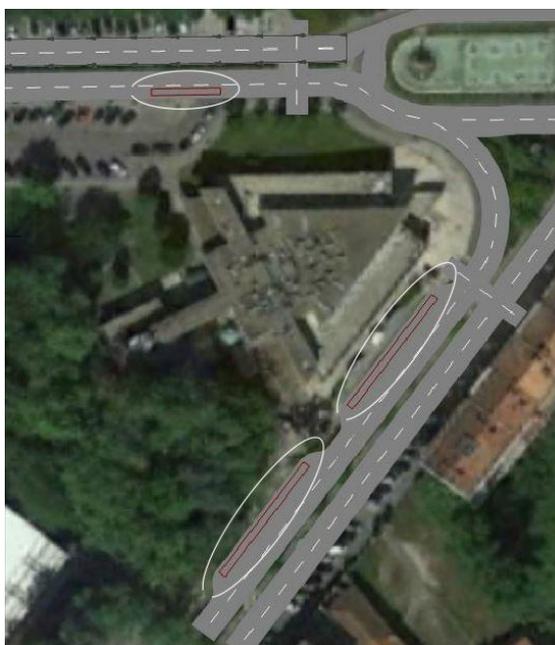


Figura 43 – Paradas de buses con bahía en la Avenida São Gonçalo y parada de bus en la calzada en la Avenida Alameda Doutor Alfredo Pimenta

De manera similar, se deben crear las rutas del transporte público teniendo en cuenta el recorrido del bus y las paradas donde tiene que recoger y dejar pasajeros. En la Figura 44, se muestra un ejemplo de la línea 12, donde se aprecia una parte del recorrido que recorre el bus, realizando paradas en la avenida Conde de Margaride y la calle Paio Galvão.



Figura 44 – Parte del recorrido del bus de la línea 13 con sus respectivas paradas

Para el tiempo de estancia de los buses en cada parada, fue escogido uno de los tres métodos ofrecidos por el software (los cuales fueron mencionados en la sección 2.6.2), que corresponde al tiempo de estancia según una distribución de tiempo, donde no se tiene en cuenta el número de peatones que entran y salen a los buses, es decir, se escoge una distribución de tiempo de demora con un promedio y una desviación estándar para cada parada.

Los tiempos de estancia de los buses, se midieron en la calle Paio Galvão, Avenida Conde de Margaride y Alameda Dr. Alfredo Pimenta durante la hora de simulación, los días 2 y 3 de mayo del 2017, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 31 – Mediciones de tiempos de parada de buses en la calle Paio Galvão, Avenida Conde de Margaride y Alameda Dr. Alfredo Pimenta

Número de medición	Calle Paio Galvão	Número de medición	Avenida Conde de Margaride	Número de medición	Alameda Dr. Alfredo Pimenta
	Tiempo en la parada (segundos)		Tiempo en la parada (segundos)		Tiempo en la parada (segundos)
1	38	1	33	1	20
2	45	2	39	2	23
3	35	3	40	3	19
4	41	4	29	4	32
5	38	5	28	5	31
6	49	6	34	6	41
7	39	7	36	7	26
8	41	8	40	8	21
9	33	9	21	9	19
10	36	10	17	10	18
11	43	11	43		
12	40	12	24		
13	36	13	23		
14	42	14	19		
15	46	15	36		
16	37	16	31		
17	36	17	28		
18	43	18	24		
19	41	19	40		
20	43	20	19		
21	36	21	28		
Promedio	39.9	Promedio	30.1		
Desviación estándar	4.1	Desviación estándar	8.0		
				Promedio	25.0
				Desviación estándar	7.5

Se realizaron las mediciones sólo en esas paradas de buses, debido a que están ubicadas en el carril de la derecha de las respectivas calles donde se encuentran ubicadas, y, por tanto, afectan en una mayor proporción los resultados en la simulación.

Para las otras dos paradas de buses de la Avenida São Gonçalo (sentido oriente – occidente), se utilizó la distribución de tiempo de la Calle Paio Galvão por ser la más crítica, es decir, la que más tiempo de demora representa. Cabe resaltar que en estas paradas no afecta de gran manera la distribución de tiempo escogida, debido a que los buses tienen una bahía propia para realizar la maniobra para dejar y recoger pasajeros.

Por último, en la modelación del transporte público, es necesario ingresar los horarios de los buses. Para esto, basta con ingresar al software la hora de inicio y fin de la ruta, y la frecuencia de las rutas de los buses.

4.2.7 Modelación de estacionamientos

En la intersección vial existen estacionamientos a lo largo de algunas vías, como fue descrito en la sección 4.1, Además, se observaron algunos conductores que estacionan su vehículo de manera ilegal durante un determinado tiempo.

El software permite crear estacionamientos en los carriles de las vías, pero esta variable no fue tomada en cuenta para el modelo, debido a que es un factor altamente variable, es decir, no se puede definir con exactitud en cuales zonas o lugares serán realizados dichos estacionamientos, lo que causa una incertidumbre a la hora de obtener los datos en campo.

Con respecto a los estacionamientos que se encuentran ubicados a lo largo de la calle Gil Vicente y la Avenida Conde de Margaride, se puede decir que, mediante observación en campo en la hora de mayor demanda vehicular, siempre estuvieron ocupados y había poca actividad de rotación de los vehículos, es decir, se mantenían los mismos carros en los estacionamientos, sin afectar de manera considerable el funcionamiento de la intersección. Por lo tanto, no se tuvo en cuenta para la micro simulación. Dichos estacionamientos, afectan en una mayor proporción la intersección en las horas de la mañana, al mediodía y en la noche (horas en las que se produce una mayor interacción de los estacionamientos por causas laborales y de ocio).

4.2.8 Elementos para generar resultados de la modelación

Los principales elementos que se deben crear para la generación de los resultados necesarios para la validación del modelo son los siguientes: contadores de filas de espera, nodos de evaluación y evaluadores de tiempos de viaje demora promedio de los vehículos.

- Contadores de filas de espera

La funcionalidad de los contadores de filas de espera en el software suministra los siguientes datos de salida:

- ✓ La longitud de fila promedio.
- ✓ La longitud de fila máxima.
- ✓ El número de detenciones del vehículo dentro de la cola.

Las filas de espera son medidas a partir de la ubicación del contador hacia el último vehículo que está en condición de fila de espera en la carretera. Si la fila llega a múltiples accesos diferentes, el contador registrará la información para todos ellos y reportará la más larga como la máxima longitud de fila.

El resultado de la longitud de fila de espera es en unidades de longitud (metros), no en el número de vehículos.

Para la simulación fueron colocados contadores de filas de espera en los semáforos de la Avenida Conde de Margaride, la calle Gil Vicente, y en la rotonda sentido Norte – Sur, con el fin de realizar una comparación de los resultados obtenidos con la simulación y los datos medidos en campo a la hora de realizar la validación del modelo. Fueron definidos intervalos de tiempo para las mediciones de la longitud de cola de 80 segundos, que corresponde al tiempo del ciclo semafórico, esto con el fin de registrar la longitud máxima en cada ciclo semafórico, para posteriormente calcular el promedio, y poder realizar la validación del modelo, comparando con los datos medidos en campo.

- Nodos de evaluación

Los nodos de evaluación permiten identificar cuántos vehículos circulan por aquella zona, los tiempos de demora promedio de los vehículos, las longitudes promedio y máxima de las filas de espera, entre otros.

Para la simulación fueron ubicados en las zonas donde se encuentran los semáforos vehiculares y peatonales; con el fin de verificar los resultados obtenidos con los contadores de la fila de espera, obtener el número de vehículos para realizar posteriormente la validación de los flujos vehiculares y la demora promedio de los automotores para realizar los movimientos en cada semáforo.

- Evaluadores de tiempos de viaje y demora promedio de los vehículos

Los evaluadores de tiempos de viaje de vehículos permiten definir una longitud en la vía para obtener el promedio de tiempo de viaje que demoran los automotores en pasar por aquella distancia y el número de vehículos que fueron evaluados.

En el modelo fueron ubicados dos evaluadores, uno colocado desde el inicio de la parada de bus de la Calle Alameda Dr. Alfredo Pimenta hasta un punto definido en una de las fuentes de la rotonda (distancia aproximada de 89 metros), y otro colocado en una distancia definida entre un punto definido cerca del colegio escuela secundaria Francisco de Holanda (sentido Sur – Norte) hasta una línea de estacionamiento (distancia aproximada de 11 metros). Fueron colocados estos dos contadores, ya que abarcan los dos sentidos de la rotonda. Los resultados de los tiempos de viaje de los vehículos serán utilizados posteriormente en el proceso de validación del modelo. En la Figura 45, se muestran la ubicación de los evaluadores en el modelo (señalados en la imagen), dónde las líneas azules y rojas, indican el inicio y fin de la distancia, respectivamente, en la cual se mide el tiempo de viaje promedio.



Figura 45 – Ubicación de las distancias para calcular el tiempo de viaje promedio de los vehículos

Con el fin de analizar la demora promedio de los vehículos, también fueron creados contadores de tiempos de viaje en cada uno de los accesos de la intersección. Es decir, fue colocado, por ejemplo, un contador desde metros antes de donde se forma la fila de espera en la avenida Conde de Margaride, hasta una corta distancia después de su respectivo semáforo. En la Figura 46, se muestra el contador ubicado para el ejemplo mencionado de la avenida Conde de Margaride, donde la línea azul y roja (encerradas en los óvalos blancos), representan el inicio y fin de la distancia, respectivamente.



Figura 46 – Contadores de tiempo de viaje ubicados desde la avenida Conde de Margaride

Los contadores fueron ubicados de dicha forma, debido a que teóricamente, el atraso de los vehículos se da desde el momento en que ingresan a la fila de espera, hasta el momento que pueden ultrapasar el semáforo.

El software calcula la demora promedio de los vehículos restando el tiempo ideal de viaje (sin obstáculos) al tiempo real. El tiempo ideal corresponde, a la cantidad de segundos que se demorarían los vehículos si no existiesen obstáculos que lo hagan detener (semáforos, otros vehículos).

4.2.9 Parámetros adicionales de simulación

Es de vital importancia definir un intervalo de tiempo en el que el programa va a realizar la simulación, y en el que los elementos evaluadores (contadores de filas de espera, nodos de evaluación y evaluadores de tiempos de viaje) van a registrar los datos.

En el momento en el que se inicia la simulación, no existe ningún vehículo en la red, por tal motivo, es necesario dejar un “tiempo de calentamiento”, para que los vehículos vayan ingresando a la intersección y se establezca un equilibrio en la simulación.

Según la investigación realizada en (Dowling, et al., 2004), para el tiempo de calentamiento se debe considerar que el valor mínimo debería ser al menos el doble del tiempo en que un vehículo recorre el sistema de la intersección en flujo libre, es decir, sin congestionamientos. Para la simulación se escogió un tiempo de calentamiento de 3 minutos (180 segundos), lo cual es un tiempo suficiente para generar el equilibrio en la intersección.

Teniendo en cuenta que el tiempo de simulación es de una hora, el intervalo de tiempo para que los elementos evaluadores registren los datos fue asignado desde el segundo 180 hasta 3780.

En la siguiente Figura, se puede observar una imagen del modelo creado en PTV Vissim

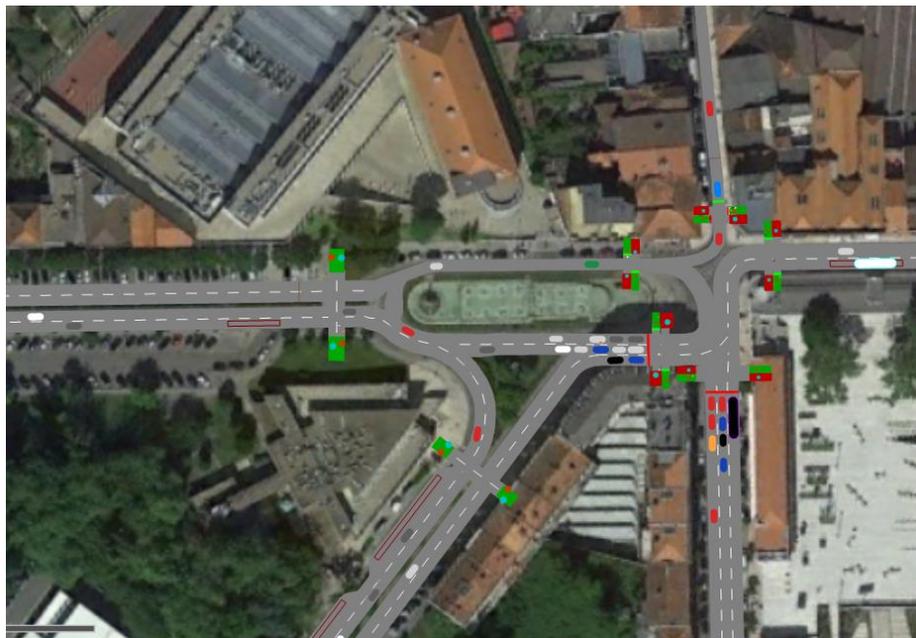


Figura 47 – Modelo creado en PTV Vissim

4.3 Calibración del modelo

Teniendo en cuenta la metodología planteada en la sección 3.3.1 y los principales parámetros del comportamiento del conductor que afectan considerablemente los resultados y pueden ser modificados en el software, presentes en la sección 2.6.1, se definieron las siguientes dos

categorías de parámetros. Los parámetros fueron definidos en base a las investigaciones obtenidas en la tesis de maestría en ingeniería civil (Suarez, 2007), y observando la variación en los resultados de las simulaciones realizadas del modelo de micro simulación creado.

4.3.1 Parámetros fijos

Los siguientes parámetros fueron dejados fijos para realizar la calibración, debido a que, por observación en campo, fueron considerados como valores acertados y cercanos al comportamiento de los conductores en la intersección.

- Comportamiento de acercamiento suave: Este parámetro fue activado, para que los vehículos reduzcan la velocidad cuando se aproximan a obstáculos en reposo, esto hace que el modelo sea más parecido a la realidad.
- Distancia de visión frontal: Fue escogida una distancia mínima de visión frontal, recomendada para zonas urbanas igual a 20 metros. Esto quiere decir que los conductores van a estar más pendientes de lo que se encuentra desde 0 a 20 metros de su distancia hacia adelante y hacia los lados.
- Número de vehículos observados: Fue usado un valor de 4 vehículos, valor recomendado para zonas urbanas, para que los vehículos puedan predecir los movimientos de 4 vehículos que están a su alrededor.
- Desaceleración de los vehículos que transitan por el carril deseado y de los vehículos que quieren cambiar de carril: Este parámetro no influye en gran proporción en los resultados de la simulación en las zonas urbanas, debido a que no ocurren cambios de carril a altas velocidades. Se decidió utilizar los valores por defecto del software con calibración alemana, ya que, se necesitan equipos de medición muy especializados para medir las desaceleraciones posibles en el terreno.
- Tiempo de espera antes de la eliminación: Este parámetro se dejó con el valor por defecto (60 segundos). En ninguna simulación realizada se eliminaron vehículos por haber esperado más de este tiempo para cambiar de carril.
- Separación mínima (frontal o trasera): Este parámetro fue usado con el valor por defecto de 0,5 metros, lo cual, según las observaciones realizadas en campo, corresponden a un valor acertado.

- Factor de reducción de la distancia de seguridad: Este valor fue usado con los valores por defecto, igual a 0,6.
- Posición de los vehículos en el carril: Se seleccionó la opción de que los carros se desplacen de forma involuntaria en el centro del carril, lo que se asemeja en la mayoría de las calles en Portugal.
- Distancia lateral con vehículos del siguiente carril: Esta opción debe activarse, para que los vehículos se desplacen con mayor precaución y tengan en cuenta la distancia lateral con los demás automotores.
- Fila de espera en forma de diamante: Se activó esta opción, con el fin de que las filas de espera se midan de una forma más realista.
- Velocidad longitudinal mínima: Se usó el valor por defecto de 3,6 km/h, asegurando que los vehículos puedan desplazarse lateralmente con una baja velocidad cuando se están deteniendo.
- Distancia mínima lateral: En este parámetro se utilizó el valor por defecto del software de 0,2 metros, lo que asegura que debe existir mínimo 20 centímetros de distancia para realizar adelantamientos cuando el otro vehículo se encuentra detenido. Este valor es acertado con lo que ocurre en la intersección.
- Comportamiento del conductor cuando la luz del semáforo se encuentra cambiando de rojo a amarillo: Se escogió la opción para que los conductores no puedan avanzar, debido a que los semáforos presentes en la intersección no cuentan con una fase de amarillo después de la fase de rojo.
- Velocidades de vehículos y peatones: Son parámetros que afectan considerablemente los resultados de la simulación. Para las velocidades de los vehículos fueron creadas las correspondientes curvas de frecuencias acumuladas de velocidad para cada vehículo y para las velocidades de los peatones, se utilizó un promedio de 1,2 m/s.

4.3.2 Parámetros a modificar

Fueron escogidos únicamente dos parámetros para modificar, de manera que fuera más fácil llegar al punto de validar el modelo. Debido a que una de las variables para validar es la longitud de las filas de espera, fue más conveniente seleccionar los parámetros que pertenecen al grupo de las variables de seguimiento de vehículos, ya que afectan de una mayor manera la longitud de las filas de espera en el modelo.

Los dos parámetros seleccionados fueron los siguientes:

- Distancia promedio en detención: Este parámetro afecta de manera considerable los resultados obtenidos en la fila de espera. Para la calibración se hicieron simulaciones con valores de 0,5; 0,7 y 1 metro.
- Distancia en detención para obstáculos estáticos: De igual manera, este valor también influye en los resultados obtenidos para la fila de espera. Se realizaron simulaciones variando los datos entre 0,5 y 1 metro.

4.4 Validación del modelo

En total fueron realizados 9 modelos, variando la distancia promedio en detención y la distancia en detención para obstáculos estáticos. Hay que tener en cuenta que, para cada modelo, fue necesario realizar 10 simulaciones, y utilizar los resultados promedio, ya que pueden existir cambios en los resultados entre cada simulación.

4.4.1 Longitudes de las filas de espera

Las mediciones de las longitudes de las filas de espera fueron realizadas en los tres semáforos vehiculares que tiene la intersección en estudio, en la hora en la cual se realizó el modelo, los días miércoles y jueves (26 y 27 de abril del 2017).

En las mediciones se encontraron carros de tipo Sedán, Hatchback, furgonetas, eléctricos de dos personas, motos y buses. Para estimar la longitud de la fila de espera en metros, se utilizaron las larguras dependiendo del tipo de carros (Tabla 32) y una separación promedio entre vehículos de 1 metro.

Tabla 32 - Longitud de los tipos de vehículos (Coches, 2017)

Tipo de Vehículo	Longitud (metros)
SEDÁN	4.4
BUS	14
MOTO	2
ELÉCTRICO PARA DOS PERSONAS	2.7
HATCHBACK	3.5
FURGONETA	5

Vale la pena resaltar, que este método puede presentar errores considerables, debido a los valores escogidos para las longitudes de los vehículos y la separación de los mismos.

Las mediciones de la fila de espera se encuentran en el ANEXO 3.

En primer lugar, se presenta en la Tabla 33 los resultados resumidos de los conteos de las filas de espera en las calles que tienen semáforos.

Tabla 33 – Resultados de los conteos de las filas de espera en las calles con semáforo

CALLE GIL VICENTE	AVENIDA CONDE DE MARGARIDE	AVENIDA SÃO GONÇALO
Fila de espera (metros)	Fila de espera (metros)	Fila de espera (metros)
20.7	42.3	33.6
27.3	37.8	42.9
31.8	28.8	30.6
28.8	25.3	40.3
24.3	22.5	33.3
34.8	39	34.5
25.8	44.4	33
23.6	29.4	33.3
20.7	37.8	38.7
20.7	34.2	36.6
14.5	23.4	33.3
31.5	22.5	28.8
26.4	21	28.2
26.1	18	28.5
15.3	33.3	38.7
31.2	29.7	38.7
0	14.4	57.7
30.3	24.3	37.8
15.3	59.1	34.2
27	35.7	38.4
21.3	33.3	34.2
23.4	37.8	45.3
12	38.7	25.2
19.5	35.1	32.4
15.3	48	32.4
35.1	24	29.7
4.5	20.7	24.3
21.6	22.8	29.7
16.2	9.9	52.5
0	44.7	26.1
21.7	57.3	37.5
0	45.9	26.1
4.5	33.3	39.3
18.9	56.4	39.4
13.5	39.6	31.2
0	37.8	29.7
16.5	46.2	24.3
19.5	37.8	29.7
10.5	46.2	29.7
9.9	29.7	29.4
14.4	49.8	38.7
23.5	42.3	40.5
24.3	43.2	28.5
0	26.4	25.2

En la siguiente tabla, se muestran la fila de espera máxima y promedio medidas en campo para cada calle.

Tabla 34 – Filas de espera máxima y promedio medidas en campo para cada calle con semáforo

	CALLE GIL VICENTE	AVENIDA CONDE DE MARGARIDE	AVENIDA SÃO GONÇALO
Fila de espera máxima (metros)	35.1	59.1	57.7
Fila de espera promedio (metros)	18.69	34.77	34.14

Se realizaron 10 simulaciones para cada modelo, obteniendo los resultados de las longitudes de las filas de espera y realizando la debida comparación con los datos obtenidos en campo. Se presenta una tabla con los resultados y las comparaciones.

Tabla 35 – Tabla de validación para las filas de espera máxima y promedio

PARÁMETROS QUE VARIAN EN CADA SIMULACIÓN		Avenida Conde de Margaride		Calle Gil Vicente		Avenida São Gonçalo		Errores relativos Avenida Conde de Margaride		Errores relativos Calle Gil Vicente		Errores relativos Avenida São Gonçalo	
Distancia promedio en detención (metros)	Distancia en detención para obstáculos estáticos (metros)	Fila de espera máxima (metros)	Fila de espera promedio (metros)	Fila de espera máxima (metros)	Fila de espera promedio (metros)	Fila de espera máxima (metros)	Fila de espera promedio (metros)	%Error Fila máxima	%Error Fila promedio	%Error Fila máxima	%Error Fila promedio	%Error Fila máxima	%Error Fila promedio
0.5	0.5	44.96	14.36	21.98	11.29	49.18	24.69	23.93%	58.70%	37.38%	39.58%	14.77%	27.68%
0.5	0.7	46.12	15.45	23.15	12.96	51.14	25.36	21.96%	55.56%	34.05%	30.64%	11.37%	25.71%
0.5	1	47.21	16.23	24.36	13.26	56.32	27.62	20.12%	53.32%	30.60%	29.04%	2.39%	19.09%
0.7	0.5	49.36	17.12	26.98	15.12	59.57	29.63	16.48%	50.76%	23.13%	19.09%	3.24%	13.21%
0.7	0.7	50.69	18.14	27.36	16.08	64.51	30.52	14.23%	47.83%	22.05%	13.95%	11.80%	10.60%
0.7	1	51.23	18.96	29.36	16.95	69.12	31.26	13.32%	45.47%	16.35%	9.29%	19.79%	8.43%
1	0.5	54.69	33.56	31.26	18.14	54.69	34.96	7.46%	3.47%	10.94%	2.92%	5.22%	2.41%
1	0.7	56.21	35.11	33.93	19.36	58.91	36.21	4.89%	0.96%	3.33%	3.60%	2.10%	6.07%
1	1	58.69	38.69	37.96	23.21	62.59	39.56	0.69%	11.28%	8.15%	24.21%	8.47%	15.88%

El modelo que mejor representa la realidad de lo que ocurre en la intersección (resaltado en la Tabla 35 en color marrón), es el modelo que utiliza una distancia promedio de detención de 1 metro y una distancia en detención para obstáculos estáticos de 0,7 metros, ya que los errores relativos son menores al 10%.

De acuerdo con la Tabla 35 y los resultados obtenidos mediante la simulación, se observa un patrón evidente, donde al aumentar los valores de la distancia promedio en detención y la distancia en detención para obstáculos estáticos, van aumentando gradualmente las longitudes de las filas de espera simuladas.

A continuación, se debe realizar la determinada validación del modelo anteriormente mencionado, teniendo en cuenta también los flujos vehiculares y los tiempos de viaje de los vehículos.

4.4.2 Flujos vehiculares

Para la validación con los flujos vehiculares se presenta la siguiente tabla resumen, comparando los resultados obtenidos con las mediciones de campo y los obtenidos mediante la micro simulación.

Tabla 36 – Validación del modelo teniendo en cuenta los flujos vehiculares

Acceso	Flujo vehicular medido en campo (veh/h)	Flujo vehicular simulado (Veh/h)	GEH
Av. Conde Margaride giro hacia la izquierda	271	266	0.31
Conde Margaride giro hacia la derecha	267	276	0.55
Rotonda Sentido Norte - Sur	530	527	0.13
Calle Paio Galvão	653	667	0.54
Calle Gil Vicente	309	307	0.11
Rotonda Sentido Sur-Norte	724	713	0.41
Av. São Gonçalo dirección hacia el Oeste	363	352	0.58
Av. São Gonçalo dirección hacia el Este	126	121	0.45
Alameda Dr Alfredo Pimenta hacia el Sur	453	455	0.09
Alameda Dr Alfredo Pimenta hacia el Norte	410	398	0.60
Intersección en general	1426	1424	0.05
		GEH <5	100.00%
		GEH PROMEDIO	0.347881

De acuerdo con la tabla, se puede observar que todos los flujos vehiculares fueron modelados correctamente, cumpliendo con que más del 85% de los valores de GEH sean menores a 5.

4.4.3 Tiempos de viaje de los vehículos

Para la medición de los tiempos de viaje se definió una distancia aproximada de 89 metros (medida en Google Earth) desde la parada de bus de la Avenida Alameda Dr. Alfredo Pimenta, hasta un punto definido en una de las fuentes de la rotonda. Fueron tomados un total de 50 tiempos vehiculares, el día martes 18 de abril del 2017 desde las 14h hasta las 17h.

En la siguiente tabla se muestran los datos de las mediciones de los tiempos de viaje de los vehículos en las distancias mencionadas en las secciones 4.2.3.2 y 4.2.8.

Tabla 37 – Datos y promedios de los tiempos de viaje medidos en campo de los vehículos

Tiempos de viaje Parada de bus de la Avenida Alameda Dr. Alfredo Pimenta hasta un punto definido en una de las fuentes de la rotonda (segundos)	Tiempos de viaje desde un punto demarcado en la rotonda Sentido Sur - Norte hasta una línea demarcada de los estacionamientos (segundos)	
19.23	1.70	
18.83	1.45	
17.36	1.64	
20.13	1.33	
19.21	1.70	
18.26	1.25	
18.47	1.47	
19.23	1.47	
21.36	1.61	
22.69	1.51	
17.25	1.28	
16.49	1.56	
23.14	1.58	
21.56	1.59	
20.47	1.53	
16.59	1.53	
15.32	1.68	
26.12	1.63	
18.23	1.48	
17.45	1.37	
20.01	1.32	
21.36	1.58	
17.69	1.59	
18.79	1.68	
19.36	1.53	
20.34	1.59	
21.47	1.33	
22.36	1.44	
19.32	1.49	
18.65	1.36	
22.17	1.54	
21.36	1.56	
18.36	1.28	
20.36	1.56	
19.64	1.68	
18.36	1.43	
17.23	1.49	
22.14	1.39	
19.3	1.55	
18.54	1.58	
20.36	1.58	
21.47	1.26	
22.36	1.39	
16.49	1.32	
23.14	1.49	
21.56	1.51	
20.47	1.58	
16.59	1.64	
15.32	1.69	
19.23	1.58	
PROMEDIO	19.6238	1.5051

A continuación, se realiza la debida comparación con los resultados obtenidos de la simulación.

Tabla 38 – Validación del modelo teniendo en cuenta los tiempos de viaje de los vehículos

	Tiempos de viaje promedio desde la Parada de bus de la Avenida Alameda Dr. Alfredo Pimenta hasta un punto definido en una de las fuentes de la rotonda (segundos)	Tiempos de viaje promedio desde un punto demarcado en la rotonda Sentido Sur - Norte hasta una línea demarcada de los estacionamientos (segundos)
Medidos en campo	19.62	1.51
Simulados	18.69	1.54
% Error relativo	4.76%	2.32%

Se puede ver en la tabla anterior, que los errores relativos son menores al 10 %.

Con todas las validaciones realizadas adecuadamente, se puede concluir que el modelo ha sido calibrado y validado satisfactoriamente.

4.5 Análisis de los resultados del modelo de micro simulación

Los resultados más relevantes del modelo son las filas de espera que se producen y la demora promedio de los vehículos al realizar los movimientos en los semáforos.

4.5.1 Filas de espera en los semáforos

En la siguiente Tabla, se encuentran resumidos los datos de las filas de espera (en metros) de cada semáforo y su respectiva equivalencia con un número aproximado de vehículos ligeros, con una separación entre ellos de 1 metro.

Tabla 39 – Resultados de las filas de espera en los accesos con semáforos

	Fila de espera máxima (metros)	Fila de espera promedio (metros)	Equivalencia en vehículos ligeros de la fila máxima	Equivalencia en vehículos ligeros de la fila promedio
Avenida Conde de Margaride	56.21	35.11	11	7
Calle Gil Vicente	33.93	19.36	7	4
Rotonda sentido Norte - Sur	58.91	36.21	11	7

Los accesos en donde más se generan filas de espera son en la Avenida Conde de Margaride y en la rotonda sentido Norte – Sur.

En el caso de la Avenida Conde de Margaride, las filas de espera máximas se generan especialmente en el carril de la izquierda, debido al alto flujo vehicular que quieren ingresar a

la rotonda. En algunos casos también se genera de manera similar en los 3 carriles. En las siguientes figuras 48,49 y 50 se puede observar estas situaciones.



Figura 48 – Fila de espera en la avenida Conde de Margaride

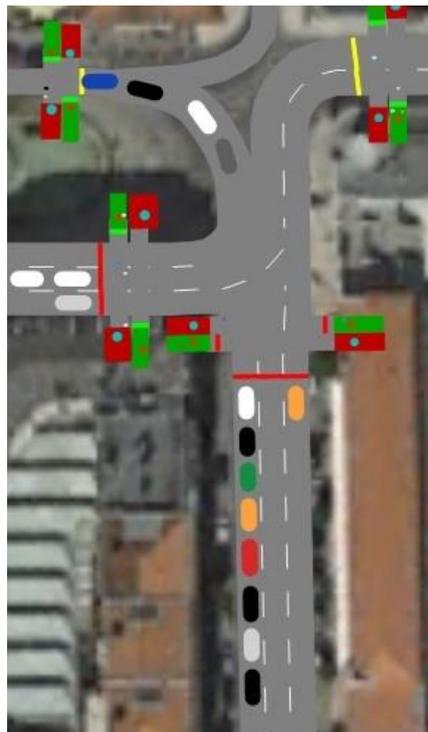


Figura 49 - Ejemplo 1 de Fila de espera en la avenida Conde de Margaride en el software PTV Vissim

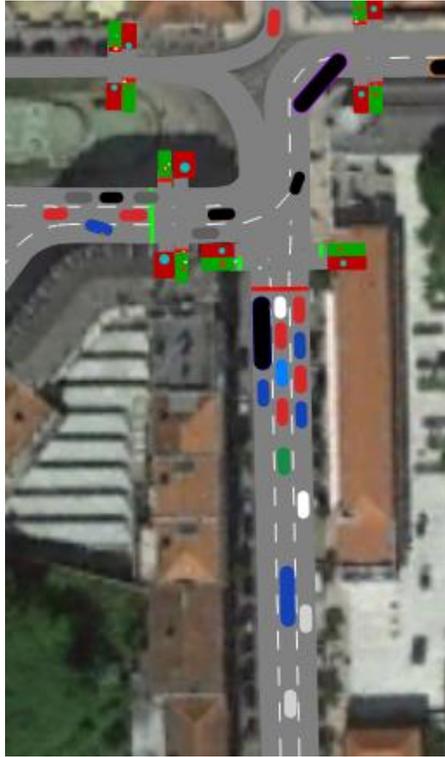


Figura 50 – Ejemplo 2 de Fila de espera en la avenida Conde de Margaride en el software PTV Vissim

En el caso de la Rotonda sentido Norte – Sur, las filas de espera se generan generalmente por igual en los 3 carriles, aunque en algunos casos se genera de manera variada.



Figura 51 – Fila de espera en la rotonda sentido Norte – Sur

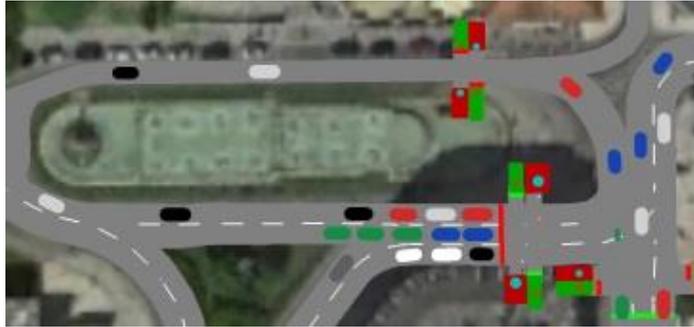


Figura 52 – Fila de espera en la rotonda sentido Norte – Sur en el software PTV Vissim

En la calle Gil Vicente se acumulan menos vehículos que en los otros dos accesos debido a que cuenta con un mayor tiempo de fase verde.



Figura 53 – Fila de espera en la calle Gil Vicente



Figura 54 – Fila de espera en la calle Gil Vicente en el software PTV Vissim

4.5.2 Demora promedio de los vehículos

La demora promedio de los vehículos es una variable muy importante en las intersecciones urbanas, ya que con ésta se puede clasificar el nivel de servicio según el manual de carreteras HCM (TRB, 2010). En la siguiente tabla se observan los rangos de clasificación del nivel de servicio.

Tabla 40 – Clasificación del nivel de servicio según HCM (TRB, 2010)

NIVEL DE SERVICIO	ATRASO MEDIO POR VEHÍCULO (SEGUNDOS)	
	INTERSECCIONES SEÑALIZADAS	DESCRIPCIÓN
A	≤ 10	Flujo Libre
B	10 - 20	Flujo Estable (pequeños retrasos)
C	20 - 35	Flujo estable (retrasos aceptables)
D	35 - 55	Cerca de flujo inestable (retardo tolerable)
E	55 - 80	Flujo inestable (retraso intolerable)
F	> 80	Flujo forzado (atascado)

Teniendo en cuenta los resultados de la simulación, se clasifican los accesos de la siguiente manera.

Tabla 41 – Tiempos promedio de demora en los accesos de la intersección

	Tiempo promedio de demora de los vehículos (segundos) con semáforos actuales	Nivel de Servicio según HCM
Avenida Conde de Margaride	31.36	Nivel C
Rotonda Sentido Norte - Sur	28.40	Nivel C
Calle Gil Vicente	7.94	Nivel A

La mayoría de los accesos son nivel C, lo que quiere decir que el flujo en términos generales es estable, y se puede mantener una movilidad eficiente. La calle Gil Vicente presenta un nivel A, lo que quiere decir que presenta una mejor distribución de los automóviles a través del tiempo (generando menos congestionamiento) y brindando una buena movilidad.

En términos generales, la intersección presenta unos niveles de movilidad cómodos para el usuario. Aunque en algunos tramos puedan generarse congestionamientos esporádicos, debido a algunos factores como: llegada continua de vehículos en un determinado tiempo, presencia

de los vehículos en las zonas de conflicto (cuando quedan atravesados en las intersecciones), y estacionamiento ilegal.

4.6 Identificación de problemas en la intersección

Teniendo en cuenta la observación detallada en campo, se identificaron los siguientes aspectos que interfieren en el funcionamiento operacional de la intersección vial: Estacionamiento ilegal en la intersección en general, paradas de buses de transporte público, estacionamientos dentro de la rotonda en el sentido Sur – Norte y la presencia de los vehículos en los puntos de conflicto.

- Estacionamiento ilegal en la intersección en general

Con una frecuencia baja, los conductores se estacionan en sitios prohibidos por intervalos de tiempos cortos, esto puede afectar el funcionamiento de la intersección vial.

- Paradas de buses de transporte público

En la intersección, la parada de bus que más afecta la intersección vial es la ubicada en la calle Paio Galvão. Aunque esta parada cuenta con una bahía, los conductores estacionan los vehículos de manera ilegal, causando que los buses tengan que detenerse en el carril derecho, sin poder utilizar adecuadamente la bahía.

- Estacionamientos dentro de la rotonda sentido Sur – Norte

Al frente de la escuela secundaria, existen estacionamientos permitidos que no tienen gran impacto en la intersección vial; el problema ocurre cuando existe estacionamiento ilegal cerca de la esquina de la calle Gil Vicente, y, por lo tanto, se reduce el espacio para realizar la maniobra para girar a la derecha de los vehículos que se dirigen desde dicha calle hacia la rotonda. Esto afecta especialmente a los vehículos pesados y buses, ya que no cuentan con suficiente espacio para realizar la maniobra de una manera más rápida y segura.

- Presencia de los vehículos en los puntos de conflicto

En algunas ocasiones, los vehículos pasan el semáforo cuando se encuentra en fase verde, pero más adelante hay congestión y quedan atravesados en la mitad de la intersección. Esto

causa problemas cuando el semáforo de la otra calle cambia a verde, y no pueden avanzar debido a la presencia de los vehículos de la otra corriente de tránsito.

4.7 Soluciones y análisis de escenarios alternativos

- Estacionamiento ilegal.

Para los problemas mencionados anteriormente en lo referido al estacionamiento ilegal, la solución inmediata es generar una consciencia vial para que los conductores no estacionen en las zonas prohibidas o destinadas para paradas de buses, y realizar una mayor fiscalización policial en la intersección, imponiendo multas mientras la gente se adapta y deja de hacerlo.

- Modificación geométrica de la intersección.

En (Costa & Macedo, 2008), se muestra una metodología simplificada para definir el número de carriles que deben ser dispuestos para cada movimiento direccional, establecidos en los siguientes rangos.

Tabla 42 – Rangos para definir el número de carriles para giros a la izquierda (Costa & Macedo, 2008)

Rango	Disposición de los carriles
$\frac{q_e}{q_v} < 0.8$	Carril compartido para los movimientos de ida en frente y a la izquierda
$0.8 < \frac{q_e}{q_v} < 1.2$	Carril exclusivo para los movimientos a la izquierda
$1.2 < \frac{q_e}{q_v} < 1.8$	Carril exclusivo para los movimientos a la izquierda + Carril compartido para los movimientos de ida en frente y a la izquierda
$1.8 < \frac{q_e}{q_v} < 2.2$	Dos carriles exclusivos para los movimientos a la izquierda

Donde q_e es el volumen vehicular que realiza el giro a la izquierda y q_v es el volumen vehicular por carril que resulta de la división del volumen total en la calle entre el número de vías.

En la siguiente Tabla se muestran los datos de los accesos que tienen movimientos de giro a la izquierda y sus respectivos cálculos.

Tabla 43 - Datos de accesos con movimientos de giro a la izquierda

	q_e	Volumen total (Veh/h)	Número de carriles	q_v	$\frac{q_e}{q_v}$
Avenida Conde de Margaride	271	538	3	180	1.51
Rotonda sentido Norte - Sur	144	530	3	177	0.81

Observando los datos calculados, se puede decir que la Avenida Conde de Margaride necesitaría un carril exclusivo para los giros a la izquierda y un carril compartido entre giros a la izquierda y movimiento en frente, sin embargo, si se realiza este cambio en la intersección, se van a generar problemas más adelante, debido a que sólo está disponible un carril para ingresar a la rotonda y en frente de la escuela. Podrían retirarse los estacionamientos existentes al frente de la escuela para obtener 2 carriles en circulación, pero esto podría incidir a que los conductores aumenten la velocidad en dicha zona y se generen problemas de seguridad en las horas de entrada y salida de los estudiantes. Además, si se retiran los estacionamientos, más adelante habría problemas para los conductores que transiten por el carril de la derecha y quieran seguir el curso de la rotonda. Por estos motivos, es mejor no afectar la geometría de la intersección.

En el caso de la rotonda en sentido Norte – Sur, según los resultados obtenidos en la Tabla 43 se necesita un carril exclusivo para los movimientos de giro a la izquierda, lo cual ya está implementado correctamente en la intersección vial.

- Presencia de los vehículos en las intersecciones.

Es necesario generar una consciencia vial en los conductores, para que cuando observen que en una distancia más adelante del semáforo existe congestionamiento, no atraviese el semáforo (aunque esté en verde) y espere hasta la siguiente fase de verde cuando ya se encuentre despejada el área de conflicto.

- Modificación de los ciclos semafóricos.

Utilizando el modelo calibrado y validado, es posible analizar el comportamiento de la intersección vial al modificar los ciclos semafóricos. Esto puede ayudar a mejorar el funcionamiento, disminuyendo las filas de espera y el promedio de demora de los vehículos. Por tanto, se analizaron una serie de cambios en los semáforos, verificando los resultados obtenidos, para escoger la mejor opción.

La solución escogida representó modificar el orden de los semáforos y disminuir el tiempo de verde de la calle Gil Vicente, de esta manera, se presentan los resultados de los tiempos de las fases para cada uno de los semáforos.

Tabla 44 – Tiempo propuesto de las fases de los semáforos (vehicular y peatonal) de la Avenida Conde de Margaride

Avenida Conde de Margaride		Avenida Conde de Margaride	
Tipo de semáforo	Rojo, Amarillo y Verde	Tipo de semáforo	Rojo, Verde y Verde intermitente
Usuario del semáforo	Vehículos	Usuario del semáforo	Peatones
Tiempo del ciclo (Segundos)	80	Tiempo del ciclo (Segundos)	80
Tiempo de Rojo (Segundos)	52	Tiempo de Rojo (Segundos)	34
Tiempo de Amarillo (Segundos)	3	Tiempo de Verde (Segundos)	42
Tiempo de Verde (Segundos)	25	Tiempo de Verde intermitente (Segundos)	4

Tabla 45 - Tiempo propuesto de las fases de los semáforos (vehicular y peatonal) de la Avenida São Gonçalo

Avenida São Gonçalo Rotonda		Avenida São Gonçalo Rotonda	
Tipo de semáforo	Rojo, Amarillo y Verde	Tipo de semáforo	Rojo, Verde y Verde intermitente
Usuario del semáforo	Vehículos	Usuario del semáforo	Peatones
Tiempo del ciclo (Segundos)	80	Tiempo del ciclo (Segundos)	80
Tiempo de Rojo (Segundos)	55	Tiempo de Rojo (Segundos)	31
Tiempo de Amarillo (Segundos)	3	Tiempo de Verde (Segundos)	46
Tiempo de Verde (Segundos)	22	Tiempo de Verde intermitente (Segundos)	3

Tabla 46 - Tiempo propuesto de las fases de los semáforos (vehicular y peatonal) de la calle Gil Vicente

Calle Gil Vicente		Calle Gil Vicente	
Tipo de semáforo	Rojo, Amarillo y Verde	Tipo de semáforo	Rojo, Verde y Verde intermitente
Usuario del semáforo	Vehículos	Usuario del semáforo	Peatones
Tiempo del ciclo (Segundos)	80	Tiempo del ciclo (Segundos)	80
Tiempo de Rojo (Segundos)	47	Tiempo de Rojo (Segundos)	39
Tiempo de Amarillo (Segundos)	3	Tiempo de Verde (Segundos)	38
Tiempo de Verde (Segundos)	30	Tiempo de Verde intermitente (Segundos)	3

Tabla 47 - Tiempo propuesto de las fases de los semáforos (vehicular y peatonal) de la Rotonda sentido Sur – Norte

Rotonda Sentido Sur-Norte		Rotonda Sentido Sur-Norte	
Tipo de semáforo	Amarillo intermitente y Verde	Tipo de semáforo	Rojo, Verde y Verde intermitente
Usuario del semáforo	Vehículos	Usuario del semáforo	Peatones
Tiempo del ciclo (Segundos)	80	Tiempo del ciclo (Segundos)	80
Tiempo de Amarillo intermitente (Segundos)	27	Tiempo de Rojo (Segundos)	53
Tiempo de Verde (Segundos)	53	Tiempo de Verde (Segundos)	24
		Tiempo de Verde intermitente (Segundos)	3

Tabla 48 - Tiempo propuesto de las fases de los semáforos (vehicular y peatonal) de la calle Paio Galvão

Calle Paio Galvão		Calle Paio Galvão	
Tipo de semáforo	Amarillo intermitente y Verde	Tipo de semáforo	Rojo, Verde y Verde intermitente
Usuario del semáforo	Vehículos	Usuario del semáforo	Peatones
Tiempo del ciclo (Segundos)	80	Tiempo del ciclo (Segundos)	80
Tiempo de Amarillo intermitente (Segundos)	21	Tiempo de Rojo (Segundos)	59
Tiempo de Verde (Segundos)	59	Tiempo de Verde (Segundos)	18
		Tiempo de Verde intermitente (Segundos)	3

Se presenta también el diagrama de fases de la intersección en general, donde se puede apreciar de una manera más detallada el funcionamiento de la propuesta.

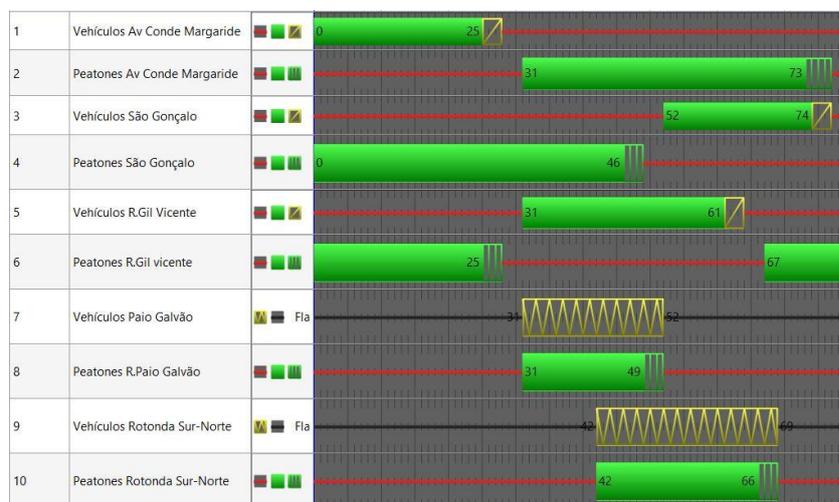


Figura 55 – Diagrama de fases propuesta para los semáforos de la intersección

Con la nueva propuesta de los semáforos, se siguen utilizando tiempos de rojo integral, para brindar una seguridad adecuada a los peatones y conductores de la intersección vial.

Para diferenciar de una mejor manera los cambios realizados en los tiempos de cada fase de los semáforos propuestos, se presentan las siguientes Tablas.

Tabla 49 – Diferencias entre los tiempos de los semáforos propuestos y actuales de la Avenida Conde de Margaride y São Gonçalo (Rotonda Norte – Sur)

	Avenida Conde de Margaride			Avenida São Gonçalo Rotonda	
	Semáforo vehicular	Semáforo peatonal		Semáforo vehicular	Semáforo peatonal
Diferencia de Tiempo de Verde con el semáforo actual (segundos)	+ 5	- 5	Diferencia de Tiempo de Verde con el semáforo actual (segundos)	0	-1
Diferencia de Tiempo de Rojo con el semáforo actual (segundos)	- 5	+ 5	Diferencia de Tiempo de Rojo con el semáforo actual (segundos)	0	- 1
Diferencia de Tiempo de Amarillo con el semáforo actual (segundos)	0	NO APLICA	Diferencia de Tiempo de Amarillo con el semáforo actual (segundos)	0	NO APLICA
Diferencia de Tiempo de verde intermitente con el semáforo actual (segundos)	NO APLICA	0	Diferencia de Tiempo de verde intermitente con el semáforo actual (segundos)	NO APLICA	0

Tabla 50 - Diferencias entre los tiempos de los semáforos propuestos y actuales de la calle Gil Vicente

	Calle Gil Vicente	
	Semáforo vehicular	Semáforo peatonal
Diferencia de Tiempo de Verde con el semáforo actual (segundos)	- 18	+ 18
Diferencia de Tiempo de Rojo con el semáforo actual (segundos)	+ 18	- 18
Diferencia de Tiempo de Amarillo con el semáforo actual (segundos)	0	NO APLICA
Diferencia de Tiempo de verde intermitente con el semáforo actual (segundos)	NO APLICA	0

Tabla 51 - Diferencias entre los tiempos de los semáforos propuestos y actuales de la rotonda sentido Sur – Norte y de la calle Paio Galvão

	Rotonda Sentido Sur-Norte			Calle Paio Galvão	
	Semáforo vehicular	Semáforo peatonal		Semáforo vehicular	Semáforo peatonal
Diferencia de Tiempo de Verde con el semáforo actual (segundos)	0	0	Diferencia de Tiempo de Verde con el semáforo actual (segundos)	- 1	- 1
Diferencia de Tiempo de Rojo con el semáforo actual (segundos)	NO APLICA	0	Diferencia de Tiempo de Rojo con el semáforo actual (segundos)	NO APLICA	+ 1
Diferencia de Tiempo de Amarillo con el semáforo actual (segundos)	0	NO APLICA	Diferencia de Tiempo de Amarillo con el semáforo actual (segundos)	+ 1	NO APLICA
Diferencia de Tiempo de verde intermitente con el semáforo actual (segundos)	NO APLICA	0	Diferencia de Tiempo de verde intermitente con el semáforo actual (segundos)	NO APLICA	0

En las tablas anteriores, los números con el símbolo (+) se refiere a que ganaron tiempo, por ejemplo, el semáforo peatonal de la calle Gil Vicente, tiene 18 segundos más de tiempo de verde de lo que tiene actualmente. En la avenida São Gonçalo existe una diferencia de (-1) y (+1) en los tiempos del semáforo peatonal, debido a que fue aumentado el tiempo de rojo integral a 3 segundos, para dar más seguridad a los peatones.

A continuación, se muestran las nuevas longitudes de fila de espera y tiempos de demora promedio de los vehículos.

Tabla 52 – Filas de espera máxima y promedio con los semáforos propuestos

	MODELO CON SEMÁFOROS ACTUALES			MODELO CON SEMÁFOROS PROPUESTOS		
	CALLE GIL VICENTE	AVENIDA CONDE DE MARGARIDE	AVENIDA SÃO GONÇALO	CALLE GIL VICENTE	AVENIDA CONDE DE MARGARIDE	AVENIDA SÃO GONÇALO
Fila de espera máxima (metros)	33.93	56.21	58.91	46.7	50.94	52.23
Fila de espera promedio (metros)	19.36	35.11	36.21	34.40	30.16	29.83

Tabla 53 – Tiempos promedio de demora de los vehículos con los semáforos propuestos

	Tiempo promedio de demora de los vehículos (segundos) con semaforos actuales	Nivel de Servicio según HCM	Tiempo promedio de demora de los vehículos (segundos) con semáforos propuestos	Nivel de Servicio según HCM
Avenida Conde de Margaride	31.36	Nivel C	20.09	Nivel B
Rotonda Sentido Norte - Sur	28.40	Nivel C	25.88	Nivel C
Calle Gil Vicente	7.94	Nivel A	23.15	Nivel B

Observando los resultados, se puede decir que mejora el funcionamiento de la intersección vial, ya que, aunque los tiempos de demora promedio y la longitud de las filas de espera aumentan en la calle Gil Vicente, subiendo a un nivel de servicio B (flujo estable con pequeños retrasos),

en los demás accesos disminuyen y se equilibra la intersección. La Avenida Conde de Margaride mejora su nivel de servicio, y junto con la Rotonda Sentido Norte-Sur, disminuyen las longitudes de las filas de espera máxima y promedio.

- Escenario alternativo (Aumento del volumen vehicular).

Es común que en las ciudades aumente la cantidad del parque automotor, debido al crecimiento de la población y al desarrollo económico. El modelo de simulación permite analizar el funcionamiento de la intersección al aumentar el volumen vehicular.

Para este escenario alternativo, se realizaron diferentes simulaciones, aumentando el volumen vehicular en 5%,10%,15% y 20%, con el fin de averiguar en qué momento los accesos de la intersección vial, disminuyen su nivel de servicio. En la siguiente tabla, se puede observar la cantidad de vehículos totales para cada aumento.

Tabla 54 – Volúmenes vehiculares para cada aumento

TOTAL DE VEHICULOS ACCESO	TOTAL VEHICULOS ACTUALES	TOTAL VEHICULOS AUMENTANDO 5%	TOTAL VEHICULOS AUMENTANDO 10%	TOTAL VEHICULOS AUMENTANDO 15%	TOTAL VEHICULOS AUMENTANDO 20%
AVENIDA CONDE DE MARGARIDE	517	543	569	595	621
AVENIDA SAO GONCALO	126	133	139	145	152
CALLE GIL VICENTE	303	319	334	349	364
ALAMEDA DR. ALFREDO PIMENTA	443	466	488	510	532
TOTAL	1389	1461	1530	1599	1669

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la simulación del modelo.

Tabla 55 - Filas de espera máxima y promedio con el aumento del volumen vehicular

	MODELO CON VOLUMEN VEHICULAR ACTUAL			MODELO CON AUMENTO 5% DE VOLUMEN VEHICULAR			MODELO CON AUMENTO 10% DE VOLUMEN VEHICULAR			MODELO CON AUMENTO 15% DE VOLUMEN VEHICULAR			MODELO CON AUMENTO 20% DE VOLUMEN VEHICULAR		
	CALLE GIL VICENTE	AVENIDA CONDE DE MARGARIDE	ROTONDA SENTIDO NORTE - SUR	CALLE GIL VICENTE	AVENIDA CONDE DE MARGARIDE	ROTONDA SENTIDO NORTE - SUR	CALLE GIL VICENTE	AVENIDA CONDE DE MARGARIDE	ROTONDA SENTIDO NORTE - SUR	CALLE GIL VICENTE	AVENIDA CONDE DE MARGARIDE	ROTONDA SENTIDO NORTE - SUR	CALLE GIL VICENTE	AVENIDA CONDE DE MARGARIDE	ROTONDA SENTIDO NORTE - SUR
Fila de espera máxima (metros)	33.93	56.21	58.91	39.72	60.83	78.17	42.21	67.77	105.26	44.36	76.27	110.14	46.85	86.76	121.14
Fila de espera promedio (metros)	19.36	35.11	36.21	22.72	37.70	45.29	24.12	40.25	49.93	25.27	46.21	55.13	28.63	53.11	60.16

Tabla 56 - Tiempos promedio de demora de los vehículos con el aumento del flujo vehicular

	Tiempo promedio de demora de los vehículos (segundos) con volumen vehicular actual	Nivel de Servicio según HCM	Tiempo promedio de demora de los vehículos (segundos) con aumento 5% volumen vehicular	Nivel de Servicio según HCM	Tiempo promedio de demora de los vehículos (segundos) con aumento 10% volumen vehicular	Nivel de Servicio según HCM	Tiempo promedio de demora de los vehículos (segundos) con aumento 15% volumen vehicular	Nivel de Servicio según HCM	Tiempo promedio de demora de los vehículos (segundos) con aumento 20% volumen vehicular	Nivel de Servicio según HCM
Avenida Conde de Margaride	31.36	Nivel C	36.21	Nivel D	45.13	Nivel D	49.36	Nivel D	56.13	Nivel E
Rotonda Sentido Norte - Sur	28.40	Nivel C	31.12	Nivel C	32.45	Nivel C	33.69	Nivel C	36.74	Nivel D
Calle Gil Vicente	7.94	Nivel A	8.97	Nivel A	9.01	Nivel A	9.26	Nivel A	10.23	Nivel B

Como era de esperarse, se obtienen aumentos significativos en la fila de espera máxima y promedio, y en el tiempo promedio de demora de los vehículos en cada acceso de la intersección. Observando la tabla de resultados, se puede decir que el primer acceso que se ve afectado al aumentar el volumen vehicular en un 5%, es la Avenida Conde de Margaride y se puede concluir que al aumentar el volumen vehicular en un 20%, el acceso de la Avenida Conde Margaride aumenta a nivel E (flujo inestable con retrasos intolerables), el acceso de la rotonda sentido Norte-Sur aumenta a nivel D (retardo tolerable) y el acceso a la calle Gil Vicente asciende a nivel B (flujo estable con pequeños retrasos).

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 Conclusiones generales

La micro simulación es una herramienta que en un futuro muy cercano será implementada en la mayoría de las ciudades del mundo, gracias a los grandes beneficios que ofrece, en cuanto a el estudio de la red vial y el tránsito.

A pesar de que no se pudieron realizar algunas mediciones de campo para alimentar de una mejor manera las variables que el software utiliza (curvas de aceleración vs velocidad, estudio de brechas entre los vehículos en las zonas de conflicto), fue posible lograr una debida calibración y validación del modelo realizado, con los datos observados en campo de la intersección vial en estudio.

Las variables que más influyeron en la calibración del modelo fueron las velocidades deseadas de los vehículos, la distancia promedio en detención y la distancia en detención frente a obstáculos estáticos. Para la validación se tuvo en cuenta las longitudes de las filas de espera, los flujos vehiculares y el tiempo de viaje de los automotores.

Debido a los bajos porcentajes de vehículos pesados y buses, fue difícil obtener un número suficiente de datos para las velocidades deseadas, lo cual, puede generar un grado de error más alto en comparación con los otros tipos de vehículos.

La intersección presenta un buen funcionamiento en términos generales, y no necesita grandes cambios para mejorar su capacidad de servicio, aun así, fueron analizados los resultados del modelo de una manera óptima, logrando proponer soluciones en los semáforos, mejorando y equilibrando el funcionamiento de la intersección.

La intersección vial funcionaría de una manera estable, hasta que el volumen vehicular aumente en un 20%, lo cual ocurriría en un tiempo estimado de 18 años, asumiendo un crecimiento del volumen vehicular del 1% anual (según la comparación de los volúmenes vehiculares medidos en el año 2014 y 2017). El dato exacto del crecimiento vehicular para la ciudad de Guimarães, no se encuentra establecido.

5.2 Propuestas de trabajos futuros

Teniendo en cuenta el desenvolvimiento del trabajo en esta tesis, se pueden sugerir los siguientes aspectos con respecto al desarrollo de futuros trabajos.

En la realización del trabajo no fue posible recolectar información para realizar curvas de aceleración vs velocidad de todos los tipos de vehículos, debido a la falta de un equipo especializado conformados por llantas con instrumentación especial, vehículos equipados con acelerómetros, radares y velocímetros, que están conectados en la mayoría de sus casos a un sistema en tiempo real que permite la construcción de curvas de velocidad vs. aceleraciones en periodos de tiempo menores a un segundo. Sería interesante aplicar el modelo con datos más cercanos a la realidad de la intersección vial.

De igual manera, se pueden obtener mejores aproximaciones de la velocidad media de los vehículos, usando una pistola radar. Además, sería adecuado, realizar una investigación más profundada para obtener datos de campo y analizar los tiempos de las brechas frontales y traseras de los vehículos en las áreas de conflicto.

En software permite obtener resultados sobre el promedio de demora de los vehículos en las ramas de entrada a la intersección, por lo tanto, sería interesante calcular estos valores con la metodología referida en el manual de carreteras HCM y compararlos con los obtenidos en el modelo.

En futuros trabajos, podría ser interesante añadir la variable de los estacionamientos en la vía pública (con todos los esfuerzos que requiere en la toma de datos y calibración) debido a que, aunque sean realizados con baja frecuencia en la intersección vial, pueden alterar el funcionamiento de la misma.

Teniendo en cuenta el modelo realizado, sería interesante realizar un modelo más extenso, para analizar y verificar el funcionamiento de una manera más amplia de la ciudad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. (2001). Chapter 9. Intersections. In AASHTO, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (pp. 559-745). Washington, D.C.: AASHTO.

Algers, S., Bernauer, E., Boero, M., Breheret, L., Di Taranto, C., Dougherty, M., ... & Gabard, J. F. (1998). Review of micro-simulation models. Review Report of the SMARTTEST project.

Austroads, (1988). Guide to Traffic Engineering Practise; Part 13, Pedestrians.

Bañon, L., & Beviá García, J. F. (2000). Manual de carreteras. Volumen I: elementos y proyecto. Caminos I.

Barceló, J. (2010). Models, traffic models, simulation, and traffic simulation. In Fundamentals of traffic simulation (pp. 1-62). Springer New York.

Cal, R., Mayor, R., & James Cárdenas, G. (2007). Ingeniería de Transito Fundamentos y Aplicaciones. 8ª. Edición, Alfaomega, México.

Castiglione, J., Bradley, M., & Gliebe, J. (2015). Activity-based travel demand models: a primer (No. SHRP 2 Report S2-C46-RR-1).

Coches (2017). Medidas de coches de todas las marcas. Recuperado de <http://www.medidasdecoches.com/>

Costa, A., & Macedo, J. (2008). Engenharia de Tráfego: Conceitos Básicos. Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes.

Dowling, R., Skabardonis, A., & Alexiadis, V. (2004). Traffic analysis toolbox volume III: guidelines for applying traffic microsimulation modeling software.

Druitt, S. (1998). Introduction to microsimulation. Traffic engineering & control.

Duarte, L. M. N. (2013). Simulação de comunicações oportunistas em ambientes urbanos utilizando bluetooth (Doctoral dissertation).

England, H. (2015). The Design Manual for Roads and Bridges.

Fellendorf, M., & Vortisch, P. (2010). Microscopic traffic flow simulator VISSIM. In Fundamentals of traffic simulation (pp. 63-93). Springer New York.

Fernández, R., Lecaros, M. F., & Valencia, A. (2013). Calibración del microsimulador de tráfico TSIS-CORSIM en Chile. Ingeniería de Transporte.

García, E. M., Bencomo, J. O. V., & Esparza, A. R. (2015). Vialidad: Análisis y Evaluación de Intersecciones Urbanas. CULCyT.

Helbing, D., & Molnar, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. Physical review.

Luk, J., & Tay, J. (2006). The use and application of microsimulation traffic models.

McNally, M. G. (2007). The four-step model. In Handbook of Transport Modelling: 2nd Edition (pp. 35-53). Emerald Group Publishing Limited.

McPTV. (2017). Casos de aplicación de PTV VISSIM. Recuperado de <http://vision-traffic.ptvgroup.com/es/productos/ptv-vissim/casos-de-aplicacion/>

Melo, M., Lopez, M., & Lopez, M. I. (2005). Modelos de Tránsito en Medellín. Trabajo de grado (Especialistas en Vías y Transporte). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Vías y Transporte. Medellín.

Ortúzar, J. de D., & Willumsen, L. G. (2011). Modelling transport. Fourth Edition Wiley.

Park, B., Won, J., & Yun, I. (2006). Application of microscopic simulation model calibration and validation procedure: Case study of coordinated actuated signal system. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1978), 113-122.

PTV Group. (2017). PTV VISSIM. Recuperado de <http://vision-traffic.ptvgroup.com/es/productos/ptv-vissim/>

Rodríguez, D. H., & Figueroa, P. A. (2012). Modelo para micro-simulación de tráfico vehicular y peatonal utilizando CUDA.

Signalhead system – SS. (2017). Signalhead system-Designing. Recuperado de <http://www.katel.ro/en/semaforizare/14>

Smith, J., & Blewitt, R. (2010). Traffic modelling guidelines. Traffic manager and network performance best practice. Version, 3.

Suarez, L. (2007). Análisis y evaluación operacional de intersecciones urbanas mediante microsimulación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

Transportation Research Board - TRB (2010). Highway Capacity Manual. Washington, D.C.: TRB.

Transurbanos de Guimarães – TUG. (2017). Horários. Recuperado de <http://tug.com.pt/horarios/>

Viegas, José Manuel (2011). O modelo de 4 passos. Apontamentos teóricos. Mestrado integrado de engenharia civil, Instituto superior técnico Lisboa.

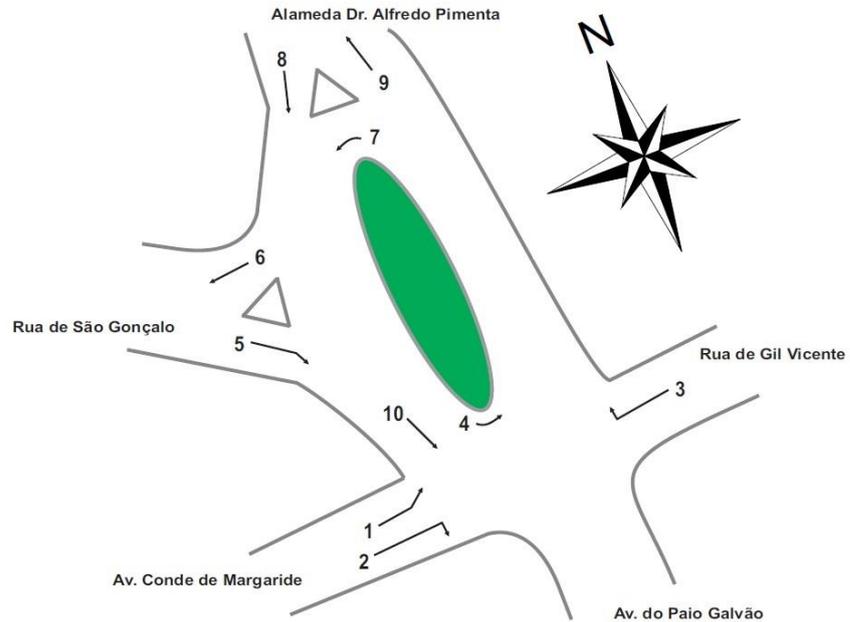
Vilarinho, C. (2008). Calibração de Modelos Microscópicos de Simulação de Redes Urbanas.

Vissim (2016). 9.0 User Manual. PTV Planung Transport Verkehr AG.

Wisconsin, Department of transportation. (2011). Traffic Signal Design Manual.

ANEXOS

Anexo 1: Datos del aforo vehicular



Período		Mov. 1				Mov. 2			
Início	Fim	MOTOS	LIGEROS	PESADOS	BUSES	MOTOS	LIGEROS	PESADOS	BUSES
7:30	7:45	3	31	0	2	3	60	1	6
7:45	8:00	0	31	0	0	1	50	0	5
8:00	8:15	0	32	0	2	0	55	1	5
8:15	8:30	0	16	0	1	0	53	1	6
8:30	8:45	0	40	0	0	0	80	1	7
8:45	9:00	0	38	0	0	0	94	0	3
9:00	9:15	0	32	1	2	0	101	0	4
9:15	9:30	0	45	0	0	0	90	1	3
16:30	16:45	0	49	0	2	0	55	1	4
16:45	17:00	0	54	1	3	0	69	0	2
17:00	17:15	1	63	1	4	0	71	0	3
17:15	17:30	1	65	1	3	0	60	0	2
17:30	17:45	2	63	0	0	0	47	1	3
17:45	18:00	1	76	0	3	0	80	1	4
18:00	18:15	0	64	0	3	0	69	1	5
18:15	18:30	0	54	1	4	0	51	0	5

Período		Mov. 3				Mov. 4			
Início	Fim	MOTOS	LIGEROS	PESADOS	BUSES	MOTOS	LIGEROS	PESADOS	BUSES
7:30	7:45	0	23	0	1	0	15	0	0
7:45	8:00	1	33	0	2	0	8	0	0
8:00	8:15	1	40	0	1	0	4	0	0
8:15	8:30	1	45	0	1	0	10	0	0
8:30	8:45	0	55	0	2	0	17	0	0
8:45	9:00	0	84	0	3	0	22	0	0
9:00	9:15	0	70	1	2	0	26	0	0
9:15	9:30	0	81	0	2	0	24	0	0
16:30	16:45	0	59	0	1	0	25	0	0
16:45	17:00	1	64	0	2	0	37	0	0
17:00	17:15	0	53	0	4	0	31	0	0
17:15	17:30	0	54	0	2	0	28	0	0
17:30	17:45	1	76	0	2	0	35	0	0
17:45	18:00	1	88	0	2	0	48	0	0
18:00	18:15	0	77	1	2	0	30	0	0
18:15	18:30	0	57	0	2	0	31	0	0

Período		Mov. 5				Mov. 6			
Início	Fim	MOTOS	LIGEROS	PESADOS	BUSES	MOTOS	LIGEROS	PESADOS	BUSES
7:30	7:45	0	15	0	0	1	22	0	0
7:45	8:00	0	22	0	0	0	19	0	1
8:00	8:15	0	21	0	0	0	50	0	1
8:15	8:30	0	23	0	0	0	82	1	1
8:30	8:45	0	15	0	0	1	68	0	1
8:45	9:00	0	17	0	0	0	64	0	2
9:00	9:15	0	17	0	0	1	58	0	0
9:15	9:30	0	13	0	0	0	51	0	0
16:30	16:45	0	39	0	0	0	51	0	1
16:45	17:00	0	44	1	0	0	65	0	0
17:00	17:15	0	38	1	1	0	105	1	3
17:15	17:30	0	36	0	0	2	65	1	4
17:30	17:45	0	43	0	0	2	87	0	3
17:45	18:00	0	29	0	0	1	88	0	4
18:00	18:15	1	29	0	0	1	86	1	2
18:15	18:30	0	23	1	0	0	83	1	4

Período		Mov. 7				Mov. 8			
Início	Fim	MOTOS	LIGEROS	PESADOS	BUSES	MOTOS	LIGEROS	PESADOS	BUSES
7:30	7:45	0	19	0	3	1	41	0	4
7:45	8:00	1	24	0	2	0	39	0	2
8:00	8:15	0	19	0	3	1	59	0	3
8:15	8:30	0	30	0	2	2	65	1	3
8:30	8:45	0	18	0	2	1	72	1	0
8:45	9:00	0	25	0	1	0	66	1	2
9:00	9:15	0	25	1	4	2	77	0	1
9:15	9:30	0	44	0	2	0	60	0	0
16:30	16:45	0	40	0	2	0	68	0	1
16:45	17:00	0	49	0	3	0	76	0	2
17:00	17:15	1	76	1	6	1	119	0	1
17:15	17:30	1	64	1	3	2	101	1	2
17:30	17:45	2	72	0	2	1	103	0	2
17:45	18:00	2	78	0	4	0	122	0	3
18:00	18:15	0	74	1	4	1	110	0	2
18:15	18:30	0	72	0	3	1	103	2	3

Período		Mov. 9				Mov. 10			
Início	Fim	MOTOS	LIGEROS	PESADOS	BUSES	MOTOS	LIGEROS	PESADOS	BUSES
7:30	7:45	3	50	0	0	0	38	0	7
7:45	8:00	0	48	0	0	1	58	0	3
8:00	8:15	1	57	0	0	1	45	0	5
8:15	8:30	1	41	0	0	2	26	0	4
8:30	8:45	0	94	0	0	0	20	1	1
8:45	9:00	0	119	0	2	0	22	1	1
9:00	9:15	0	103	1	0	1	35	1	5
9:15	9:30	0	106	0	0	0	42	0	2
					0				
16:30	16:45	0	93	0	1	0	71	0	2
16:45	17:00	1	106	1	2	0	67	1	5
17:00	17:15	0	71	0	2	2	97	1	5
17:15	17:30	0	83	0	2	1	108	1	1
17:30	17:45	1	102	0	0	1	96	0	1
17:45	18:00	0	134	0	1	1	93	0	3
18:00	18:15	0	97	0	1	1	97	0	4
18:15	18:30	0	70	1	3	1	84	2	2

Anexo 2: Datos recogidos de las velocidades de los vehículos

Tiempo Vehículos Ligeros	V (m/s)	V(km/h)
1.70	6.558823529	23.61176471
1.45	7.716262976	27.77854671
1.64	6.819571865	24.55045872
1.33	8.383458647	30.18045113
1.70	6.558823529	23.61176471
1.25	8.92	32.112
1.47	7.585034014	27.30612245
1.47	7.585034014	27.30612245
1.61	6.947040498	25.00934579
1.51	7.408637874	26.67109635
1.28	8.7109375	31.359375
1.56	7.147435897	25.73076923
1.58	7.056962025	25.40506329
1.59	7.012578616	25.24528302
1.53	7.31147541	26.32131148
1.53	7.287581699	26.23529412
1.68	6.636904762	23.89285714
1.63	6.840490798	24.62576687
1.48	7.559322034	27.21355932
1.37	8.138686131	29.29927007
1.32	8.479087452	30.52471483
1.58	7.079365079	25.48571429
1.59	7.012578616	25.24528302
1.68	6.636904762	23.89285714
1.53	7.31147541	26.32131148
1.59	7.034700315	25.32492114
1.33	8.41509434	30.29433962
1.44	7.770034843	27.97212544
1.49	7.483221477	26.93959732
1.36	8.228782288	29.62361624
1.54	7.24025974	26.06493506
1.56	7.170418006	25.81350482
1.28	8.7109375	31.359375
1.56	7.147435897	25.73076923
1.68	6.656716418	23.9641791
1.43	7.797202797	28.06993007
1.49	7.508417508	27.03030303
1.39	8.050541516	28.98194946
1.55	7.216828479	25.98058252
1.58	7.079365079	25.48571429
1.58	7.056962025	25.40506329
1.26	8.884462151	31.98406375
1.39	8.021582734	28.87769784
1.32	8.446969697	30.40909091
1.49	7.483221477	26.93959732
1.51	7.408637874	26.67109635
1.58	7.079365079	25.48571429
1.64	6.819571865	24.55045872
1.69	6.597633136	23.75147929

Tiempo Vehículos Ligeros	V (m/s)	V(km/h)
1.58	7.056962025	25.40506329
1.48	7.533783784	27.12162162
1.43	7.824561404	28.16842105
1.32	8.479087452	30.52471483
1.46	7.663230241	27.58762887
1.58	7.056962025	25.40506329
1.62	6.882716049	24.77777778
1.68	6.636904762	23.89285714
1.54	7.263843648	26.14983713
1.45	7.689655172	27.68275862
1.30	8.61003861	30.996139
1.38	8.079710145	29.08695652
1.47	7.585034014	27.30612245
1.63	6.861538462	24.70153846
1.68	6.636904762	23.89285714
1.58	7.079365079	25.48571429
1.54	7.24025974	26.06493506
1.48	7.533783784	27.12162162
1.38	8.109090909	29.19272727
1.36	8.228782288	29.62361624
1.52	7.335526316	26.40789474
1.55	7.216828479	25.98058252
1.58	7.079365079	25.48571429
1.60	6.990595611	25.1661442
1.65	6.778115502	24.40121581
1.51	7.408637874	26.67109635
1.33	8.41509434	30.29433962
1.49	7.483221477	26.93959732
1.27	8.814229249	31.7312253
1.49	7.508417508	27.03030303
1.69	6.597633136	23.75147929
1.63	6.840490798	24.62576687
1.67	6.676646707	24.03592814
1.55	7.193548387	25.89677419
1.66	6.737160121	24.25377644
1.58	7.056962025	25.40506329
1.51	7.38410596	26.58278146
1.35	8.289962825	29.84386617
1.31	8.544061303	30.75862069
1.39	8.021582734	28.87769784
1.26	8.849206349	31.85714286
1.30	8.61003861	30.996139
1.35	8.289962825	29.84386617
1.37	8.138686131	29.29927007
1.34	8.320895522	29.95522388
1.56	7.147435897	25.73076923
1.49	7.483221477	26.93959732
1.34	8.352059925	30.06741573
1.42	7.852112676	28.26760563
1.28	8.7109375	31.359375
1.40	7.992831541	28.77419355
1.51	7.408637874	26.67109635

Tiempo Buses	V (m/s)	V(km/h)
1.46	7.663230241	27.58762887
1.64	6.819571865	24.55045872
1.65	6.778115502	24.40121581
1.48	7.559322034	27.21355932
1.47	7.585034014	27.30612245
1.63	6.861538462	24.70153846
1.62	6.882716049	24.77777778
1.57	7.101910828	25.56687898
1.59	7.012578616	25.24528302
1.48	7.533783784	27.12162162
1.46	7.663230241	27.58762887
1.50	7.45819398	26.84949833
1.51	7.408637874	26.67109635
1.53	7.287581699	26.23529412
1.55	7.216828479	25.98058252
1.58	7.079365079	25.48571429
1.63	6.840490798	24.62576687
1.62	6.882716049	24.77777778
1.61	6.947040498	25.00934579
1.58	7.079365079	25.48571429
1.48	7.533783784	27.12162162
1.49	7.508417508	27.03030303
1.56	7.170418006	25.81350482
1.56	7.147435897	25.73076923
1.63	6.840490798	24.62576687
1.64	6.798780488	24.47560976
1.61	6.947040498	25.00934579
1.58	7.056962025	25.40506329
1.50	7.45819398	26.84949833
1.48	7.559322034	27.21355932
1.46	7.663230241	27.58762887
1.51	7.408637874	26.67109635
1.61	6.947040498	25.00934579
1.53	7.287581699	26.23529412
1.48	7.533783784	27.12162162
1.57	7.101910828	25.56687898
1.63	6.840490798	24.62576687
1.66	6.737160121	24.25377644
1.61	6.947040498	25.00934579
1.49	7.483221477	26.93959732
1.47	7.610921502	27.39931741
1.57	7.101910828	25.56687898

Tiempo Vehículos Pesados	V (m/s)	V(km/h)
1.50	7.433333333	26.76
1.64	6.79878049	24.4756098
1.54	7.24025974	26.0649351
1.64	6.81957187	24.5504587
1.53	7.31147541	26.3213115
1.67	6.67664671	24.0359281
1.66	6.73716012	24.2537764
1.60	6.99059561	25.1661442
1.56	7.1474359	25.7307692
1.54	7.24025974	26.0649351

Tiempo Motos	V (m/s)	V(km/h)
1.87	5.96256684	21.4652406
1.77	6.29943503	22.6779661
1.16	9.65367965	34.7532468
1.27	8.77952756	31.6062992
1.35	8.28996283	29.8438662
1.49	7.48322148	26.9395973
1.68	6.63690476	23.8928571
1.58	7.07936508	25.4857143
1.85	6.04336043	21.7560976
1.74	6.40804598	23.0689655
1.23	9.10204082	32.7673469
1.37	8.16849817	29.4065934
1.51	7.40863787	26.6710963
1.85	6.04336043	21.7560976
1.36	8.22878229	29.6236162

Anexo 3: Datos de los conteos de las filas de espera

- Semáforo de la Avenida Conde de Margaride

TIPO DE VEHICULO	NUMERO DE VEHICULOS EN LA FILA DE ESPERA POR CICLO SEMAFORICO	LONGITUD APROXIMADA EN METROS
LIGERO	2	42.3
BUS	1	
MOTOS	1	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	37.8
LIGERO	2	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	6	
FURGONETA	0	28.8
LIGERO	2	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	0	25.3
LIGERO	4	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	1	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	0	22.5
LIGERO	0	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	0	39
LIGERO	0	
BUS	2	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	0	44.4
LIGERO	1	
BUS	2	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	0	29.4
LIGERO	1	
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	0	37.8
LIGERO	2	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	6	
FURGONETA	0	34.2
LIGERO	3	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	0	23.4
LIGERO	1	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	0	22.5
LIGERO	0	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	0	21
LIGERO	0	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	2	18
LIGERO	0	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	0	33.3
LIGERO	2	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	0	

TIPO DE VEHICULO	NUMERO DE VEHICULOS EN LA FILA DE ESPERA POR CICLO SEMAFORICO	LONGITUD APROXIMADA EN METROS
LIGERO	3	29.7
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	14.4
LIGERO	1	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	0	24.3
LIGERO	2	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	59.1
LIGERO	9	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	1	35.7
LIGERO	3	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	1	33.3
LIGERO	2	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	0	37.8
LIGERO	2	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	6	
FURGONETA	0	38.7
LIGERO	3	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	0	35.1
LIGERO	4	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	48
LIGERO	0	
BUS	2	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	0	24
LIGERO	0	
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	0	20.7
LIGERO	3	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	22.8
LIGERO	2	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	0	9.9
LIGERO	1	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	44.7
LIGERO	3	
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	

TIPO DE VEHICULO	NUMERO DE VEHICULOS EN LA FILA DE ESPERA POR CICLO SEMAFORICO	LONGITUD APROXIMADA EN METROS
LIGERO	2	57.3
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	7	
FURGONETA	0	45.9
LIGERO	1	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	9	
FURGONETA	0	33.3
LIGERO	2	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	0	56.4
LIGERO	6	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	1	39.6
LIGERO	4	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	0	37.8
LIGERO	2	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	6	
FURGONETA	0	46.2
LIGERO	3	
BUS	0	
MOTOS	1	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	6	
FURGONETA	0	37.8
LIGERO	2	
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	2	46.2
LIGERO	3	
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	1	29.7
LIGERO	3	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	49.8
LIGERO	2	
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	1	42.3
LIGERO	2	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	7	
FURGONETA	0	43.2
LIGERO	3	
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	6	
FURGONETA	0	26.4
LIGERO	1	
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	1	

• Semáforo de la calle Gil Vicente

TIPO DE VEHICULO	NUMERO DE VEHICULOS EN LA FILA DE ESPERA POR CICLO SEMAFORICO	LONGITUD APROXIMADA EN METROS
LIGERO	3	20.7
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	27.3
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	2	
LIGERO	2	31.8
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	2	
LIGERO	2	28.8
BUS	0	
MOTOS	1	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	1	
LIGERO	2	24.3
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	34.8
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	1	
LIGERO	2	25.8
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	1	
LIGERO	3	23.6
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	2	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	0	
LIGERO	3	20.7
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	
LIGERO	3	20.7
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	14.5
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	1	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	0	
LIGERO	5	31.5
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	
LIGERO	1	26.4
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	1	
LIGERO	4	26.1
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	15.3
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	

TIPO DE VEHICULO	NUMERO DE VEHICULOS EN LA FILA DE ESPERA POR CICLO SEMAFORICO	LONGITUD APROXIMADA EN METROS
LIGERO	3	31.2
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	0	
LIGERO	0	0
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	30.3
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	1	
LIGERO	2	15.3
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	
LIGERO	5	27
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	21.3
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	1	
LIGERO	1	23.4
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	0	
LIGERO	0	12
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	2	
LIGERO	0	19.5
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	15.3
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	
LIGERO	4	35.1
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	0	4.5
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	
LIGERO	4	21.6
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	0	
LIGERO	3	16.2
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	0	
LIGERO	0	0
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	0	

TIPO DE VEHICULO	NUMERO DE VEHICULOS EN LA FILA DE ESPERA POR CICLO SEMAFORICO	LONGITUD APROXIMADA EN METROS
LIGERO	0	21.7
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	1	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	0	
LIGERO	0	0
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	0	
LIGERO	0	4.5
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	
LIGERO	1	18.9
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	0	13.5
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	0	0
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	0	
LIGERO	0	16.5
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	2	
LIGERO	0	19.5
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	1	
LIGERO	0	10.5
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	1	
LIGERO	1	9.9
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	
LIGERO	1	14.4
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	23.5
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	1	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	24.3
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	0	0
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	0	

- Semáforo ubicado en la rotonda sentido Norte – Sur

TIPO DE VEHICULO	NUMERO DE VEHICULOS EN LA FILA DE ESPERA POR CICLO SEMAFORICO	LONGITUD APROXIMADA EN METROS
LIGERO	4	33.6
BUS	0	
MOTOS	1	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	0	
LIGERO	6	42.9
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	1	
LIGERO	4	30.6
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	0	
LIGERO	4	40.3
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	1	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	1	
LIGERO	2	33.3
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	0	
LIGERO	0	34.5
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	1	
LIGERO	5	33
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	1	
LIGERO	2	33.3
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	0	
LIGERO	3	38.7
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	0	
LIGERO	4	36.6
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	33.3
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	28.8
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	0	
LIGERO	3	28.2
BUS	0	
MOTOS	1	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	0	
LIGERO	0	28.5
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	3	38.7
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	0	

TIPO DE VEHICULO	NUMERO DE VEHICULOS EN LA FILA DE ESPERA POR CICLO SEMAFORICO	LONGITUD APROXIMADA EN METROS
LIGERO	3	38.7
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	0	
LIGERO	5	57.7
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	1	
HATCHBACK	6	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	37.8
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	2	
LIGERO	3	34.2
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	0	
LIGERO	1	38.4
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	0	
LIGERO	3	34.2
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	45.3
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	2	
LIGERO	3	25.2
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	0	
LIGERO	6	32.4
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	0	
FURGONETA	0	
LIGERO	3	29.7
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	24.3
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	3	29.7
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	52.5
BUS	2	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	0	
LIGERO	4	26.1
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	

TIPO DE VEHICULO	NUMERO DE VEHICULOS EN LA FILA DE ESPERA POR CICLO SEMAFORICO	LONGITUD APROXIMADA EN METROS
LIGERO	0	37.5
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	0	
LIGERO	4	26.1
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	1	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	39.3
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	3	39.4
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	1	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	1	
LIGERO	3	31.2
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	1	
LIGERO	3	29.7
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	2	24.3
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	3	29.7
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	3	29.7
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	1	29.4
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	4	
FURGONETA	1	
LIGERO	3	38.7
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	5	
FURGONETA	0	
LIGERO	5	40.5
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	0	28.5
BUS	1	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	3	
FURGONETA	0	
LIGERO	3	25.2
BUS	0	
MOTOS	0	
ELECTRICO	0	
HATCHBACK	2	
FURGONETA	0	