



# UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



---

“ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD, CONGESTIÓN Y FLUJO VEHICULAR PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL NIVEL DE SERVICIO DEL ÓVALO PACHACUTEC DE LA CIUDAD DEL CUSCO”

---

Presentado por:

Rodrigo Chayña, Elmer Paul

Rivas Vilcas, Josemar Benigno

Para optar el Título Profesional de ingeniero Civil

Asesor:

MGT. ING. MIGUEL ALFREDO FLORES DUEÑAS

CUSCO – PERÚ

2018



## DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres Teófilo Rivas Oliváres y Zoila Vilcas Villarroel que siempre me apoyaron incondicionalmente en la parte moral y económica para poder llegar a ser un profesional de la patria.

A mis hermanas Deyssi Verónica Rivas Vilcas y Etti Amelia Rivas Vilcas por el apoyo que siempre me brindaron día a día en el transcurso de cada año de mi carrera universitaria.

Josemar Benigno Rivas Vilcas

A mi tía Ing. Liliana Tinta Olvea (QEPPD) por ser un ejemplo para mí en el camino profesional de la Ingeniería Civil.

A mis hermanos Jose Luis y Luzmelia Rodrigo Chayña por ser la familia que me impulso siempre a seguir adelante y luchar por mis sueños.

A mis padres Paulino Rodrigo Olvea y Leticia Chayña Mamani por el apoyo incondicional y por creer en mí.

Elmer Paul Rodrigo Chayña



## AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Dios por haberme dado sabiduría y fortaleza para cumplir esta meta. Al Ing. Miguel Alfredo Flores Dueñas, por aceptar la dirección de ésta tesis, y a las personas que con su apoyo hicieron posible concluir ésta investigación.

Josemar Benigno Rivas Vilcas

Agradezco a Dios por iluminar mi camino hacia mis objetivos, al Ing. Mgt. Miguel Alfredo Dueñas por dirigir la presente investigación. A mi familia por todo el apoyo incondicional.

Elmer Paul Rodrigo Chayña



## RESUMEN

Esta investigación está enfocada en el análisis de los flujos vehiculares, características geométricas, capacidad, congestionamiento de las aproximaciones al “Óvalo Pachacutec” de la ciudad del Cusco para determinar los niveles de servicio que presentan estas vías.

Para el análisis de los flujos se realizaron aforos vehiculares de todas las aproximaciones al “Óvalo Pachacutec” en el horario de mayor demanda previamente determinado, así también se determinaron las condiciones geométricas mediante un levantamiento topográfico, se realizó un inventario de las señales de tránsito que se encuentran en las aproximaciones, finalmente la operatividad de los semáforos existentes en la zona de investigación.

Con los datos obtenidos se procedió al cálculo de la capacidad mediante la metodología TRL (Transport Research Laboratory), la determinación de los niveles de servicio mediante la simulación de “VISSIM 11” y finalmente la relación volumen-capacidad para analizar la congestión existente de las aproximaciones.

Con los resultados obtenidos se procedió a la simulación de diferentes escenarios para la optimización de los niveles de servicios, los cuales contemplan cambio de sentido de las aproximaciones, mejoras en la geometría y optimización de los ciclos semafóricos del “Óvalo Pachacutec” y pasos a desnivel.

En conclusión, actualmente la demanda de vehículos supera la capacidad de las aproximaciones al “Óvalo Pachacutec”, para lo cual se recomienda la implementación de estrategias para el mejoramiento de los niveles de servicio de dicho ovalo, estrategias que se podrían implementar actualmente (cambio de sentido de las aproximaciones, rediseño geométrico) y futuras (pasos a desnivel).



## ABSTRACT

This research focused on the analysis of vehicle flows rates, geometric characteristics, capacity, congestion of approaches to the "Ovalo Pachacutec" of the city of Cusco to determine the levels of service presented by these roads.

For the analysis of vehicle flows rates, vehicle seats were made of all approaches to the "Ovalo Pachacutec" in the highest demand schedule previously determined, so also, the geometric conditions were determined by a topographic survey, an inventory of the transit signals in the approaches was made, finally the operability of existing traffic lights in the research area.

Based on the data obtained, capacity was calculated using the TRL methodology (Transport Research Laboratory), the determination of service levels by simulation of "VISSIM 11" and finally the volume-capacity ratio to analyse the existing congestion of the approaches.

The results obtained were used to simulate different scenarios for the optimization of service levels, which contemplate a change in the direction of the approaches, improvements in the geometry and optimization of the semaphoric cycles of the "Ovalo Pachacutec " and overpasses.

In conclusion, currently the demand of vehicles exceeds the capacity of the approximations to the "Ovalo Pachacutec", for which it is recommended the implementation of strategies for the improvement of the service levels of said oval, strategies that could be implemented at present (change of meaning of the approximations, geometric redesign) and in the future (overpasses).



## INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos el parque automotor en la ciudad de Cusco se incrementó desmesuradamente, trayendo consigo problemas de congestión vehicular, situaciones que se traducen en pérdidas económicas y de tiempo.

Este problema se ve reflejado en las vías de ingreso y salida del centro histórico de la ciudad del Cusco, más aun en el “Óvalo Pachacutec” que es uno de los puntos de la ciudad en el que concurren los flujos vehiculares de las avenidas 28 de Julio y Alameda Pachacutec, las cuales son las de más demanda vehicular.

El presente tema de tesis analizará el flujo vehicular, la capacidad y congestión que presenta el “Óvalo Pachacutec” para así plantear soluciones simuladas en software que puedan mejorar el nivel de servicio de dicho óvalo.

Para la realización de este tema de tesis, primero se identificó el problema, siendo este el congestionamiento y el bajo nivel de servicio que presenta el “Óvalo Pachacutec” de la ciudad del Cusco, se trazan los objetivos de análisis de flujo, capacidad y congestión vehicular, luego se recolectan los datos mediante herramientas aplicadas a este tipo de investigación (formatos de aforo vehicular) de las aproximaciones al óvalo, se determina el nivel de servicio para finalmente plantear soluciones que optimice este nivel de servicio.



**ÍNDICE GENERAL**

**DEDICATORIA ..... ii**

**AGRADECIMIENTOS ..... iii**

**RESUMEN ..... iv**

**ABSTRACT ..... v**

**INTRODUCCIÓN ..... vi**

**ÍNDICE GENERAL ..... vii**

**ÍNDICE DE TABLAS ..... xvi**

**ÍNDICE DE FIGURAS ..... xxvi**

**CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 1**

    1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA ..... 1

        1.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA ..... 1

            1.1.1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA ..... 5

        1.1.2 FORMULACIÓN INTERROGATIVA DEL PROBLEMA ..... 9

            1.1.2.1 FORMULACIÓN INTERROGATIVA DEL PROBLEMA  
                    GENERAL ..... 9

            1.1.2.2 FORMULACIÓN INTERROGATIVA DE LOS PROBLEMAS  
                    ESPECÍFICOS ..... 9

    1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN ..... 10

        1.2.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA ..... 10

        1.2.2 JUSTIFICACIÓN SOCIAL ..... 10

        1.2.3 JUSTIFICACIÓN POR VIABILIDAD ..... 10

        1.2.4 JUSTIFICACIÓN POR RELEVANCIA ..... 10

    1.3 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN ..... 11

        1.3.1 LIMITACIONES POR ESPACIO ..... 11

        1.3.2 LIMITACIONES POR TIEMPO ..... 11

        1.3.3 LIMITACIONES POR DATOS ..... 11



1.3.4	LIMITACIONES POR FUENTES DE BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	12
1.4	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	12
1.4.1	OBJETIVO GENERAL.....	12
1.4.2	OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	12
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....</b>		<b>13</b>
2.1	ANTECEDENTES DE LA TESIS.....	13
2.1.1	ANTECEDENTES A NIVEL LOCAL .....	13
2.1.2	ANTECEDENTES A NIVEL NACIONAL.....	15
2.1.3	ANTECEDENTES A NIVEL INTERNACIONAL .....	18
2.2	ASPECTOS TEÓRICOS PERTINENTES.....	21
2.2.1	CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE SISTEMAS VIALES .....	21
2.2.2	DISPOSITIVOS PARA EL CONTROL.....	21
2.2.3	TRANSITO VEHICULAR.....	22
2.2.3.1	VOLUMEN DE TRÁNSITO.....	22
2.2.3.2	VOLÚMENES DE TRANSITO HORARIOS .....	24
2.2.3.3	VARIACIÓN DEL VOLUMEN DE TRÁNSITO EN LA HORA DE MÁXIMA DEMANDA .....	25
2.2.3.4	VELOCIDAD .....	25
2.2.3.4.1	VELOCIDAD EN GENERAL.....	25
2.2.4	ANÁLISIS DEL FLUJO VEHICULAR.....	27
2.2.5	NIVEL DE SERVICIO EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS.....	27
2.2.6	CAPACIDAD VIAL.....	29
2.2.6.1	METODOLOGÍA HCM PARA CALCULAR LA CAPACIDAD EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS .....	29
2.2.7	ROTONDAS.....	35
2.2.7.1	CATEGORÍAS DE ROTONDAS.....	36





2.2.7.1.1	MINIROTONDAS .....	37
2.2.7.1.2	ROTONDAS DE UN SOLO CARRIL.....	38
2.2.7.1.3	ROTONDAS MULTICARRILES .....	39
2.2.7.2	CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS DE UNA ROTONDA.....	40
2.2.7.3	CONSIDERACIONES DE ROTONDAS .....	41
2.2.7.3.1	SEGURIDAD.....	41
2.2.7.3.2	DECISIONES DE LOS USUARIOS.....	42
2.2.7.3.3	OPERACIONES DE TRÁNSITO .....	43
2.2.7.3.4	REQUERIMIENTOS DE ESPACIO .....	43
2.2.7.3.5	ADMINISTRACIÓN DE ACCESO .....	44
2.2.7.3.6	FACTORES AMBIENTALES.....	45
2.2.7.3.7	COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO .....	45
2.2.7.3.8	APACIGUAMIENTO DEL TRÁNSITO .....	45
2.2.7.3.9	ESTÉTICA .....	46
2.2.7.4	CONSIDERACIONES DE LOS USUARIOS.....	47
2.2.7.4.1	PEATONES .....	47
2.2.7.4.2	PEATONES CON DISCAPACIDADES .....	47
2.2.7.4.3	CICLISTAS .....	48
2.2.7.4.4	VEHÍCULOS GRANDES.....	48
2.2.7.4.5	TRANSPORTE PÚBLICO.....	49
2.2.7.4.6	VEHÍCULOS DE EMERGENCIA.....	49
2.2.7.4.7	CRUCES FERROVIARIOS.....	50
2.2.7.5	PLANEACIÓN DE ROTONDAS.....	52
2.2.7.5.1	CONSIDERACIONES DE CONTEXTO.....	52
2.2.7.5.2	CONDICIONES ESPECÍFICAS DEL LUGAR .....	54
2.2.7.5.3	APLICACIONES POTENCIALES .....	55



2.2.7.5.4	DIMENSIONAMIENTO A NIVEL DE PLANEAMIENTO Y REQUERIMIENTOS DE ESPACIO.....	58
2.2.7.6	METODOLOGÍA HCM 2010 .....	60
2.2.7.6.1	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS.....	60
2.2.7.6.2	DETERMINACIÓN DE ÍNDICES DE FLUJO EN ROTONDAS .....	61
2.2.7.6.3	AJUSTES POR FLOTA MIXTA DE VEHÍCULOS.....	63
2.2.7.6.4	CAPACIDAD .....	64
2.2.7.6.5	RELACIÓN VOLUMEN-CAPACIDAD .....	72
2.2.7.6.6	CONTROL DE DEMORA .....	72
2.2.7.6.7	CALIDAD DE SERVICIO Y NIVEL DE SERVICIO .....	73
2.2.7.6.8	LONGITUD DE COLA .....	73
2.2.7.7	DISEÑO GEOMÉTRICO .....	74
2.2.7.7.1	DISEÑO PARA USUARIOS NO-MOTORIZADOS .....	74
2.2.7.7.2	TAMAÑO, POSICIÓN Y ALINEAMIENTO DE APROXIMACIONES .....	75
2.2.7.7.3	DIÁMETRO DE CÍRCULO INSCRITO .....	76
2.2.7.7.4	ALINEAMIENTO DE LAS APROXIMACIONES.....	77
2.2.7.7.5	ÁNGULO ENTRE RAMALES DE APROXIMACIÓN.....	80
2.2.7.7.6	ROTONDAS DE UN SOLO CARRIL.....	82
2.2.7.7.7	ROTONDAS MULTICARRILES .....	85
2.2.7.7.8	DISTANCIA VISUAL .....	87
2.2.7.8	SEÑALIZACIÓN.....	91
2.2.7.8.1	SEÑALES HORIZONTALES .....	91
2.2.7.8.2	SEÑALES VERTICALES .....	95
2.2.8	MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN .....	97
2.2.8.1	MÉTODO DE MODELACIÓN.....	98



- 2.2.8.1.1 CARACTERÍSTICAS DE UN MODELO ..... 98
- 2.2.8.1.2 TIPOS DE MODELOS..... 98
- 2.2.8.2 SOFTWARE DE MÉTODOS DETERMINÍSTICOS ..... 99
- 2.2.8.3 MÉTODOS DE SIMULACIÓN ..... 101
- 2.2.8.4 ESQUEMA DE MODELADO COMPUTACIONAL DE SISTEMAS COMPLEJOS ..... 101
- 2.2.8.5 MODELOS HÍBRIDOS DE SIMULACIÓN ..... 105
  - 2.2.8.5.1 MODELOS DE SIMULACIÓN MACROSCÓPICA ..... 106
  - 2.2.8.5.2 MODELOS DE SIMULACIÓN MESOSCÓPICA ..... 107
  - 2.2.8.5.3 MODELOS DE SIMULACIÓN MICROSCÓPICA..... 108
- 2.2.8.6 VISSIM..... 109
  - 2.2.8.6.1 UMBRALES DEL MODELO ..... 110
  - 2.2.8.6.2 APLICACIONES DEL VISSIM..... 111
  - 2.2.8.6.3 ELEMENTOS DE ENTRADA DEL MODELO ..... 112
  - 2.2.8.6.4 DATOS DE SALIDA ..... 114
- 2.2.9 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN ..... 115
  - 2.2.9.1 CALIBRACIÓN..... 115
    - 2.2.9.1.1 NUMERO DE SEMILLA (RANDOM SEED)..... 116
    - 2.2.9.1.2 NÚMERO DE CORRIDAS ..... 116
    - 2.2.9.1.3 TIEMPO DE ESTABILIDAD (WARM UP)..... 118
    - 2.2.9.1.4 CALIBRACIÓN VEHICULAR (WIEDEMANN 74) ..... 119
  - 2.2.9.2 VALIDACIÓN ..... 124
- 2.3 HIPÓTESIS ..... 127
  - 2.3.1 HIPÓTESIS GENERAL ..... 127
  - 2.3.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICA ..... 127
- 2.4 DEFINICIÓN DE VARIABLES ..... 127



2.4.1	VARIABLES INDEPENDIENTES .....	127
2.4.1.1	INDICADORES DE VARIABLES INDEPENDIENTES.....	128
2.4.2	VARIABLES DEPENDIENTES.....	128
2.4.2.1	INDICADORES DE VARIABLES INDEPENDIENTES.....	128
2.4.3	CUADRO DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....	129
<b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....</b>		<b>130</b>
3.1	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	130
3.1.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	130
3.1.2	NIVEL DE INVESTIGACIÓN .....	130
3.1.3	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	130
3.2	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	131
3.2.1	DISEÑO METODOLÓGICO .....	131
3.2.2	DISEÑO DE INGENIERÍA .....	132
3.3	UNIVERSO Y MUESTRA.....	133
3.3.1	UNIVERSO .....	133
3.3.1.1	DESCRIPCIÓN DEL UNIVERSO .....	133
3.3.1.2	CUANTIFICACIÓN DEL UNIVERSO .....	133
3.3.2	MUESTRA.....	133
3.3.2.1	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA.....	133
3.3.2.2	CUANTIFICACIÓN DE LA MUESTRA .....	133
3.3.2.3	MÉTODO DE MUESTREO .....	134
3.3.2.4	CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE MUESTRA.....	134
3.3.3	CRITERIOS DE INCLUSIÓN.....	134
3.4	INSTRUMENTOS.....	134
3.4.1	INSTRUMENTOS METODOLÓGICOS O INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	134



3.4.1.1	FICHA DE AFORO VEHICULAR.....	134
3.4.1.2	FICHA DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS .....	140
3.4.1.3	FICHAS DE CARACTERÍSTICAS SEMAFÓRICAS .....	140
3.4.1.4	FICHAS DE SEÑALES DE TRÁNSITO.....	141
3.4.2	INSTRUMENTOS DE INGENIERÍA .....	142
3.5	PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	142
3.5.1	LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO EN EL “ÓVALO PACHACUTEC” .....	142
3.5.1.1	EQUIPO UTILIZADO.....	142
3.5.1.2	PROCEDIMIENTO .....	142
3.5.2	RECOLECCIÓN DE DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DIARIO .....	143
3.5.2.1	EQUIPO UTILIZADO.....	143
3.5.2.2	PROCEDIMIENTO .....	143
3.5.2.2.1	DETERMINACIÓN DEL MOVIMIENTO DE FLUJO VEHICULAR .....	143
3.5.2.2.2	DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE AFORO .....	148
3.5.2.2.3	REGISTRO FÍLMICO .....	148
3.5.2.2.4	DATOS .....	149
3.5.3	RECOLECCIÓN DE DATOS DE LAS APROXIMACIONES PARA DETERMINAR EL VOLUMEN HORARIO DE MÁXIMA DEMANDA ..	168
3.5.3.1	EQUIPO UTILIZADO.....	168
3.5.3.2	PROCEDIMIENTO .....	168
3.6	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE DATOS .....	175
3.6.1	ANÁLISIS DE DATOS PARA LAS APROXIMACIONES DEL ÓVALO PACHACUTEC .....	175
3.6.1.1	DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN DIARIA.....	175



3.6.1.1.1 PROCESAMIENTO.....	175
3.6.1.1.2 DIAGRAMA.....	176
3.6.1.1.3 CONCLUSIÓN .....	176
3.6.1.2 DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN HORARIA .....	176
3.6.1.2.1 PROCESAMIENTO.....	176
3.6.1.2.2 DIAGRAMA.....	177
3.6.1.2.3 CONCLUSIÓN .....	180
3.6.1.3 DETERMINACIÓN VOLUMEN HORARIO DE MÁXIMA DEMANDA .....	180
3.6.1.3.1 PROCESAMIENTO.....	180
3.6.1.3.2 DIAGRAMA.....	181
3.6.1.3.3 CONCLUSIÓN .....	181
3.6.1.4 DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN VEHICULAR POR APROXIMACIONES ORIGEN DESTINO.....	182
3.6.1.4.1 PROCESAMIENTO.....	182
3.6.1.4.2 DIAGRAMA.....	210
3.6.1.4.3 CONCLUSIÓN .....	218
3.6.1.5 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE HORA PICO (FHP).....	219
3.6.1.5.1 PROCESAMIENTO.....	219
3.6.1.5.2 DIAGRAMA.....	221
3.6.1.5.3 CONCLUSIÓN .....	221
3.6.1.6 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y SEMAFÓRICAS DEL “ÓVALO PACHACUTEC” .....	221
3.6.1.6.1 PROCESAMIENTO.....	221
3.6.1.6.2 CONCLUSIÓN .....	227



3.6.1.7 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD Y CONGESTIÓN VEHICULAR APLICANDO LA METODOLOGÍA HCM 2010 PARA INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS.....	228
3.6.1.7.1 PROCESAMIENTO.....	228
3.6.1.7.2 CONCLUSIONES .....	233
3.6.1.8 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD APLICANDO EL MÉTODO TRL.....	234
3.6.1.8.1 PROCESAMIENTO.....	234
3.6.1.8.2 CONCLUSIONES .....	235
3.6.1.9 DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE SERVICIO UTILIZANDO EL SOFTWARE VISSIM 11.....	235
3.6.1.9.1 MICRO SIMULACIÓN .....	235
3.6.1.9.2 CONCLUSIÓN .....	258
3.6.1.10 PROPUESTAS DE MEJORAMIENTO DEL NIVEL DE SERVICIO.....	258
3.6.1.10.1 PROCESAMIENTO.....	258
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS .....</b>	<b>270</b>
<b>CAPÍTULO V. DISCUSIÓN.....</b>	<b>274</b>
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>276</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>278</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>280</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>281</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>284</b>



**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Coordenadas UTM de las aproximaciones al Ovalo Pachacutec.....5

Tabla 3: Niveles de servicio en intersecciones semaforizadas. ....29

Tabla 4: Grupos de movimientos y grupos de carril.....30

Tabla 5: Factor de ajuste para ancho de carril.....32

Tabla 6: Comparación de Categorías de Rotondas. ....37

Tabla 7: Volumen de vehículos para determinar el número de carriles de entrada  
requeridos. ....59

Tabla 8: Equivalencias de los vehículos de pasajeros.....63

Tabla 9: Rangos para los cuales el modelo lineal de Kimber es válido.....71

Tabla 10: Criterios de niveles de servicio. ....73

Tabla 11: Dimensiones clave de diseño para usuarios no-motorizados. ....75

Tabla 12: Rangos típicos de diámetro de círculo inscrito de rotonda. ....76

Tabla 13: Valores para la distancia visual de detención. ....88

Tabla 14: Tiempos de viaje en un tramo de 21 m.....116

Tabla 15: Parámetros de Wiedemann 74 de cada iteración. ....124

Tabla 16: Cuadro comparativo de datos estadísticos de campo y VISSIM para  
validación. ....125

Tabla 16: Cuadro de operacionalización. ....129

Tabla 17: Ficha de aforo vehicular de 6:00 am – 12:00pm. ....135

Tabla 18: Ficha de aforo vehicular de 12:00pm - 6:00 pm.....136

Tabla 19: Ficha de aforo vehicular de 6:00 pm - 9:00 pm.....137

Tabla 20: Ficha de aforo vehicular por entrada 7:15 am - 9:15 am.....138

Tabla 21: Ficha de aforo vehicular (origen - destino) de 7:30 am - 8:30 am. ....139

Tabla 22: Ficha de características geométricas.....140

Tabla 23: Ficha de características semafóricas.....140

Tabla 24: Ficha de señales de tránsito. ....141





Tabla 25: Ficha de aforo vehicular de 6:00 am – 12:00pm. .... 150

Tabla 26: Ficha de aforo vehicular de 12:00pm - 6:00 pm. .... 151

Tabla 27: Ficha de aforo vehicular de 6:00 pm - 9:00pm. .... 152

Tabla 28: Ficha de aforo vehicular de 6:00 am – 12:00pm. .... 153

Tabla 29: Ficha de aforo vehicular de 12:00pm - 6:00 pm. .... 154

Tabla 30: Ficha de aforo vehicular de 6:00 pm - 9:00pm. .... 155

Tabla 31: Ficha de aforo vehicular de 6:00 am – 12:00pm. .... 156

Tabla 32: Ficha de aforo vehicular de 12:00pm - 6:00 pm. .... 157

Tabla 33: Ficha de aforo vehicular de 6:00 pm - 9:00pm. .... 158

Tabla 34: Ficha de aforo vehicular de 6:00 am – 12:00pm. .... 159

Tabla 35: Ficha de aforo vehicular de 12:00pm - 6:00 pm. .... 160

Tabla 36: Ficha de aforo vehicular de 6:00 pm - 9:00pm. .... 161

Tabla 37: Ficha de aforo vehicular de 6:00 am – 12:00pm. .... 162

Tabla 38: Ficha de aforo vehicular de 12:00pm - 6:00 pm. .... 163

Tabla 39: Ficha de aforo vehicular de 6:00 pm - 9:00pm. .... 164

Tabla 40: Ficha de aforo vehicular de 6:00 am – 12:00pm. .... 165

Tabla 41: Ficha de aforo vehicular de 12:00pm - 6:00 pm. .... 166

Tabla 42: Ficha de aforo vehicular de 6:00 pm - 9:00pm. .... 167

Tabla 43: Aforo de la entrada de vehículos de la Av. 28 de Julio (izquierda). .... 171

Tabla 44: Aforo de la entrada de vehículos de la Av. 28 de Julio (derecha). .... 171

Tabla 45: Aforo de la entrada de vehículos del Jr. Mateo Pumacahua. .... 172

Tabla 46: Aforo de la entrada de vehículos de la Pj. Jorge Chavez. .... 172

Tabla 47: Aforo de la entrada de vehículos de la Av. La Paz. .... 173

Tabla 48: Aforo de la entrada de vehículos de la Av. Luis Vallejo Santoni. .... 173

Tabla 49: Aforo de la entrada de vehículos de la Av. Alameda Pachacutec. .... 174

Tabla 50: Aforo de la entrada de vehículos de la Av. Infancia. .... 174



Tabla 51: Aforo de la entrada de vehículos de la Av. Antonio de Sucre. .... 175

Tabla 52: Volumen diario del punto de aforo ..... 175

Tabla 53: Volumen horario en el punto de aforo..... 176

Tabla 54: Aforo vehicular de todas las aproximaciones para determinar el volumen horario de máxima demanda..... 181

Tabla 55: Aforo vehicular de la aproximación Av. 28 de Julio (entrada izquierda) con salida a la Av. La Paz..... 182

Tabla 56: Aforo vehicular de la aproximación Av. 28 de Julio (entrada izquierda) con salida a la Av. Infancia. .... 182

Tabla 57: Aforo vehicular de la aproximación Av. 28 de Julio (entrada izquierda) con salida a la Av. Alameda Pachacutec. .... 183

Tabla 58: Aforo vehicular de la aproximación Av. 28 de Julio (entrada izquierda) con salida a la Av. Luis Vallejo Santoni..... 183

Tabla 59: Aforo vehicular de la aproximación Av. 28 de Julio (entrada izquierda) con salida a la Av. Antonio de Sucre. .... 183

Tabla 60: Aforo vehicular de la aproximación Av. 28 de Julio (entrada izquierda) con salida a la Av. Prolog. La Paz. .... 184

Tabla 61: Aforo vehicular de la aproximación Av. 28 de Julio (entrada izquierda) con salida a la Av. Prolog. La Paz en “U” ..... 184

Tabla 62: Aforo vehicular de la aproximación Av. 28 de Julio (entrada derecha) con salida a la Av. La Paz..... 185

Tabla 63: Aforo vehicular de la aproximación Av. 28 de Julio (entrada derecha) con salida a la Av. Infancia. .... 185

Tabla 64: Aforo vehicular de la aproximación Av. 28 de Julio (entrada derecha) con salida a la Av. Alameda Pachacutec. .... 185

Tabla 65: Aforo vehicular de la aproximación Av. 28 de Julio (entrada derecha) con salida a la Av. Antonio de Sucre. .... 186

Tabla 66: Aforo vehicular de la aproximación Av. 28 de Julio (entrada derecha) con salida a la Av. Luis Vallejo Santoni..... 186



Tabla 67: Aforo vehicular de la aproximación Av. 28 de Julio (entrada derecha) con salida a la Av. Prolog. La Paz. .... 186

Tabla 68: Aforo vehicular de la aproximación Jr. Mateo Pumacahua con salida a la Av. La Paz. .... 187

Tabla 69: Aforo vehicular de la aproximación Jr. Mateo Pumacahua con salida a la Av. Infancia. .... 187

Tabla 70: Aforo vehicular de la aproximación Jr. Mateo Pumacahua con salida a la Av. Alameda Pachacutec. .... 187

Tabla 71: Aforo vehicular de la aproximación Jr. Mateo Pumacahua con salida a la Av. Antonio de Sucre. .... 188

Tabla 72: Aforo vehicular de la aproximación Jr. Mateo Pumacahua con salida a la Av. Luis Vallejo Santoni. .... 188

Tabla 73: Aforo vehicular de la aproximación Jr. Mateo Pumacahua con salida a la Av. Prolog. La Paz. .... 188

Tabla 74: Aforo vehicular de la aproximación Jr. Mateo Pumacahua con salida a la Av. 28 de Julio salida derecha. .... 189

Tabla 75: Aforo vehicular de la aproximación Jr. Mateo Pumacahua con salida a la Av. 28 de Julio salida central. .... 189

Tabla 76: Aforo vehicular de la aproximación Pj. Jorge Chavez con salida a la Av. 28 de Julio salida central. .... 190

Tabla 77: Aforo vehicular de la aproximación Pj. Jorge Chavez con salida a la Av. 28 de Julio salida derecha. .... 190

Tabla 78: Aforo vehicular de la aproximación Pj. Jorge Chavez con salida a la Av. La Paz. .... 190

Tabla 79: Aforo vehicular de la aproximación Pj. Jorge Chavez con salida a la Av. Infancia..... 191

Tabla 80: Aforo vehicular de la aproximación Pj. Jorge Chavez con salida a la Av. Alameda Pachacutec..... 191

Tabla 81: Aforo vehicular de la aproximación Pj. Jorge Chavez con salida a la Av. Antonio de Sucre. .... 191



Tabla 82: Aforo vehicular de la aproximación Pj. Jorge Chavez con salida a la Av. Luis Vallejo Santoni. .... 192

Tabla 83: Aforo vehicular de la aproximación Pj. Jorge Chavez con salida a la Av. Prolog. La Paz. .... 192

Tabla 84: Aforo vehicular de la aproximación Av. La Paz con salida a la Av. Prolog. La Paz. .... 193

Tabla 85: Aforo vehicular de la aproximación Av. La Paz con salida a la Av. Infancia. .... 193

Tabla 86: Aforo vehicular de la aproximación Av. La Paz con salida a la Av. Alameda Pachacutec. .... 193

Tabla 87: Aforo vehicular de la aproximación Av. La Paz con salida a la Av. Antonio de Sucre. .... 194

Tabla 88: Aforo vehicular de la aproximación Av. La Paz con salida a la Av. Luis Vallejo Santoni. .... 194

Tabla 89: Aforo vehicular de la aproximación Av. La Paz con salida a la Av. 28 de Julio salida derecha. .... 194

Tabla 90: Aforo vehicular de la aproximación Av. Luis Vallejo Santoni con salida a la Av. Prolog. La Paz. .... 195

Tabla 91: Aforo vehicular de la aproximación Av. Luis Vallejo Santoni con salida a la Av. 28 de Julio salida derecha. .... 195

Tabla 92: Aforo vehicular de la aproximación Av. Luis Vallejo Santoni con salida a la Av. 28 de Julio salida central. .... 195

Tabla 93: Aforo vehicular de la aproximación Av. Luis Vallejo Santoni con salida a la Av. Infancia. .... 196

Tabla 94: Aforo vehicular de la aproximación Av. Luis Vallejo Santoni con salida a la Av. Alameda Pachacutec. .... 196

Tabla 95: Aforo vehicular de la aproximación Av. Luis Vallejo Santoni con salida a la Av. Antonio de Sucre. .... 196

Tabla 96: Aforo vehicular de la aproximación Av. Luis Vallejo Santoni con salida a la Av. La Paz. .... 197



Tabla 97: Aforo vehicular de la aproximación Av. Alameda Pachacutec con salida a la Av. Antonio de Sucre. .... 197

Tabla 98: Aforo vehicular de la aproximación Av. Alameda Pachacutec con salida a la Av. Luis Vallejo Santoni. .... 197

Tabla 99: Aforo vehicular de la aproximación Av. Alameda Pachacutec con salida a la Av. Prolog. La Paz. .... 198

Tabla 100: Aforo vehicular de la aproximación Av. Alameda Pachacutec con salida a la Av. 28 de Julio salida derecha. .... 198

Tabla 101: Aforo vehicular de la aproximación Av. Alameda Pachacutec con salida a la Av. 28 de Julio salida central. .... 198

Tabla 102: Aforo vehicular de la aproximación Av. Alameda Pachacutec con salida a la Av. La Paz. .... 199

Tabla 103: Aforo vehicular de la aproximación Av. Alameda Pachacutec con salida a la Av. Infancia. .... 199

Tabla 104: Aforo vehicular de la aproximación Av. Alameda Pachacutec con salida a la Av. Alameda Pachacutec. .... 199

Tabla 105: Aforo vehicular de la aproximación Av. Antonio de Sucre con salida a la Av. Luis Vallejo Santoni. .... 200

Tabla 106: Aforo vehicular de la aproximación Av. Antonio de Sucre con salida a la Av. Prolog. La Paz. .... 200

Tabla 107: Aforo vehicular de la aproximación Av. Antonio de Sucre con salida a la Av. 28 de Julio salida derecha. .... 200

Tabla 108: Aforo vehicular de la aproximación Av. Antonio de Sucre con salida a la Av. 28 de Julio salida central. .... 201

Tabla 109: Aforo vehicular de la aproximación Av. Antonio de Sucre con salida a la Av. La Paz. .... 201

Tabla 110: Aforo vehicular de la aproximación Av. Antonio de Sucre con salida a la Av. Infancia. .... 201

Tabla 111: Aforo vehicular de la aproximación Av. Antonio de Sucre con salida a la Av. Alameda Pachacutec. .... 202



Tabla 112: Aforo vehicular de la aproximación Av. Infancia con salida a la Av. Antonio de Sucre.....202

Tabla 113: Aforo vehicular de la aproximación Av. Infancia con salida a la Av. Luis Vallejo Santoni.....202

Tabla 114: Aforo vehicular de la aproximación Av. Infancia con salida a la Av. Prolog. La Paz.....203

Tabla 115: Aforo vehicular de la aproximación Av. Infancia con salida a la Av. 28 de Julio salida Derecha. ....203

Tabla 116: Aforo vehicular de la aproximación Av. Infancia con salida a la Av. 28 de Julio salida central. ....203

Tabla 117: Aforo vehicular de la aproximación Av. Infancia con salida a la Av. La Paz.....204

Tabla 118: Composición vehicular de la Av.28 de Julio entrada derecha. ....205

Tabla 119: Composición vehicular origen – destino de la Av.28 de Julio entrada derecha. ....205

Tabla 120: Composición vehicular de la Av.28 de Julio entrada izquierda.....205

Tabla 121: Composición vehicular origen – destino de la Av.28 de Julio entrada izquierda.....205

Tabla 122: Composición vehicular de la Av. Antonio de Sucre.....206

Tabla 123: Composición vehicular origen – destino de la Av. Antonio de Sucre.....206

Tabla 124: Composición vehicular de la Av. Luis Vallejo Santoni. ....206

Tabla 125: Composición vehicular origen – destino de la Av. Luis Vallejo Santoni. ....206

Tabla 126: Composición vehicular de la Av. La Paz. ....207

Tabla 127: Composición vehicular origen – destino de la Av. La Paz.....207

Tabla 128: Composición vehicular del Pj. Jorge Chavez. ....207

Tabla 129: Composición vehicular origen – destino del Pj. Jorge Chavez.....207

Tabla 130: Composición vehicular del Jr. Mateo Pumacahua. ....208



Tabla 131: Composición vehicular origen – destino del Jr. Mateo Pumacahua. ....208

Tabla 132: Composición vehicular de la Av. Alameda Pachacutec.....208

Tabla 133: Composición vehicular origen – destino de la Av. Alameda Pachacutec.....208

Tabla 134: Composición vehicular de la Av. Infancia.....209

Tabla 135: Composición vehicular origen – destino de la Av. Infancia. ....209

Tabla 136: Factor de hora pico de la Av. 28 de Julio entrada derecha. ....219

Tabla 137: Factor de hora pico de la Av. 28 de Julio entrada izquierda.....219

Tabla 138: Factor de hora pico de la Av. Antonio de Sucre. ....219

Tabla 139: Factor de hora pico de la Av. Luis Vallejo Santoni. ....220

Tabla 140: Factor de hora pico de la Av. La Paz. ....220

Tabla 141: Factor de hora pico del Pj. Jorge Chavez. ....220

Tabla 142: Factor de hora pico del Jr. Mateo Pumacahua. ....220

Tabla 143: Factor de hora pico de la Av. Alameda Pachacutec.....221

Tabla 144: Factor de hora pico de Av. Infancia. ....221

Tabla 145: Características geométricas de la Av. Alameda Pachacutec. ....222

Tabla 146: Características geométricas de la Av. Antonio de Sucre.....222

Tabla 147: Características geométricas de la Av. Luis Vallejo Santoni.....222

Tabla 148: Características geométricas del Pj. Jorge Chavez.....222

Tabla 149: Características geométricas de la Av. 28 de Julio entrada izquierda. ...223

Tabla 150: Características geométricas de la Av. 28 de Julio entrada derecha. ....223

Tabla 151: Características geométricas del Jr. Mateo Pumacahua. ....223

Tabla 152: Características geométricas de la Av. La Paz.....223

Tabla 153: Características geométricas de la Av. Infancia. ....224

Tabla 154: Características semafóricas de la Av. Alameda Pachacutec.....224

Tabla 155: Características semafóricas Pj. Jorge Chavez.....224





Tabla 156: Características semafóricas de la Av. 28 de Julio entrada.....225

Tabla 157: Características semafóricas del Jr. Mateo Pumacahua. ....225

Tabla 158: Características semafóricas de la Av. 28 de Julio salida.....225

Tabla 159: Características semafóricas de la Av. Alameda Pachacutec salida. ....226

Tabla 160: Tabla de inventario de señales de tránsito.....226

Tabla 161: Capacidad vial y congestión vehicular del Pj. Jorge Chavez. ....228

Tabla 162: Capacidad vial y congestión vehicular de la Av. 28 de Julio entrada  
derecha. ....229

Tabla 163: Capacidad vial y congestión vehicular de la Av. 28 de Julio entrada  
izquierda.....230

Tabla 164: Capacidad vial y congestión vehicular del Jr. Mateo Pumacahua. ....231

Tabla 165: Capacidad vial y congestión vehicular del Av. Alameda Pachacutec. ....232

Tabla 166: Capacidad vial y congestión vehicular del Av. Infancia. ....233

Tabla 167: Capacidad de la entrada de la Av. Antonio de Sucre.....234

Tabla 168: Capacidad de la entrada Av. Luis Vallejo Santoni.....235

Tabla 169: Relación volumen-capacidad de las aproximaciones.....235

Tabla 170: Longitudes de cola tomadas en campo para calibrar.....240

Tabla 171: Longitudes de cola para una corrida - prueba N°1.....240

Tabla 172: Comparación de los valores tomados en campo y del VISSIM 11. ....241

Tabla 173: Longitudes de cola tomadas en campo para validar. ....243

Tabla 174: Longitudes de cola tomadas en campo para calibrar.....245

Tabla 175: Longitudes de cola para una corrida - prueba N°24.....245

Tabla 176: Comparación de los valores tomados en campo y del VISSIM 11. ....246

Tabla 177: Longitud de colas para validación.....248

Tabla 178: Datos de tiempo de viaje recolectados de campo.....250

Tabla 179: Datos de tiempo de viaje del VISSIM 11.....251

Tabla 180: Evaluación por nodos de cada aproximación.....257





Tabla 181: Evaluación por nodos de cada aproximación.....257

Tabla 182: Evaluación por nodos de la propuesta N°1. ....260

Tabla 183: Evaluación por nodos de la propuesta N°1. ....260

Tabla 184: Evaluación por nodos de la propuesta N°2. ....262

Tabla 185: Evaluación por nodos de la propuesta N°2. ....263

Tabla 186: Evaluación por nodos de la propuesta N°3. ....265

Tabla 187: Evaluación por nodos de la propuesta N°3. ....265

Tabla 188: Evaluación por nodos de la propuesta N°4. ....267

Tabla 189: Evaluación por nodos de la propuesta N°4. ....267

Tabla 190: Evaluación por nodos de la propuesta N°5. ....268

Tabla 191: Evaluación por nodos de la propuesta N°5. ....269

Tabla 192: Resumen de los flujos vehiculares origen-destino. ....270

Tabla 193: Resumen de la relación volumen-capacidad de las aproximaciones. ...270

Tabla 194: Resumen actual de los ciclos semafóricos de las aproximaciones de la zona de estudio. ....271

Tabla 195: Resumen de los ciclos semafóricos de las aproximaciones de la propuesta N°01. ....271

Tabla 196: Resumen de los ciclos semafóricos de las aproximaciones de la propuesta N°02. ....271

Tabla 197: Resumen de los ciclos semafóricos de las aproximaciones de la propuesta N°03. ....272

Tabla 198: Resumen de los ciclos semafóricos de las aproximaciones de la propuesta N°04. ....272

Tabla 199: Resumen de los ciclos semafóricos de las aproximaciones de la propuesta N°05. ....272

Tabla 200: Resumen de Longitudes de cola, niveles de servicio y demoras de las propuestas de rediseño. ....273



**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1: Situación actual del "Óvalo Pachacutec", hora: 7:45 am. ....2

Figura 2: Giros a la izquierda en el "Óvalo Pachacutec", hora: 7:50 am. ....2

Figura 3: Conflicto entre el flujo entrante de la Av. Antonio de Sucre y los  
vehículos circulantes, hora: 8:07 am. ....3

Figura 4: Conflictos entre el flujo entrante de la Av. Alameda Pachacutec y la  
salida a la Av. Antonio de Sucre, hora: 8:11 am. ....3

Figura 5: Conflictos entre la los flujos entrantes de la Av. 28 de Julio, Jr. Mateo  
Pumacahua y Pje. Jorge Chavez, hora: 7:55 am. ....4

Figura 6: Longitud de colas entrando a la aproximación Av. Antonio de Sucre,  
hora: 8:16 am. ....4

Figura 7: Mapa de Ubicación Nacional. ....6

Figura 8: Mapa de Ubicación Regional. Fuente: Elaboración propia – ArcGis 10.5  
.....7

Figura 9: Mapa de Ubicación Provincial. ....8

Figura 10: Zona de investigación – Mapa Distrital. ....9

Figura 11: Características de una Minirrotonda Típica. ....38

Figura 12: Características de una Rotonda Multicarril Típica.....39

Figura 13: Rotonda en Clearwater, Florida.....46

Figura 14: El tren cruza un ramal de la intersección - barras en todas las  
aproximaciones. ....51

Figura 15: El tren cruza un ramal de la intersección - barra sólo en el carril de  
aproximación. ....52

Figura 16: Rotonda Lujiazui en Shanghai - China. ....56

Figura 17: Geometría Inusual de la rotonda Colville - Washington .....57

Figura 18: Rotonda poco espaciada en Buffalo – New York.....58

Figura 19: Flujos de tránsito en una entrada de rotonda. ....59

Figura 20: Cálculo del caudal circulante. ....62



Figura 21: Cálculo del flujo de salida..... 63

Figura 22: Construcción geométrica para hallar el valor de  $\phi$ ..... 67

Figura 23: Construcción geométrica para hallar el valor de  $\phi$ ..... 68

Figura 24: Parámetros geométricos de una rotonda..... 68

Figura 25: Construcción geométrica para hallar el valor de  $l$ . .... 69

Figura 26: Ovalo irregular Los Delfines con 5 entradas con 4 salidas en Lima. .... 70

Figura 27: Parámetros geométricos del método TRL. .... 72

Figura 28: Desplazamiento del alineamiento hacia la izquierda del centro. .... 77

Figura 29: Alineamiento a través del Centro de la rotonda. .... 78

Figura 30: Alineamiento a la derecha del centro..... 79

Figura 31: Ramales perpendiculares..... 80

Figura 32: Ramales perpendiculares..... 81

Figura 33: Dimensiones mínimas de la isleta partidora. .... 82

Figura 34: Diseño de entrada a rotonda de un solo carril. .... 84

Figura 35: Diseño de salida de una rotonda de un solo carril. .... 85

Figura 36: Distancia visual de detención en la aproximación..... 89

Figura 37: Distancia visual de detención en la calzada circulatoria. .... 89

Figura 38: Distancia visual de paso peatonal en la salida. .... 89

Figura 39: Distancia visual de intersección..... 90

Figura 40: Rotonda con ángulo mejorado como mínimo  $75^\circ$ . .... 91

Figura 41: Líneas entre carriles de entrada. .... 92

Figura 42: Esquema de modelo computacional de sistemas complejos. .... 102

Figura 43: Ilustración del periodo de calentamiento. .... 119

Figura 44: Representación gráfica adaptada al modelo de seguimiento vehicular  
de Wiedemann 74. .... 120

Figura 45: Figura de test de aleatorización (Randomization test) para la  
validación – Software Stat-key. .... 126



Figura 46: Proceso del método científico..... 131

Figura 47: Flujograma del diseño de ingeniería..... 132

Figura 48: Ubicación de la estación total para proceder al levantamiento topográfico. .... 143

Figura 49: Movimiento vehicular de la aproximación Pj. Jorge Chavez. .... 144

Figura 50: Movimiento vehicular de la aproximación Av. 28 de Julio. .... 144

Figura 51: Movimiento vehicular de la aproximación Jr. Mateo Pumacahua..... 145

Figura 52: Movimiento vehicular de la aproximación Av. La Paz. .... 145

Figura 53: Movimiento vehicular de la aproximación Av. Infancia..... 146

Figura 54: Movimiento vehicular de la aproximación Av. Alameda Pachacutec..... 146

Figura 55: Movimiento vehicular de la aproximación Av. Antonio de Sucre..... 147

Figura 56: Movimiento vehicular de la aproximación Av. Luis Vallejo Santoni.. ..... 147

Figura 57: Determinación del punto de aforo vehicular..... 148

Figura 58: Centro de monitoreo de seguridad ciudadana de la Municipalidad de Santiago. .... 149

Figura 59: Controlador de drone MAVIC PRO y un drone PHANTOM 3 4K. .... 169

Figura 60: Controlador de drone en el momento de la grabación. .... 169

Figura 61: Vista aérea desde 250 m con drone PHANTOM 3 4K. .... 170

Figura 62: Vista aérea desde 250 m de la zona de estudio tomada a 7:55 am..... 170

Figura 63: Variación de volumen diario en el punto de aforo. .... 176

Figura 64: Variación horaria del día lunes. .... 177

Figura 65: Variación horaria del día martes..... 177

Figura 66: Variación horaria del día miércoles..... 178

Figura 67: Variación horaria del día jueves. .... 178

Figura 68: Variación horaria del día viernes. .... 179

Figura 69: Variación horaria del día sábado. .... 179

Figura 70: Variación horaria del día martes vs sábado..... 180



Figura 71: Diagrama del volumen vehicular por aproximación para determinar el volumen horario de máxima demanda..... 181

Figura 72: Clasificación vehicular en tres tipos de vehículos. ....204

Figura 73: Diagrama de la composición vehicular origen – destino de la Av. 28 de Julio entrada derecha. ....210

Figura 74: Diagrama de la composición vehicular (porcentaje) origen – destino de la Av. 28 de Julio entrada derecha. ....210

Figura 75: Diagrama de la composición vehicular origen – destino de la Av. 28 de Julio entrada izquierda.....211

Figura 76: Diagrama de la composición vehicular (porcentaje) origen – destino de la Av. 28 de Julio entrada izquierda. ....211

Figura 77: Diagrama de la composición vehicular origen – destino de la Av. Antonio de Sucre.....212

Figura 78: Diagrama de la composición vehicular (porcentaje) origen – destino de la Av. Antonio de Sucre. ....212

Figura 79: Diagrama de la composición vehicular origen – destino de la Av. Luis Vallejo Santoni. ....213

Figura 80: Diagrama de la composición vehicular (porcentaje) origen – destino de la Av. Luis Vallejo Santoni. ....213

Figura 81: Diagrama de la composición vehicular origen – destino de la Av. La Paz.....214

Figura 82: Diagrama de la composición vehicular (porcentaje) origen – destino de la Av. La Paz. ....214

Figura 83: Diagrama de la composición vehicular origen – destino del Pj. Jorge Chavez. ....215

Figura 84: Diagrama de la composición vehicular (porcentaje) origen – destino del Pj. Jorge Chavez. ....215

Figura 85: Diagrama de la composición vehicular origen – destino del Jr. Mateo Pumacahua. ....216



Figura 86: Diagrama de la composición vehicular (porcentaje) origen – destino del Jr. Mateo Pumacahua.....216

Figura 87: Diagrama de la composición vehicular origen – destino de la Av. Alameda Pachacutec.....217

Figura 88: Diagrama de la composición vehicular (porcentaje) origen – destino de la Av. Alameda Pachacutec. ....217

Figura 89: Diagrama de la composición vehicular origen – destino de la Av. Infancia.....218

Figura 90: Diagrama de la composición vehicular (porcentaje) origen – destino de la Av. Infancia. ....218

Figura 91: Plano topográfico insertado en el VISSIM 11. ....236

Figura 92: Lista de links por aproximación. ....236

Figura 93: Ancho y número de carriles de las aproximaciones.....237

Figura 94: Volúmenes vehiculares determinados en intervalos de 15 minutos.....237

Figura 95: Composición vehicular. ....237

Figura 96: Ciclo semafórico intersección. Av. Alameda Pachacutec y Av. Infancia. ....238

Figura 97: Volumen para cada ruta. ....238

Figura 98: Ruta origen-destino Pj. Jorge Chavez- Av. Antonio de Sucre.....239

Figura 99: Prioridad en el sentido de circulación av. 28 de Julio Av. Alameda Pachacutec.....239

Figura 100: Prueba de aleatorización al 95% de confiabilidad.....242

Figura 101: Datos insertados en el programa StatKey. ....242

Figura 102: Prueba de aleatorización al 95% de confiabilidad.....244

Figura 103: Datos insertados en el programa StatKey. ....244

Figura 104: Prueba de aleatorización al 95% de confiabilidad.....247

Figura 105: Datos insertados en el programa StatKey. ....247

Figura 106: Prueba de aleatorización al 95% de confiabilidad.....249



Figura 107: Datos insertados en el programa StatKey. ....249

Figura 108: Datos insertados al Statkeys. ....252

Figura 109: Figura 106: Prueba de aleatorización al 95% de confiabilidad. ....252

Figura 110: Condiciones de evaluación por nodo. ....253

Figura 111: Configuración de los parámetros de simulación. ....253

Figura 112: Evaluación por nodo del modelamiento. ....254

Figura 113: Vista en 3D del modelo simulado. ....254

Figura 114: Vista en 3D de los giros en la Av. La Paz. ....255

Figura 115: Vista en 3D de los conflictos de la entrada de la Av. Alameda Pachacutec y los vehículos circulantes. ....255

Figura 116: Vista en 3D de los conflictos entre Av. 28 de Julio (ambas entradas), Pj. Jorge Chavez, Jr. Mateo Pumacahua. ....256

Figura 117: Vista en 2D del modelo. ....256

Figura 118: Ciclos semafóricos de la Av. Alameda Pachacutec y Av. Infancia. ....259

Figura 119: Ciclos semafóricos de la Av. 28 de Julio y Pj. Jorge Chavez. ....259

Figura 120: Ciclos semafóricos de la intersección Av. La Paz (salida). ....259

Figura 121: Propuesta N°1 .....259

Figura 122: Propuesta N° 2. ....261

Figura 123: Ciclos semafóricos de la Av. Alameda y intersección de la Av. Alameda-Av. Infancia. ....261

Figura 124: Ciclos semafóricos de la Av. 28 de Julio, Jr. Mateo Pumacahua y Pj. Jorge Chavez. ....262

Figura 125: Propuesta N° 3. ....264

Figura 126: Ciclos semafóricos de la Av. Alameda y intersección de la Av. Alameda-Av. Infancia. ....264

Figura 127: Ciclos semafóricos de la Av. 28 de Julio, Jr. Mateo Pumacahua y Pj. Jorge Chavez. ....264

Figura 128: Propuesta N° 4. ....266



Figura 129: Ciclos semafóricos de la Av. Alameda y intersección de la Av.  
Alameda-Av. Infancia. ....266

Figura 130: Ciclos semafóricos de la Av. 28 de Julio, Jr. Mateo Pumacahua y Pj.  
Jorge Chavez. ....267

Figura 131: Propuesta N°05.....268





## CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

#### 1.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Es conocida la situación actual del crecimiento automotor en la ciudad del Cusco, que genera mayor congestión en el tránsito vehicular y por lo tanto niveles de servicio bajos, este hecho se ve reflejado en el Óvalo Pachacutec, el cual en hora pico tiene un embotellamiento vehicular en las aproximaciones y dentro del óvalo.

En la actualidad el Ovalo Pachacutec presenta solo intersecciones a nivel con tiempo para el paso de vehículos marcador por los semáforos, los cuales ocasionan demoras ya que los tiempos de espera en algunos casos son muy prolongados.

El diseño geométrico actual presenta una rotonda cuya prioridad en los giros es con el sentido de la izquierda, las intersecciones de las aproximaciones al óvalo están reguladas por semáforos, estos por los tiempos de espera que en algunos casos son muy prolongados generando así congestión vehicular en las aproximaciones y por lo tanto en el Óvalo Pachacutec.

Las rutas de los vehículos que entran al “Óvalo Pachacutec” complican la circulación dentro de este generando colas en las mismas y otras aproximaciones.

Para mejorar el nivel de servicio en el óvalo Pachacutec se pretende analizar el flujo vehicular y congestión vehicular para optimizar el nivel de servicio de las aproximaciones que concurren en este óvalo, con la finalidad de encontrar el problema de congestión que a las vías de este óvalo.



Figura 1: Situación actual del "Óvalo Pachacutec", hora: 7:45 am.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura N°1 muestra los conflictos actuales en el "Óvalo Pachacutec" y sus aproximaciones.



Figura 2: Giros a la izquierda en el "Óvalo Pachacutec", hora: 7:50 am.

Fuente: Elaboración propia.

Los giros a la izquierda de los vehículos como se muestra en la Figura N° 2 generan conflictos con los vehículos circulantes, por ende generan colas, complicando así la circulación dentro del "Óvalo Pachacutec".





Figura 3: Conflicto entre el flujo entrante de la Av. Antonio de Sucre y los vehículos circulantes, hora: 8:07 am.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura N° 3 se observa que los vehículos no respetan el número de carriles generando así un desorden entre los vehículos que entran de la Av. Antonio de Sucre y los que circulan en el "Óvalo Pachacutec".



Figura 4: Conflictos entre el flujo entrante de la Av. Alameda Pachacutec y la salida a la Av. Antonio de Sucre, hora: 8:11 am.

Fuente: Elaboración propia.



En la Figura N° 4 se observa los conflictos de la Av. Alameda Pachacutec y los vehículos circulantes, ambas se encuentran semaforizadas, sin embargo existe conflicto entre ellas.



Figura 5: Conflictos entre los flujos entrantes de la Av. 28 de Julio, Jr. Mateo Pumacahua y Pje. Jorge Chavez, hora: 7:55 am.

Fuente: Elaboración propia.

Las aproximaciones Av. 28 de Julio (ambas entradas), Jr. Mateo Pumacahua y Pje. Jorge Chavez generan conflictos al entrar al "Óvalo Pachacutec" así mismo al salir, en dicho punto se tiene un desorden por el número de carriles los cuales cuentan con hasta 6 filas de vehículos.



Figura 6: Longitud de colas entrando a la aproximación Av. Antonio de Sucre, hora: 8:16 am.

Fuente: Elaboración propia.



Las colas generadas por los vehículos al salir hacia la Av. Antonio de Sucre obstruyen la circulación de los vehículos entrantes de la Av. Alameda Pachacutec, afectando el la circulación de los vehículos en el cambio a verde de la Av. Alameda Pachacutec.

### 1.1.1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

- La zona de investigación se ubica en el límite de los distritos de Santiago y Wanchaq de la provincia y departamento del Cusco en la intersección a Nivel tipo ovalo denominado “Óvalo Pachacutec” que comprende 9 aproximaciones las cuales son:
- Av. Alameda Pachacutec, Av. Infancia, Av. La Paz, Av. Prolog. La Paz, Jr. Mateo Pumacahua, Pj. Jorge Chavez, Av. Luis Vallejo Santoni, Av. Antonio de Sucre, Av. 28 de Julio.
- La zona de investigación comprende una extensión de 40,000.00 m<sup>2</sup>.
- Se considera la ubicación en coordenadas UTM de las aproximaciones y del “Ovalo Pachacutec” en el siguiente cuadro:

Tabla 1: Coordenadas UTM de las aproximaciones al Ovalo Pachacutec.

AVENIDAS	ZONA	ESTE	NORTE
Ovalo Pachacutec	19 L	178666.00 m E	8502117.00 m S
Av. Alameda Pachacutec	19 L	178627.00 m E	8502169.00 m S
Av. Infancia	19 L	178661.00 m E	8502180.00 m S
Av. La Paz	19 L	178761.00 m E	8502128.00 m S
Jr. Mateo Pumacahua	19 L	178823.00 m E	8502135.00 m S
Pj. Jorge Chavez	19 L	178825.00 m E	8502049.00 m S
Av. Luis Vallejo Santoni	19 L	178687.00 m E	8502054.00 m S
Av. 28 de Julio	19 L	178857.00 m E	8502098.00 m S
Av. Antonio de Sucre.	19 L	178582.00 m E	8502103.00 m S

Fuente: Elaboración Propia.

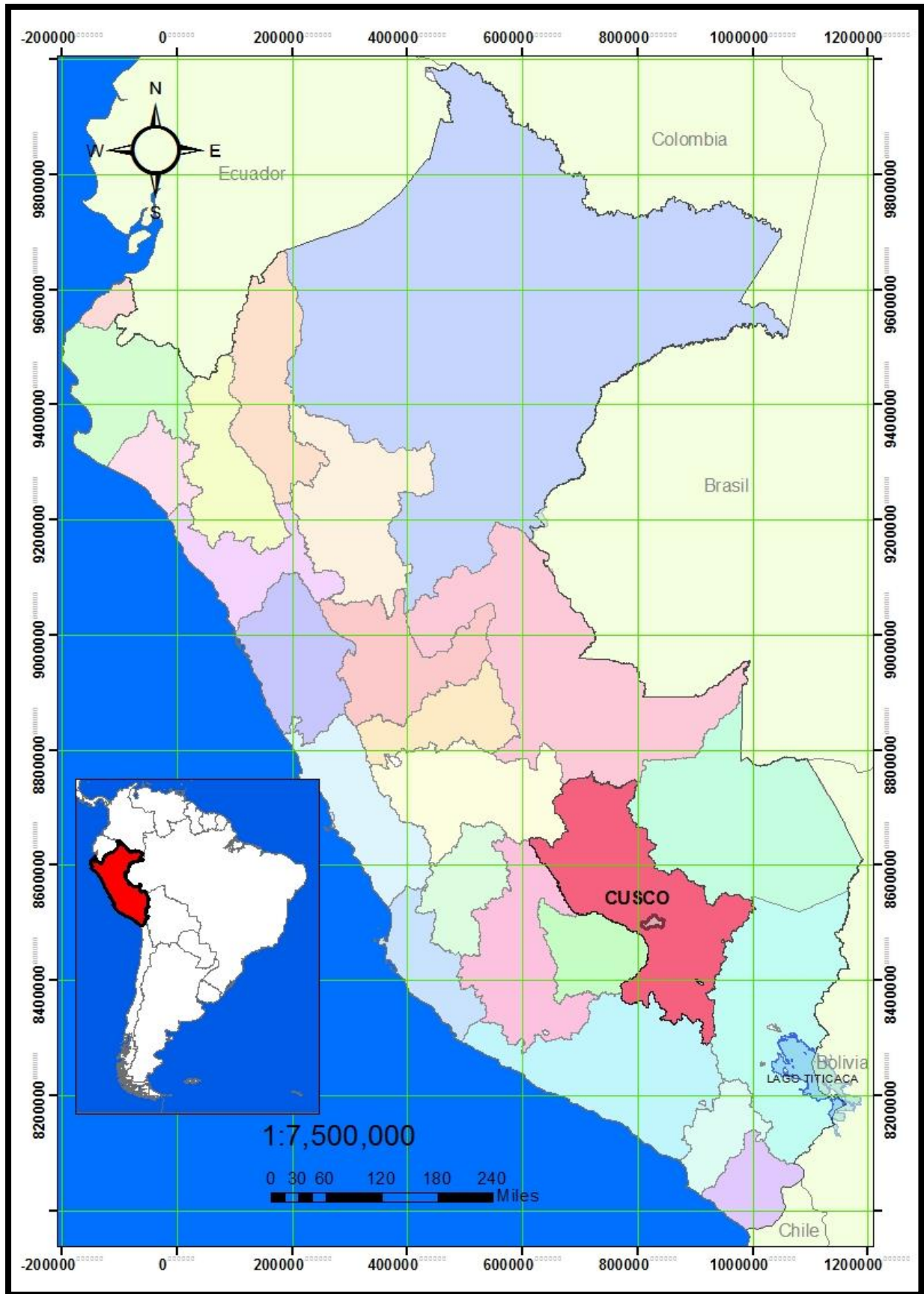


Figura 7: Mapa de Ubicación Nacional.

Fuente: Elaboración propia – ArcGis 10.5.



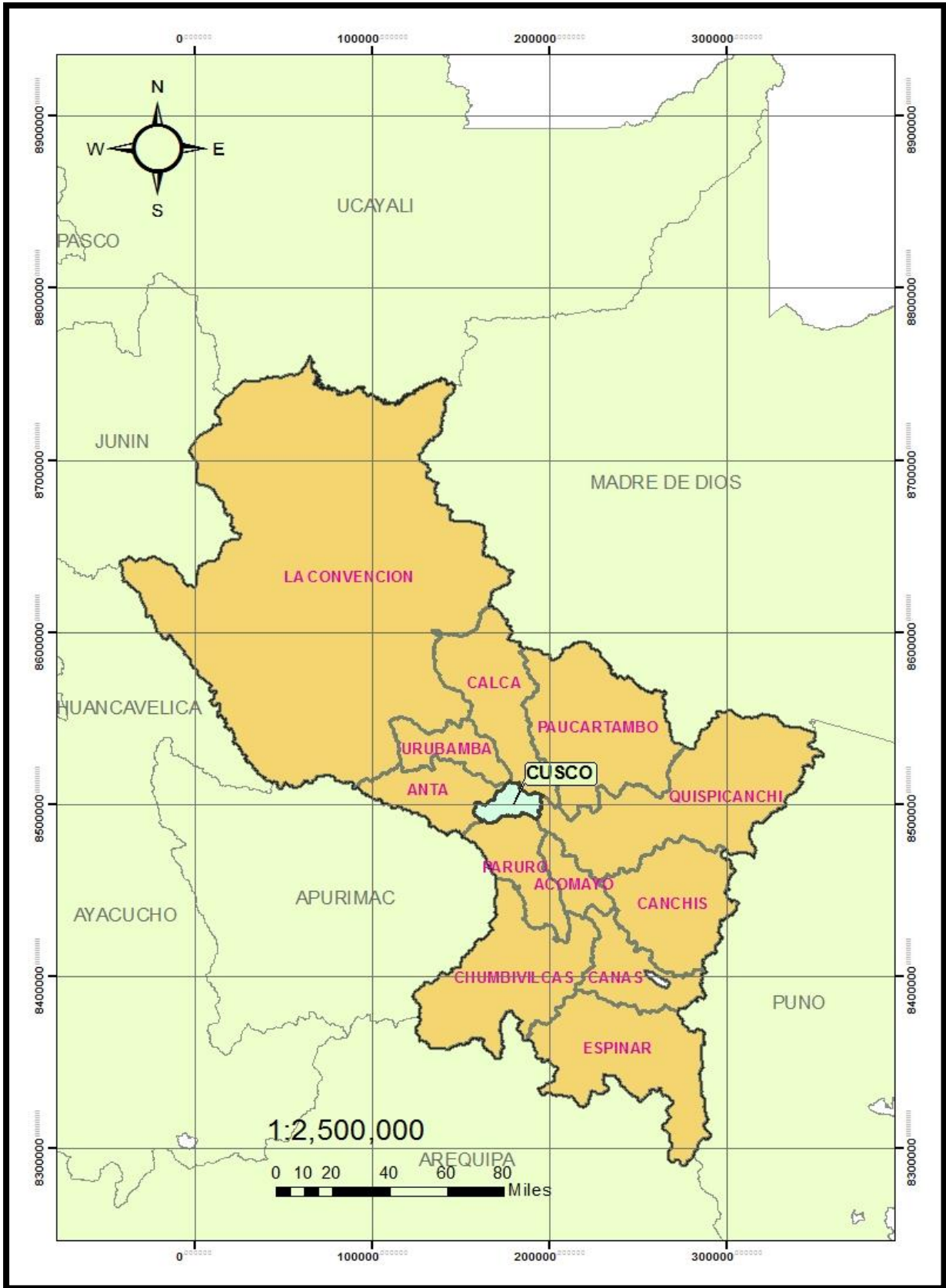


Figura 8: Mapa de Ubicación Regional. Fuente: Elaboración propia – ArcGis 10.5

Fuente: Elaboración propia – ArcGis 10.5.

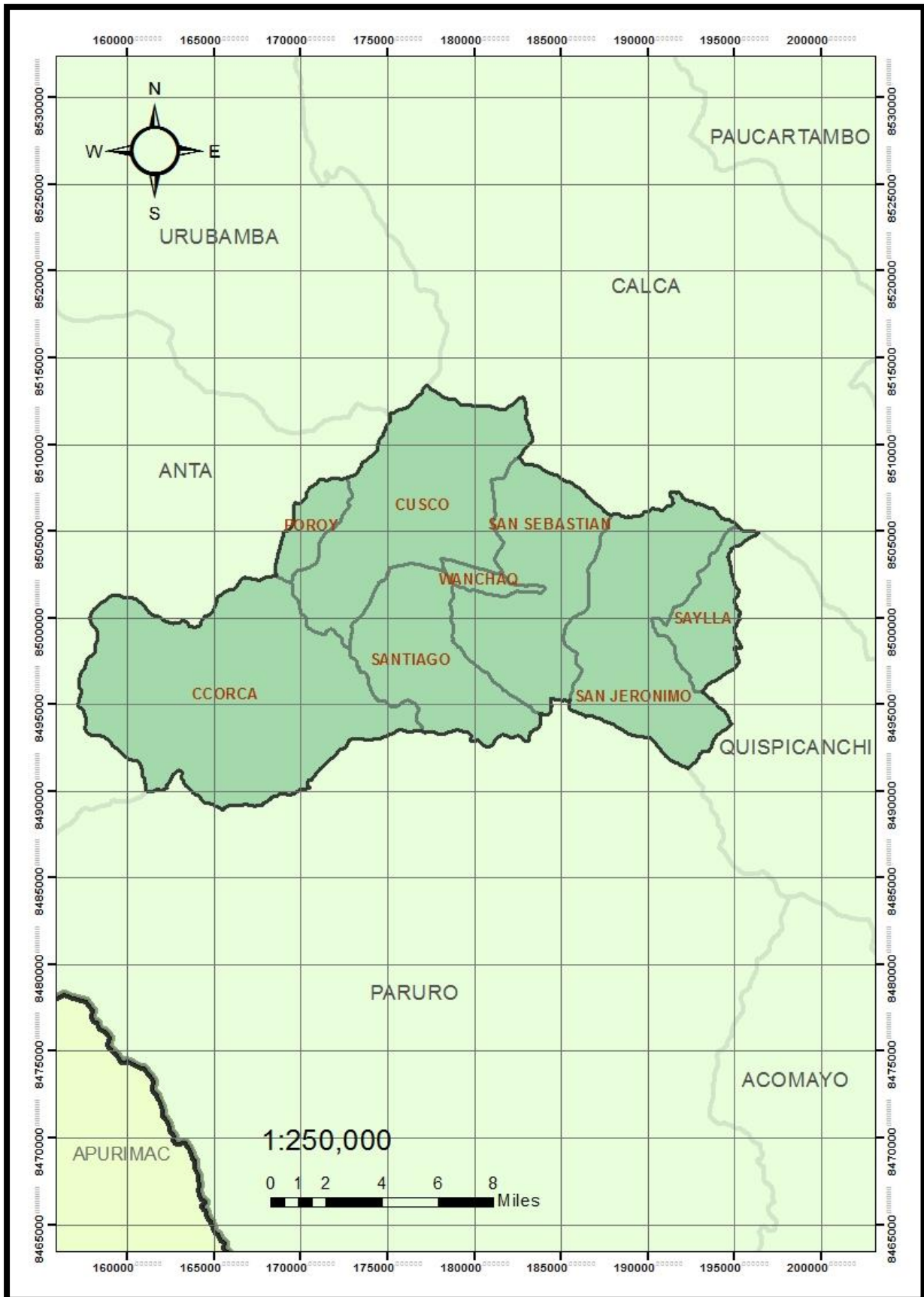


Figura 9: Mapa de Ubicación Provincial.

Fuente: Elaboración propia – ArcGis 10.5.



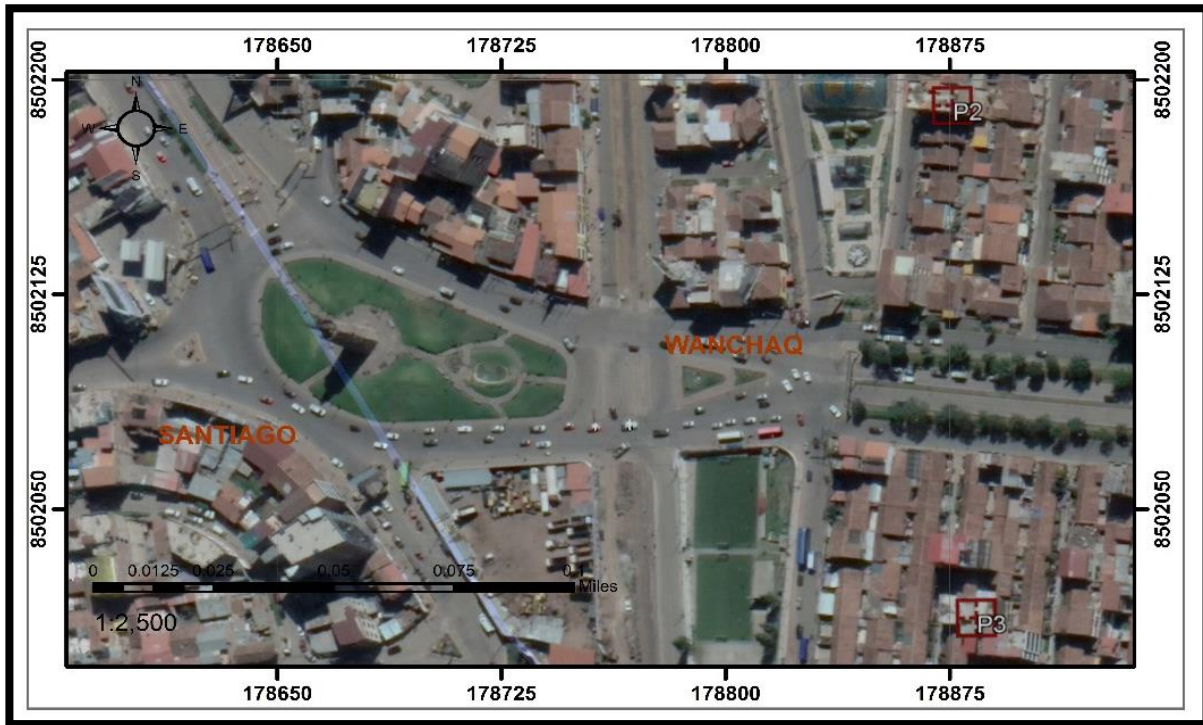


Figura 10: Zona de investigación – Mapa Distrital.

Fuente: Elaboración propia –Google Earth - ArcGis 10.5

## 1.1.2 FORMULACIÓN INTERROGATIVA DEL PROBLEMA

### 1.1.2.1 FORMULACIÓN INTERROGATIVA DEL PROBLEMA GENERAL

¿Cuál es la capacidad de la intersección a nivel tipo Óvalo Pachacutec de la ciudad del Cusco?

### 1.1.2.2 FORMULACIÓN INTERROGATIVA DE LOS PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- **PROBLEMA ESPECIFICO N°1**

¿Cuál es el flujo de las aproximaciones al Ovalo Pachacutec?

- **PROBLEMA ESPECÍFICO N°2**

¿Cuál es la congestión vehicular (relación volumen-capacidad) en el Ovalo Pachacutec?

- **PROBLEMA ESPECÍFICO N°3**

¿Cuál es la operación de las intersecciones semaforizadas del Óvalo Pachacutec?

- **PROBLEMA ESPECÍFICO N°4**

¿Cómo son las modificaciones geométricas de las intersecciones que integran el "Óvalo Pachacutec"?



## **1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.2.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA**

Se plantearán alternativas de solución para mejorar el nivel de servicio del Óvalo Pachacutec, para el cual se determinarán el flujo vehicular, la capacidad y la congestión vehicular, para luego poder analizar los resultados obtenidos y finalmente proponer soluciones de rediseño geométrico simulado. Para esta investigación se cuenta con manuales y normas internacionales (Highway Capacity Manual 2010, National Cooperative Highway Research Program REPORT 672, Transport Research Laboratory).

### **1.2.2 JUSTIFICACIÓN SOCIAL**

Con la presente investigación se pretende mejorar el nivel de servicio del “Óvalo Pachacutec” en beneficio de los usuarios que circulan dentro de este punto de la ciudad, disminuyendo los tiempos de circulación dentro de este y mejorando los niveles de servicio de las aproximaciones al óvalo. Es por eso que se desarrolló la presente investigación, para dar propuestas de solución en mejora de las condiciones de confort de los usuarios.

### **1.2.3 JUSTIFICACIÓN POR VIABILIDAD**

La investigación es viable ya que se cuenta con los equipos necesarios para la realización del tema de investigación, también se cuenta con los instrumentos metodológicos (La metodología HCM 2010), equipos de ingeniería para el levantamiento topográfico de la zona de investigación (GPS, estación total, prisma, wincha), equipos para las mediciones de las tomas de muestras en campo (cámaras filmadoras, cámaras fotográficas, drones, cronómetros).

### **1.2.4 JUSTIFICACIÓN POR RELEVANCIA**

En nuestra ciudad la actual cantidad de vehículos, el crecimiento del parque automotor y la capacidad de las vías vienen ocasionando congestión vehicular en las principales intersecciones de la ciudad del Cusco.

El presente tema de investigación va enfocado a solucionar este problema, de ahí la importancia de este. En nuestro país no se encuentran muchas investigaciones referidas a este tema. Mediante la presente tesis se propondrán soluciones



geométricas de tipo rotonda las cuales no son muy estudiadas en nuestro país, para el cuál se utilizará la norma internacional (HCM 2010).

Los resultados de esta investigación podrán ser utilizados para la elaboración de proyectos de mejoramiento de la infraestructura vial para el tramo de estudio.

### **1.3 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.3.1 LIMITACIONES POR ESPACIO**

El presente estudio se limita al estudio del Óvalo Pachacutec y las aproximaciones a este.

- Óvalo Pachacutec
- Av. Alameda Pachacutec
- Av. Infancia
- Av. Antonio de Sucre.
- Av. Luis Vallejo Santoni
- Av. Prolog. La Paz
- Pj. Jorge Chavez
- Av. 28 de Julio
- Jr. Mateo Pumacahua
- Av. La Paz

#### **1.3.2 LIMITACIONES POR TIEMPO**

El aforo vehicular para determinar el volumen diario de máxima demanda se realizó del lunes 15 al sábado 20 de Octubre del 2018 en los horarios de 6:00 am a 21:00 pm.

La investigación se limita a determinar el volumen horario de máxima demanda el día 06 de Noviembre del 2018 de 7:30 am. a 8:30 am.

#### **1.3.3 LIMITACIONES POR DATOS**

El trabajo en campo para obtención de datos, como son los aforos vehiculares, así mismo con el apoyo del levantamiento topográfico se pudo determinar las características geométricas del Óvalo Pachacutec.

En todas las alternativas propuestas en donde el flujo vehicular es ininterrumpido se asume que los peatones cruzan las vías de forma adecuada respetando las señales de tránsito, para ello no se consideró el volumen peatonal para la investigación.



Los datos serán simulados en el Software VISSIM 11.

### **1.3.4 LIMITACIONES POR FUENTES DE BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS**

En determinar la Capacidad, Congestión vehicular, Nivel de servicio y características de diseño de rotondas se utilizó el manual norteamericano (Highway Capacity Manual 2010, National Cooperative Highway Research Program REPORT 672 y Transport Research Laboratory)

## **1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL.**

Plantear un rediseño de la intersección del Óvalo Pachacutec de la ciudad del Cusco.

### **1.4.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS**

- **OBJETIVO ESPECÍFICO N°1**

Determinar el flujo de las aproximaciones al "Óvalo Pachacutec".

- **OBJETIVO ESPECÍFICO N°2**

Determinar el grado de saturación (relación volumen-capacidad) de las aproximaciones al "Óvalo Pachacutec"

- **OBJETIVO ESPECÍFICO N°3**

Determinar la operatividad de la semaforización existente, en las Intersecciones a nivel en el "Óvalo Pachacutec" y sus aproximaciones.

- **OBJETIVO ESPECÍFICO N°4**

Plantear alternativas de geometría para las intersecciones que integran el "Óvalo Pachacutec".



## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 ANTECEDENTES DE LA TESIS

#### 2.1.1 ANTECEDENTES A NIVEL LOCAL

**TITULO:** Evaluación de los niveles de servicio, diseño geométrico en la intersección a nivel Óvalo Martín Chambi.

**POR:** Franco Bayona, Mayra Haymed, Quina Espinoza, Willington

**Tesis para optar el título de Ingeniero Civil**

**AÑO:** 2017

**INSTITUCIÓN:** UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

#### RESUMEN

La presente tesis, plantea la evaluación de los niveles de servicio actuales de la intersección a nivel Óvalo Martín Chambi en función de parámetros medibles, para proponer soluciones de rediseño geométrico midiendo las variables que se presentan en la zona de estudio. Para el presente trabajo se identifica el problema existente en la intersección que es la congestión vial, con el objetivo de evaluar los niveles de servicio, seguidamente se verifican algunos antecedentes existentes, después se procede al uso de herramientas para la recolección de datos de campo, para finalmente determinar los Niveles de Servicio, y con los resultados obtenidos plantear alternativas de cambio de Diseño Geométrico, para mejorar los Niveles de Servicio cuyos resultados se analizarán con el uso de manuales técnicos nacionales, internacionales y software especializado. Al evaluar la situación actual de la intersección a Nivel Óvalo Martín Chambi, se obtuvo Nivel de Servicio "E" resultados que nos llevaron a proponer cuatro alternativas de rediseños geométricos que se simularon en el programa PTV VISSIM 9 versión estudiantes, alcanzando niveles de servicio excelentes con las propuestas de rediseño geométrico tipo rotondas. Llegando a la conclusión que una alternativa de rediseño tipo rotonda para las avenidas Agustín Gamarra, Ejército y San Martín es la más adecuada a un corto plazo, otra alternativa de rediseño fue la implementación de un bypass que une directamente las avenidas Ejército con Alameda Pachacúteq y viceversa considerando esta una alternativa a largo plazo.



## CONCLUSIONES

- Se ha podido demostrar la hipótesis general, ya que al evaluar la situación actual de la intersección a nivel Óvalo Martín Chambi, nos arrojó Niveles de Servicio basados en los indicadores que son: control de demora y longitud de colas los siguientes resultados:
- Se logró cumplir con el Objetivo ESPECÍFICO Nro. 1 de la presente investigación que indicaba: “Identificar las Características Geométricas a Nivel Óvalo Martín Chambi y sus aproximaciones”; concluyendo que esta no cumple con el funcionamiento de una rotonda, ya que presenta giros a la izquierda de la Av. Agustín Gamarra hacia la Av. Ejército, y la existencia de Dispositivos de Control de Tránsito “Semáforos”.
- Se logró cumplir con el Objetivo ESPECÍFICO Nro. 2 de la presente investigación que indica:
  - “Obtener los Volúmenes en las Aproximaciones de la Intersección a Nivel Óvalo Martín Chambi”; concluyendo que existe un cierto equilibrio entre los tráficos procedentes de las distintas vías confluyentes y que es recomendable la utilización de Rotondas.
- Se logró cumplir con el Objetivo ESPECÍFICO Nro. 3 de la presente investigación que indica: “Analizar la Capacidad Vial en cada aproximación de la Intersección a Nivel Óvalo Martín Chambi”.
- Concluyendo que la capacidad vial en la Intersección a Nivel Óvalo Martín Chambi es menor al flujo vehicular en las aproximaciones de las Avenidas Alameda Pachacúteq y San Martín lo cuál es la causa de congestión vehicular en esta Intersección.
- Se logró cumplir con el Objetivo ESPECÍFICO Nro. 4 de la presente investigación que indica: “Analizar los Ciclos de Semaforización existente en la Intersección a Nivel Óvalo Martín Chambi y sus Aproximaciones”.
- Con la presente investigación se concluye, que la Intersección a Nivel Óvalo Martín Chambi opera mejor con la propuesta
- Se logró cumplir con el Objetivo ESPECÍFICO Nro. 5 de la presente investigación que indica: “Proponer alternativas de Cambio Geométrico tipo Rotonda en la Intersección a Nivel Óvalo Martín Chambi, para optimizar el Nivel de Servicio Actual en cada aproximación”.





## **APORTE DE LA TESIS**

De la presente investigación se tomará en cuenta las modificaciones geométricas a nivel y desnivel realizadas (incremento del diámetro de circunferencia, crear un óvalo adjunto y paso a desnivel) en el Ovalo Martín Chambi como alternativa de solución para mejorar el nivel de servicio en cada aproximación a dicho Óvalo.

### **2.1.2 ANTECEDENTES A NIVEL NACIONAL**

**TITULO: “REDISEÑO DEL ÓVALO DE NARANJAL”**

**POR: Jesús Arturo Guzmán Balcazar**

**Tesis para optar el título de Ingeniero Civil**

**AÑO: 2015**

**INSTITUCIÓN: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

#### **RESUMEN**

El gran incremento de la flota vehicular hace que el tránsito en Lima cada vez sea más caótico, sobre todo en los Conos que es donde habita la mayor población. Un ejemplo claro es lo que ocurre en el óvalo Naranjal, donde las inmensas colas son pan de cada día. Por ello, este proyecto de tesis trata de buscar la solución más simple y económica para esta intersección en especial.

El primer objetivo es la de rediseñar geoméricamente el óvalo, por ello se tuvo que buscar la información teórica necesaria para poder cumplir con ello. Sin embargo, debido a que en el Perú los conocimientos de óvalos son pobres, se tuvo que buscar información en distintas fuentes extranjeras, sobre todo en norteamericanas e inglesas.

El presente estudio hizo un análisis de campo en el cual se pudo obtener los flujos vehiculares y peatonales, las colas y el tiempo aproximado para cruzar la intersección. Además, se pudo analizar las posibles causas del congestionamiento en el óvalo y con ello sus posibles soluciones. Una vez obtenido todos los datos necesarios en campo, se analizaron distintas opciones de solución, ya sean con softwares determinísticos o a través de micro-simulación. En los primeros se comparaba el funcionamiento a través de los niveles de servicio que daban como resultado cada aproximación y la intersección después de ejecutar los posibles cambios de mejora.



Para el segundo se utilizaron los parámetros mencionados, colas y demoras, con los cuales se pudo ir regulando y obtener el ciclo óptimo para un correcto funcionamiento después de varias corridas del programa.

Por último, se opta por la solución más viable y que de resultados con mejoras en el funcionamiento de la intersección.

### **CONCLUSIONES:**

- Los programas determinísticos no son de mucha ayuda en este tipo de casos, no se puede obtener resultados satisfactorios, sino que sigue mostrando que la intersección no funciona con los aspectos más óptimos que se les pueda colocar (diámetro de la circunferencia inscrita, velocidad de entrada, etc.). Esto se demuestra en los programas Sidra Intersection 5.1 y en Synchro 8; ambos dieron resultados con niveles de servicio realmente bajos ("F"), por lo que se demuestra que este tipo de softwares no son los adecuados para buscar una solución de la intersección.
- De manera distinta se pudo observar el programa de micro-simulación (PTV VISSIM 6), en este se pudo analizar de forma detallada el comportamiento de los vehículos a través de varias simulaciones, cada vez una mejor que la anterior por el análisis que se le pudo dar.
- De acuerdo a la hipótesis planteada al inicio, se verifica que efectivamente el óvalo trabaja de forma ineficiente y no permite un correcto flujo vehicular ni peatonal. Se demuestra que haciendo cambios simples y económicos, en este caso el uso de semáforos, se puede mejorar el nivel de servicio y funcionamiento de la intersección.
- El cambio de geometría del óvalo no pudo dar resultados favorables de acuerdo a los programas determinísticos, pero usando simulación se pudo llegar a los resultados esperados.

### **APORTE DE LA TESIS**

El aporte de la tesis anterior, es que el uso de programas determinísticos no son favorables para la investigación (SYNCHRO 8.0 Y SIDRA INTERSECTION 5.1) sin embargo se logra tener mejores resultados realizando una simulación (PTV VISSIM 6) y las modificaciones de los ciclos semafóricos como alternativa de solución simple y económica sobre las modificaciones geométricas.





**TÍTULO: “MICRO-SIMULACIÓN INTERMODAL EN LA CIUDAD DEL CUSCO EMPLEANDO LOS SOFTWARE VISSIM 8 Y WISWALK 8.”**

**POR: Jordy Wilber Alvarez Vargas**

**Tesis para optar el título de Ingeniero Civil**

**AÑO: 2017**

**INSTITUCIÓN: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

## **RESUMEN**

El proyecto de ingeniería a desarrollar consta del estudio de una intersección ubicada en la ciudad de Cusco entre los distritos de Wanchaq y Cusco Cercado con el fin de evaluar las condiciones de los usuarios dentro de la misma. La evaluación se realizará mediante un modelo microscópico de tráfico (intersección), para luego presentar propuestas de mejoras a la situación inicial.

El análisis se realizará a través de los softwares computacionales VISSIM 8.0 y Viswalk 8.0. Estos programas son capaces de simular el tráfico vehicular y peatonal de una zona de interés específico basándose en los datos recolectados en campo (flujo vehicular, flujo peatonal, ciclos de semáforos, geometría, etc.).

Para llevar a cabo este modelamiento, se procede a recrear la intersección virtualmente en los programas mencionados con todos los datos obtenidos en campo. Para conseguir la mayor similitud posible a la realidad, el modelo debe ser calibrado una vez terminado el procesamiento de datos. Esta calibración consta de ajustes numéricos entre la realidad y el modelo. En el caso de este estudio, se tomará en cuenta como parámetros de evaluación las longitudes de cola, la demora promedio y la velocidad promedio. Posteriormente, se procede a la validación del modelo, para lo cual se cambian los datos iniciales por nuevos datos de campo. Una vez terminado el modelo se procede a evaluar los parámetros de eficiencia y se propondrán alternativas según los resultados obtenidos. Estas pueden ser variaciones en términos de ciclos del semáforo hasta un rediseño vial si así ameritara el caso.

## **CONCLUSIONES**

- Se plantearon tres propuestas de mejora. Cada una de ellas con una distinción en la forma de lograr una solución a la situación actual de la intersección estudiada. Se eligió la tercera porque se contaba con todos los datos necesarios



para realizar un correcto análisis de la misma, mientras que en las otras propuestas existía carencia de datos o limitaciones de espacio para desarrollarlas.

- Por otra parte, de los resultados obtenidos del análisis de fases y ciclos de los semáforos se obtuvo que la idea inicial de mejora, que consistía en incluir 3 ciclos distintos a los semáforos de la intersección quedó descartada. Esto debido a que, al realizar la simulación con esta característica, se llegaba a resultados, por ejemplo, en las longitudes de cola, similares al modelo sin aplicar esta modificación.
- Se destaca que es de gran importancia la recolección de datos de campo; ya que estos representan la base del análisis a realizar. Si se tuviera fallos o malinterpretaciones de estos datos la evaluación de la zona de estudio puede llegar a ser completamente diferente a la situación real. Por lo tanto, es recomendable realizar la toma de datos con el soporte de personas con experiencia y con conocimientos del tema.

### **APORTE DE LA TESIS**

De la tesis anterior se tomará en cuenta el procedimiento de calibración y validación del modelo realizado en el PTV VISSIM, planteado en la norma The Federal Highway Administration, donde se tomó en cuenta el tiempo de viaje en un tramo determinado para calibrarlo después con los datos reales tomados en campo.

### **2.1.3 ANTECEDENTES A NIVEL INTERNACIONAL**

**TÍTULO: “Evaluación de la capacidad en rotondas, en función de la optimización de su diseño geométrico basado en un aumento de la seguridad. Caso de estudio Cuenca”**

**POR: Hugo Esteban Ortega Guaricela.**

**Tesis de Maestría**

**AÑO: 2017**

**INSTITUCIÓN: ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL INSTITUTO POLITÉCNICO DE LEIRIA**



## RESUMEN

El Ecuador no dispone de una norma de diseño geométrico para rotondas acorde con la actualidad internacional. La norma vigente utiliza criterios para la generación de parámetros geométricos y para el cálculo de la capacidad que fueron descartados en Estados Unidos y Europa en los 60s. Esta situación ha generado la construcción de intersecciones heterogéneas con problemas en la operación y la seguridad. Este documento presenta una investigación bibliográfica que tiene como principal objetivo la comparación de cinco normas o manuales de diseño geométrico para rotondas en áreas urbanas. Se analizaron los parámetros que se utilizan como medida para disminuir y homogenizar las velocidades de circulación y su impacto en el nivel de servicio y capacidad. Las rotondas son por lo general puntos críticos para el tráfico en la ciudad de Cuenca, ya que sirven como solución para la intersección de carreteras primarias. En función de los parámetros recomendados se rediseñó 2 intersecciones de la ciudad. Las nuevas soluciones proporcionaron una mejora del 60% al 90% de los parámetros de diseño de acuerdo con normas internacionalmente aceptadas. Las velocidades de circulación se reducen potencialmente producto del aumento en la deflexión. En términos de capacidad, se evidenció un pequeño aumento el cual redujo las demoras, mejorando levemente el nivel de servicio. Por lo tanto, y en resumen, los parámetros y rediseños propuestos para el diseño geométrico deberían reducir el riesgo y gravedad de los accidentes sin afectar negativamente las características operacionales. Este trabajo puede constituir un punto de referencia para el desarrollo de guías de diseño geométrico adaptadas para el Ecuador, esto proporcionará grandes beneficios para la calidad de los diseños futuros y la seguridad vial en el país.

## CONCLUSIONES:

- Las normas vigentes para el diseño geométrico en el Ecuador actualmente utilizan criterios para el diseño y cálculo de la capacidad de las intersecciones tipo rotondas, que han sido descartados a nivel mundial hace aproximadamente 50 años.
- Los factores geométricos se encuentran involucrados en el 60% de los accidentes, especialmente por un exceso del radio de deflexión, radio de entrada, radio de salida, ancho de carril de circulación y ancho de carril de entrada.



- En la secuencia del análisis de cinco normas/recomendaciones sobre el diseño geométrico de rotondas, se han propuesto 29 parámetros para el diseño geométrico de rotondas simples y múltiples ubicadas en zonas urbanas, los cuales buscan disminuir la velocidad de circulación, aumentando de este modo la seguridad.
- Las rotondas son puntos críticos en la ciudad de Cuenca tanto en su nivel de accidentalidad, como en el congestionamiento; por lo que un mal diseño de la misma genera un perjuicio sustancial a los usuarios, reflejándose en un aumento de accidentes y demoras excesivas en los vehículos.
- Al evaluar dos rotondas en la zona urbana de la ciudad de Cuenca, se observa como actualmente las intersecciones no cumplen con los parámetros geométricos propuestos, lo que causa una velocidad de circulación alta, aumentando así el riesgo de accidentes; también se ha visto que los parámetros geométricos que actualmente poseen las intersecciones en análisis son heterogéneos, generando así que los usuarios no se familiaricen con la conducción en las rotonda y produciendo un rechazo para la implementación de nuevas rotondas en la ciudad.
- El rediseño de las intersecciones mejoró el cumplimiento de los parámetros geométricos, con lo cual es posible disminuir los accidentes; se ha visto, igualmente, que el área necesaria para este rediseño es igual o menor al área que actualmente ocupa la intersección.
- Se recomienda utilizar los parámetros geométricos propuestos en esta investigación, tanto para el diseño de nuevas rotondas, como para la rectificación geométrica de rotondas existentes dentro de las zonas urbanas.

### **APOORTE DE LA TESIS**

De la tesis se tomará en cuenta la comparación normativa de EEUU (HCM 2010), Portugal (Manual de planeamiento das Acessibilidades e da Gestão Viária), Reino Unido (Design Manual for Roads and Bridges) y España (Guía de nudos Varios); comprobando que el HCM 2010 se adecua a las características de Cuenca Ecuador cuya ciudad tiene características topográficas similares a Cusco.



## 2.2 ASPECTOS TEÓRICOS PERTINENTES

### 2.2.1 CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE SISTEMAS VIALES

Los cuatro sistemas funcionales de vialidades para áreas urbanas son:

#### a) Vías Expresas

Las vías expresas establecen relación entre el sistema interurbano y el sistema vial urbano, sirven principalmente para el tránsito de paso, unen zonas de elevada generación de tráfico transportando grandes volúmenes de vehículos con circulación a alta velocidad y bajas condiciones de accesibilidad, sirven para largos viajes entre grandes áreas de vivienda y concentraciones industriales. (MTC, 2018)

#### b) Vías Arteriales.

Las vías arteriales permiten el tránsito vehicular, con media o alta fluidez, baja accesibilidad y relativa integración con el uso del suelo colindante. Estas vías deben ser integradas dentro del sistema de vías expresas y permitir una buena distribución y repartición del tráfico a las vías colectoras y locales. (MTC, 2018)

#### c) Vías Colectoras

Las vías colectoras sirven para llevar en tránsito de las vías locales a las arteriales y en algunos casos a las vías expresas cuando no es posible hacerlo por intermedio de las vías arteriales. Dan servicio tanto al tránsito de paso, como hacia las propiedades adyacentes, pueden ser colectoras distritales o interdistritales. (MTC, 2018)

#### d) Vías locales

Son aquellas cuya función principal es proveer a los predios o lotes, debiendo llevar únicamente su tránsito propio, generando tanto de ingreso como de salida, por ella transitan vehículos livianos, ocasionalmente semipesados; se permite el estacionamiento vehicular y existe tránsito peatonal irrestricto. Las vías locales son conectadas entre ellas y con las vías.” (MTC, 2018)

### 2.2.2 DISPOSITIVOS PARA EL CONTROL

Se denominan dispositivos para el control del tránsito a las señales, marcas, semáforos y otro cualquier dispositivo que se colocan sobre o adyacente a las calles y carreteras por una autoridad pública, para prevenir, regular y guiar a los usuarios de



las mismas. Los dispositivos de control indican a los usuarios las precauciones (prevenciones) que deben tener en cuenta, las limitaciones (restricciones) que gobiernan el tramo en circulación y las informaciones (guías) estrictamente necesarias, dada las condiciones específicas de la calle o carretera. (Cal Mayor, R. & Cardenas Grisales, J., 2007)

Los dispositivos para el control del tránsito en calles y carreteras se clasifican en:

**a. Señales verticales**

**b. Señales horizontales**

**c. Dispositivos para protección en obras**

**d. Semáforos:**

- Vehiculares
- Peatonales
- Especiales (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

### **2.2.3 TRANSITO VEHICULAR**

Es el fenómeno ocasionado por la presencia de flujos vehiculares en una avenida, calle o autopista, la presencia de estas hace que se generen situaciones como las denominadas congestiones por el exceso de su capacidad, en nuestra ciudad es común ver este tipo de fenómenos, es así que para poder obtener datos de campo es necesario mencionar algunos conceptos como: (Transportation Research Board, 2010)

#### **2.2.3.1 VOLUMEN DE TRÁNSITO.**

Los estudios sobre volúmenes de tránsito son realizados con el objetivo de obtener información de volúmenes vehiculares sobre determinados puntos dentro de un sistema vial, el volumen de tránsito se define como: El volumen total durante un período de tiempo dado (en días completos), mayor que un día y menor que un año dividido entre el número de días en ese período. (Transportation Research Board, 2010)

Sin embargo también se define que “En ingeniería de tránsito, la medición básica más importante es el conteo o aforo ya sea de vehículos, ciclistas, pasajeros y/o peatones. Los conteos se realizan para obtener estimaciones de:



- Volumen
- Tasa de flujo
- Demanda
- Capacidad (Transportation Research Board, 2010)

Estas estimaciones mantienen una relación importante entre si y se expresan en los mismos sistemas de unidad o parecidos, que por lo general no son las mismas. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

El volumen, la tasa de flujo, demanda y capacidad se definen como:

- El volumen.- es el número de vehículos(o personas) que pasan por un punto durante un tiempo específico. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)
- La tasa de flujo.-Es la frecuencia a la cual pasan los vehículos o personas durante un tiempo específico menor a una hora, expresada como una tasa horaria equivalente. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)
- La demanda.-Es el número de vehículos (o personas) que viajan y pasan por un punto durante un tiempo específico. Donde existe congestión, la demanda es mayor que el volumen actúa, ya que en algunos viajes se desvían a rutas alternas y otros simplemente no se realizan debido a las restricciones del sistema vial. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)
- La capacidad.- Es el número máximo de vehículos que pueden pasar por un punto durante un tiempo específico. Es una característica del sistema vial y representa su oferta. En un punto, el volumen actual nunca puede ser mayor que su capacidad real, sin embargo, hay situaciones en las que parece que esto ocurre debido a la capacidad estimada o calculada mediante algún procedimiento y no observada directamente en campo. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

Como puede observarse, la demanda es una medida de vehículos (o personas) que esperan ser servidos, distinto de los que son servidos (volumen) y de los que pueden ser servidos (capacidad). (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

Cuando la demanda es menor que la capacidad, el volumen es igual a la demanda, por lo que los conteos o aforos que se realicen, son mediciones de la demanda existente (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)





La tasa de flujo, la demanda así como la capacidad, dependen mucho de los estudios de volumen de usuarios (vehículos) realizados, de su conocimiento depende el desarrollo estimativo de la calidad del servicio prestado a los usuarios. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

### **2.2.3.2 VOLÚMENES DE TRANSITO HORARIOS**

Se definen los siguientes volúmenes de tránsito:

#### **a) Volumen horario máximo anual (VHMA)**

Máximo volumen horario que pasan por un punto o sección de un carril, es la hora de mayor volumen de las 8760 horas del año. Los volúmenes de tránsito son ampliamente utilizados para la planeación, proyecto, usos comerciales, seguridad e investigación por tanto los tránsito promedios son los necesarios para determinar la cantidad de vehículos dentro de un periodo de tiempo ya sean por día, semanales, mensuales, anuales. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

#### **b) Volumen horario de máxima demanda (VHMD)**

Es el máximo número de vehículos que pasan por un punto o secciones del carril durante 60 minutos consecutivos. Las variaciones de volúmenes en ciertos horarios en algunas intersecciones, avenidas y calles, son diferentes, esto por el incremento o disminución de volumen existente por el cambio de horario, para determinar planeaciones, operaciones en necesario mencionar que el VHMD en los diversos puntos es muy necesaria. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

#### **c) Volumen horario de proyecto. (VHP)**

Como los volúmenes de demanda en el año de diseño van a variar de hora en hora, es preciso escoger uno de esos volúmenes como volumen horario de diseño (VHD). Para vías urbanas sugiere que para cada semana del año de diseño se estime el valor del máximo volumen en las horas picos (diarias) y se designe el VHD como el promedio de esos valores. El volumen horario de proyecto de manera general son las determinadas en periodos elevados que encuentra el ingeniero para estimar valores de demanda que varía constantemente y que va cambiando por lo general aumentando a lo largo del tiempo. (ASSHTO., 1994)





### **2.2.3.3 VARIACIÓN DEL VOLUMEN DE TRÁNSITO EN LA HORA DE MÁXIMA DEMANDA**

El valor obtenido de un volumen horario de máxima demanda, no necesariamente es constante a lo largo de toda la hora, existen periodos dentro de la hora donde las tasas de flujo son mayores a la de la hora misma. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

Para hacer un análisis de las variaciones de volumen de tráfico en la hora de máxima demanda se utiliza el factor horario de máxima demanda que relaciona el volumen horario de máxima demanda con el flujo máximo. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

Es una medida de la fluctuación de la demanda de tráfico dentro de la hora de análisis. (Transportation Research Board, 2010)

El PHF es la relación entre el volumen total por hora y el caudal máximo dentro de la hora, y se calcula mediante la siguiente fórmula para un periodo de 15 minutos: (Transportation Research Board, 2010)

$$PHF = \frac{V}{4 \times V_{15}}$$

Donde:

$PHF$  = Factor de hora pico.

$V$  = Volumen de vehículos durante el periodo de 1 hora.

$V_{15}$  = Volumen pico durante el periodo de 15 minutos. (Transportation Research Board, 2010)

### **2.2.3.4 VELOCIDAD**

#### **2.2.3.4.1 VELOCIDAD EN GENERAL**

En general el término velocidad es la relación entre el espacio recorrido y el tiempo que se tarda en recorrerlo. Es decir, para un vehículo representa su relación de movimiento, generalmente expresada en (km/h). (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

La velocidad es la distancia recorrida en un periodo de tiempo determinado, por lo general a mucho nos importa la velocidad que mantenga el vehículo en que las



personas viajan, pues de ella depende la rapidez y prontitud con que puedan llegar al destino de su viaje y en muchos casos su seguridad personal deja de ser importante.

Es bien sabido que la velocidad, se expresa comúnmente en kilómetros por hora y a veces en metros por segundo. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

Velocidad y seguridad son sinónimos de la categoría de la carretera. La velocidad es el factor primordial en todos los sistemas de transporte y la velocidad a que circulan los vehículos por una vía es un índice importante a tomarse en cuenta al establecer las especificaciones de diseño, pues a ella están ligados elementos el peralte y la distancia de visibilidad, los cuales determinan los valores de la curvatura horizontal y vertical de la carretera. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

Para el caso de una velocidad constante esta se define como función lineal expresada por la fórmula:

$$v=d/t$$

Dónde:

v= velocidad constante (kilómetros por hora).

d= distancia recorrida (kilómetros).

t= tiempo de recorrido (horas)

(Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

Conceptos de velocidades para los análisis a realizar, como:

**a) Velocidad puntual.-** Velocidad instantánea de un vehículo cuando pasa por un punto de una vía. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

**b) Velocidad de recorrido.-** Es el cociente que resulta de dividir el espacio andado por un vehículo entre el tiempo que ha tardado en recorrerlo. Es realmente una velocidad media individual. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

**c) Velocidad de marcha.-** Relación entre la distancia recorrida por un vehículo y el tiempo durante el cual el vehículo ha estado en movimiento al recorrer esa distancia. No tiene en cuenta el tiempo en que pudiera haber estado detenido el vehículo. Es también una velocidad media individual. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)



Para determinar velocidad de recorrido; se deberá incluir todo lo referente a paradas, dispositivos de control y demás que detengan por algún periodo el flujo vehicular.

Se define velocidad de diseño como: La máxima velocidad segura y cómoda que puede ser mantenida en un tramo determinado de una vía, cuando las condiciones son tan favorables, que las características geométricas de la vía predominan. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

## 2.2.4 ANÁLISIS DEL FLUJO VEHICULAR

Mediante los elementos del flujo vehicular podemos entender características y diversos comportamientos, estos son requisitos mínimos para la planeación, operación de un sistema de transporte. Mencionaremos algunos conceptos necesarios para determinar algunas características fundamentales del flujo vehicular.

Flujo ininterrumpido.- Autopistas, camino multicarril, camino de dos carriles. (Transportation Research Board, 2010).

## 2.2.5 NIVEL DE SERVICIO EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS

El “Nivel de Servicio” NDS se puede caracterizar por la intersección completa, cada aproximación de intersección y cada grupo de carril. El retardo de control solo se utiliza para caracterizar NDS para la intersección completa o un acercamiento. La demora de control y la relación de volumen a capacidad se utilizan para caracterizar NDS para un grupo de carril. La demora cuantifica el aumento en el tiempo de viaje debido al control de la señal de tráfico. También es una medida sustituta de la incomodidad del conductor y el consumo de combustible. La relación de volumen a capacidad cuantifica el grado en que la capacidad de una fase es utilizada por un grupo de carriles. Los siguientes párrafos describen cada NDS.

**NDS A** describe las operaciones con un retardo de control de 10 s / veh o menos y una relación de volumen a capacidad no mayor que 1.0. Este nivel generalmente se asigna cuando la relación volumen-capacidad es baja y cualquiera de las progresiones es excepcionalmente favorable o la duración del ciclo es muy corta. Si se debe a una progresión favorable, la mayoría de los vehículos llegan durante la indicación verde y viajan a través de la intersección sin detenerse.

**NDS B** describe las operaciones con retardo de control entre 10 y 20 s / veh y una relación de volumen a capacidad no mayor que 1.0. Este nivel generalmente se asigna



cuando la relación volumen-capacidad es baja y cualquiera de las progresiones es altamente favorable o la duración del ciclo es corta. Más vehículos paran que con NDS A.

**NDS C** describe operaciones con retardo de control entre 20 y 35 s / veh y una relación de volumen a capacidad no mayor que 1.0. Este nivel suele asignarse cuando la progresión es favorable o la duración del ciclo es moderada. Las fallas del ciclo individual (es decir, uno o más vehículos en cola no pueden salir debido a una capacidad insuficiente durante el ciclo) pueden comenzar a aparecer en este nivel. El número de vehículos que se detienen es significativo, aunque muchos vehículos aún pasan por la intersección sin detenerse.

**NDS D** describe las operaciones con retardo de control entre 35 y 55 s / veh y una relación de volumen a capacidad no mayor que 1.0. Este nivel generalmente se asigna cuando la relación volumen-capacidad es alta y cualquiera de las progresiones es inefectiva o la duración del ciclo es larga. Muchos vehículos se detienen y se notan fallas en los ciclos individuales.

**NDS E** describe operaciones con retardo de control entre 55 y 80 s / veh y una relación de volumen a capacidad no mayor que 1.0. Este nivel generalmente se asigna cuando la relación volumen-capacidad es alta, la progresión es desfavorable y la duración del ciclo es larga. Las fallas del ciclo individual son frecuentes.

**NDS F** describe las operaciones con un retardo de control superior a 80 s / veh o una relación de volumen a capacidad superior a 1,0. Este nivel generalmente se asigna cuando la relación volumen-capacidad es muy alta, la progresión es muy pobre y la duración del ciclo es larga. La mayoría de los ciclos no pueden borrar la cola.

Un grupo de carriles puede incurrir en una demora de menos de 80 s / veh cuando la relación de volumen a capacidad excede de 1.0. Esta condición suele ocurrir cuando la duración del ciclo es corta, la progresión de la señal es favorable, o ambas cosas. Como resultado, tanto la demora como la relación volumen-capacidad se consideran cuando se establece el grupo de carril NDS. Una relación de 1.0 o más indica que la capacidad del ciclo se utiliza completamente y representa una falla desde la perspectiva de la capacidad (al igual que la demora en exceso de 80 s / veh representa una falla desde la perspectiva de la demora).

Tabla 2: Niveles de servicio en intersecciones semaforizadas.

Control de Demora (s/veh)	Nivel de Servicio en Función a la Proporción Volumen/Capacidad	
	$\leq 1.0$	$> 1.0$
$\leq 10$	A	F
$> 10-20$	B	F
$> 20-35$	C	F
$> 35-55$	D	F
$> 55-80$	E	F
$> 80$	F	F

Fuente: adaptado de Transportation Research Board, 2010.

### 2.2.6 CAPACIDAD VIAL

La capacidad de un sistema es el número máximo de entidades que pueden ser procesadas por unidad de tiempo. De allí que, la congestión ocurre porque el sistema tiene una capacidad limitada y porque la demanda colocada y el proceso mismo no tienen un mismo carácter aleatorio. (Massachusetts, London, England, 1984).

La capacidad vial es un determinado número de usuarios (vehículos) para la cual está diseñando una infraestructura vial, en un lapso de tiempo en donde se pueden acomodar o circular los distintos vehículos en una zona urbana, carretera y demás a fines, en donde podemos medir su servicio de acuerdo al nivel de servicio que corresponda. (Cárdenas Grisales & Reyes Spíndola, 2007)

Los elementos usados para medir la capacidad y los niveles de servicio son las variables cuyos valores los obtendremos de los datos disponibles existentes en el campo. (Transportation Research Board, 2010)

#### 2.2.6.1 METODOLOGÍA HCM PARA CALCULAR LA CAPACIDAD EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS

- **Paso 1.** Determinar grupos de movimiento y grupos de carril.
- **Paso 2.** Determine la tasa de flujo del grupo de movimiento.
- **Paso 3.** Determine la tasa de flujo del grupo de carriles.
- **Paso 4.** Determine la tasa de flujo de saturación ajustada.
- **Paso 5.** Determine la capacidad y la relación volumen-capacidad.

(Transportation Research Board, 2010)

**Paso 1. Determinar grupos de movimiento y grupos de carril.**

Tabla 3: Grupos de movimientos y grupos de carril

Número de Carriles	Movimiento por Carriles	Grupos de Movimientos (GM)	Grupos de carriles (GC)
1	Derecha, de frente e izquierda:	GM1:	GC1:
2	Exclusivo a la izquierda: De frente y derecha:	GM1: GM2:	GC1: GC2:
3	Izquierda y de frente: De frente y derecha:	GM1:	GC1: GC2:
4	Exclusivo a la izquierda: Exclusivo a la izquierda: De frente: De frente: De frente y derecha:	GM1: GM2:	GC1: GC2: GC3:

Fuente: adaptado de Transportation Research Board, 2010.

**Paso 2. Determine la tasa de flujo del grupo de movimiento.**

El flujo para cada grupo de movimiento se determina en este paso. Si un movimiento de giro es servido por uno o más carriles exclusivos y no carriles compartidos, el flujo de movimiento se asigna a un grupo de movimiento. Cualquiera de los flujos de enfoque que aún no se han asignado a un grupo de movimientos (siguiendo la aplicación de la guía en la oración anterior) se asigna a un grupo de movimientos. (Transportation Research Board, 2010)

**Paso 3. Determine la tasa de flujo del grupo de carriles**

El flujo de grupo de carril se determina en este paso. Si no hay carriles compartidos en el enfoque de intersección o si el enfoque tiene solo un carril, existe una



correspondencia de uno a uno entre los grupos de carril y los grupos de movimiento. En esta situación, la tasa de flujo del grupo de vías es igual a la tasa de flujo del grupo de movimiento. (Transportation Research Board, 2010)

#### **Paso 4. Determine la tasa de flujo de saturación ajustada**

La tasa de flujo de saturación ajustada para cada carril de cada grupo de carril se calcula en este paso. La tasa de flujo de saturación base proporcionada como una variable de entrada se usa en este cálculo. (Transportation Research Board, 2010)

La tasa de flujo de saturación calculada se conoce como la tasa de flujo de saturación "ajustada" porque refleja la aplicación de varios factores que ajustan la tasa de flujo de saturación de base a las condiciones específicas presentes en el enfoque de intersección del sujeto. (Transportation Research Board, 2010)

$$S = S_o f_w f_{HV} f_g f_p f_{bb} f_a f_{LU} f_{LT} f_{RT} f_{Lpb} f_{Rpb}$$

$S$  = flujo de saturación ajustado (veh/h/ln).

$S_o$  = tasa de flujo de saturación de la base (veh/h/ln).

$f_w$  = factor de ajuste para el ancho del carril.

$f_{HV}$  = factor de ajuste para vehículos pesados en flujo de tráfico.

$f_g$  = factor de ajuste para el grado (pendiente) de aproximación.

$f_p$  = factor de ajuste para la existencia de un carril de estacionamiento y actividad de estacionamiento adyacente al grupo de carril.

$f_{bb}$  = factor de ajuste para el efecto de bloqueo de buses locales que se detienen dentro de área de intersección.

$f_a$  = factor de ajuste para el tipo de área.

$f_{LU}$  = factor de ajuste para la utilización del carril.

$f_{LT}$  = factor de ajuste para la presencia del vehículo a la izquierda en un grupo de carriles.



$f_{RT}$  = factor de ajuste para la presencia del vehículo a la derecha en un grupo de carriles.

$f_{Lpb}$  = factor de ajuste peatonal para grupos de giro a la izquierda.

$f_{Rpb}$  = factor de ajuste peatonal para grupos de giro a la derecha. (Transportation Research Board, 2010)

### Flujo de saturación ajustado

Los cálculos comienzan con la selección de una tasa de flujo de saturación base. Esta tasa base representa la tasa de flujo promedio esperada para un carril de tránsito que tiene condiciones geométricas y de tráfico que corresponden a un valor de 1.0 para cada factor de ajuste. Normalmente, se selecciona una tasa base para representar todas las intersecciones señalizadas en la jurisdicción (o área) dentro de la cual se encuentra la intersección del sujeto. Área metropolitana con población  $\geq 250,000$ : 1,900 (veh/h/ln); de lo contrario: 1,750 (veh/h/ln). . (Transportation Research Board, 2010)

### Factor de ajuste para el ancho del carril

El factor de ajuste de ancho de carril ( $f_w$ ) explica el impacto negativo de los carriles angostos en la tasa de flujo de saturación y permite un mayor caudal en los carriles anchos. (Transportation Research Board, 2010)

Tabla 4: Factor de ajuste para ancho de carril.

$f_w$	Ancho de carril (m)
0'96	$\leq 3$
1	3-3'9
1'04	$\geq 3'9$

Fuente: adaptado de Transportation Research Board, 2010.

### Factor de ajuste para vehículos pesados en flujo de tráfico

El factor de ajuste del vehículo pesado  $f_{HV}$  representa el espacio adicional ocupado por los vehículos pesados y la diferencia en sus capacidades operativas, en comparación con los automóviles de pasajeros. Este factor no aborda los autobuses

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + P_{HV}(E_T - 1)}$$





locales que se detienen en el área de intersección. (Transportation Research Board, 2010)

Donde:

$P_{HV}$ : porcentaje de vehículos pesados en el grupo de movimiento correspondiente (%).

$E_T$ : Número equivalente de autos de paso para cada vehículo pesado = 2.0.

(Transportation Research Board, 2010)

### **Factor de ajuste para el grado de aproximación (pendiente)**

El factor de ajuste de grado ( $f_g$ ) tiene en cuenta los efectos del grado de aproximación en el rendimiento del vehículo. (Transportation Research Board, 2010)

$$f_g = 1 - \frac{P_g}{200}$$

Donde:

$P_g$ : es el grado de aproximación (pendiente) para el grupo de movimiento correspondiente (%).

Este factor se aplica al rango que van desde  $-6.0\%$  a  $+10.0\%$ . Una pendiente cuesta arriba tiene un valor positivo y una pendiente cuesta abajo tiene un valor negativo. .

(Transportation Research Board, 2010)

### **Ajuste por estacionamiento**

El factor de ajuste de estacionamiento ( $f_p$ ) explica el efecto de fricción de un carril de estacionamiento en el flujo en el grupo de carriles adyacente al carril de estacionamiento. También es responsable del bloqueo ocasional de un carril adyacente por parte de los vehículos que entran y salen de los espacios de estacionamiento. Si no hay estacionamiento, entonces este factor tiene un valor de 1.00. (Transportation Research Board, 2010)

$$f_p = \frac{N - 0.1 - \frac{18N_m}{3,600}}{N} \geq 0.050$$

Donde:

$N_m$  = cantidad de maniobra de estacionamiento adyacente al grupo de carril (maniobras / h).

$N$  = número de carriles en el grupo de carriles. . (Transportation Research Board, 2010)



### Ajuste por bloqueo de bus

El factor de ajuste de bloqueo del autobús ( $f_{bb}$ ) explica el impacto de los autobuses de transporte local que se detienen para dejar o recoger pasajeros en una parada de autobús cercana o lejana a una distancia de 250 pies de la línea de parada (aguas arriba o aguas abajo). (Transportation Research Board, 2010)

$$f_{bb} = \frac{N - \frac{14.4N_b}{3,600}}{N} \geq 0.050$$

Donde: N es el número de carriles en el grupo de carriles y  $N_b$  es la tasa de parada de autobús en el enfoque del tema (buses / h).

Este factor se debe usar solo cuando la parada de los autobuses bloquee el flujo de tráfico en el grupo de carriles en cuestión. Se debe mantener un límite superior práctico de 250 autobuses / h con la Ecuación anterior. Un valor mínimo de  $f_{bb}$  de esta ecuación es 0.050. . (Transportation Research Board, 2010)

### Ajuste por tipo de área

El factor de ajuste de tipo de área  $f_a$  explica la ineficiencia de las intersecciones en los CDB (Central Business District-Distrito Central de Negocios) en relación con las de otras ubicaciones. Cuando se usa, tiene un valor de 0.90. . (Transportation Research Board, 2010)

### Ajuste para la utilización del carril

El factor de ajuste de la utilización del carril de entrada se utiliza para estimar la tasa de flujo de saturación para un grupo de carril con más de un carril exclusivo. Si el grupo de carriles tiene un carril compartido o un carril exclusivo, este factor es 1.0. . (Transportation Research Board, 2010)

### Ajuste para giros a la derecha

El factor de ajuste de giro a la derecha  $f_{RT}$  está destinado principalmente a reflejar el efecto de la geometría de la trayectoria de giro a la derecha en la tasa de flujo de saturación. . (Transportation Research Board, 2010)

$$f_{RT} = \frac{1}{E_R}$$



Donde ER es el número equivalente de vehículos de paso para un vehículo protegido con giro a la derecha (= 1.18). . (Transportation Research Board, 2010)

### Ajuste para giros a la izquierda

El factor de ajuste de giro a la izquierda  $f_{LT}$  está destinado principalmente a reflejar el efecto de la geometría de la trayectoria de giro a la izquierda en la tasa de flujo de saturación. . (Transportation Research Board, 2010)

$$f_{LT} = \frac{1}{E_L}$$

Donde EL es el número equivalente de vehículos de paso para un vehículo protegido que gira a la izquierda ( $E_L = 1.05$ ). . (Transportation Research Board, 2010)

### Paso 5. Determine la capacidad y la relación volumen-capacidad

La capacidad se mide mediante ecuación:

$$c = N s \frac{g}{C}$$

Donde: “c” es la capacidad (veh/h), “s” el flujo de saturación ajustado, “g” es el tiempo de verde efectivo y “C” el ciclo semafórico. . (Transportation Research Board, 2010)

La relación de volumen a capacidad para un grupo de carril se define como la relación del volumen de grupo de carril y su capacidad. . (Transportation Research Board, 2010)

$$X = \frac{v}{c}$$

Donde:

X = relación de volumen a capacidad,

v = tasa de flujo de la demanda (veh / h),

c = capacidad (veh / h). . (Transportation Research Board, 2010)

### 2.2.7 ROTONDAS

La intersección rotatoria a nivel, también conocida como rotonda o glorieta, se distingue porque los flujos vehiculares que acceden a ella por sus ramas, circulan mediante un anillo vial, en el cual la circulación se efectúa alrededor de una isla



central. Las trayectorias de los vehículos en el anillo, son similares a los entrecruzamientos, razón por la cual el número de puntos de conflicto, es menor que en otros tipos de intersecciones a nivel. (MTC, 2018)

Las rotondas son ventajosas, si los volúmenes de tránsito de las ramas de acceso son similares, o si los movimientos de giro predominan sobre los de paso. En los tramos que las carreteras atraviesan zonas urbanas, las rotondas con semáforo, alivian congestiones por exceso de flujos o reparto desequilibrado de la demanda por rama. (MTC, 2018)

Son un subconjunto de las intersecciones circulares con específicas características de diseño y de control de tráfico, las cuales incluyen el control de ceder el paso de todo el tránsito entrante, aproximaciones (accesos) canalizadas, y curvatura geométrica y características para inducir velocidades vehiculares deseables. (Transportation Research Board, 2010)

Bajo la denominación de glorieta se designa a un tipo especial de intersección, caracterizada porque los tramos que en ella confluyen se comunican a través de un anillo (calzada aproximadamente circular) en el que se establece una circulación rotatoria alrededor de una isleta central. (Mozota Azcutia, 2011)

Si bien legalmente no existe definición del término glorieta en la legislación de tráfico, se puede encontrar en el Reglamento General de Circulación una definición aproximada de glorieta como plaza de circulación giratoria. Por otra parte se define glorieta como “intersección dispuesta en forma de anillo (generalmente circular) siendo único el sentido de circulación en el mismo”. (Mozota Azcutia, 2011)

### **2.2.7.1 CATEGORÍAS DE ROTONDAS**

Según el tamaño y número de carriles y para facilitar la discusión de los resultados o temas específicos de diseño, en esta guía las rotondas se separaron en tres categorías básicas: mini-rotondas, rotondas de un solo carril, y rotondas multicarriles. Para zonas rurales urbanas y suburbanas no se identificaron explícitamente categorías separadas. Debido a vehículos de diseño más pequeños y a limitaciones de la zona de camino, en las zonas urbanas las rotondas pueden requerir menores diámetros del círculo inscrito. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

También pueden incluir características peatonales y ciclistas. Las rotondas en zonas rurales suelen tener mayor velocidad de aproximación y por lo tanto pueden necesitar atención especial a la visibilidad, alineamiento de las aproximaciones y detalles de la sección transversal. Las rotondas suburbanas pueden combinar características de los ambientes urbanos y rurales. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Tabla 5: Comparación de Categorías de Rotondas.

Elemento de Diseño	Minirotonda	Rotonda de un solo carril	Rotonda Multicarril
Deseable entrada máxima velocidad.	25 a 30 km/h	30 a 40 km/h	40 a 50 km/h
Número máximo de entrar en los carriles por aproximación.	1	1	2+
Típico Diámetro del círculo inscrito.	13 a 27m	27 a 55 m	46 a 91 m
Isleta central de tratamiento	Totalmente transitable.	Elevado (puede tener delantal atravesable).	Elevada (puede tener delantal traspasable).
Típico volúmenes de servicio diario en la rotonda de 4 ramales por debajo de los cuales se puede esperar que opere sin necesidad de un análisis detallado capacidad (veh/día).	Hasta aproximadamente 15000.	Hasta aproximadamente 25000.	Hasta aproximadamente 45.000 para rotondas de dos carriles.

Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.

En la mayoría de los casos, las rotondas de las tres categorías se diseñan con instalaciones para peatones y ciclistas; sin embargo, en algunos casos una jurisdicción puede optar por no proporcionar estas características, si no se prevé este tipo de usuarios o puede ser mejor servido en otro lugar. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### 2.2.7.1.1 MINIROTONDAS

Las minirotondas son rotondas pequeñas con una isleta central totalmente transitable. Son los más comúnmente utilizados en los entornos urbanos de baja

velocidad con un promedio de las velocidades de operación de 50 km/h o menos. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Una miniglorieta tiene una isleta circular a nivel o ligeramente abombada de menos de 4 m de diámetro. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Las miniglorietas pueden ser muy efectivas para mejorar intersecciones urbanas existentes con problemas de capacidad y seguridad. Sólo deben usarse si todos los accesos tienen su velocidad limitada a 50 Km/h. (Mozota Azcutia, 2011)

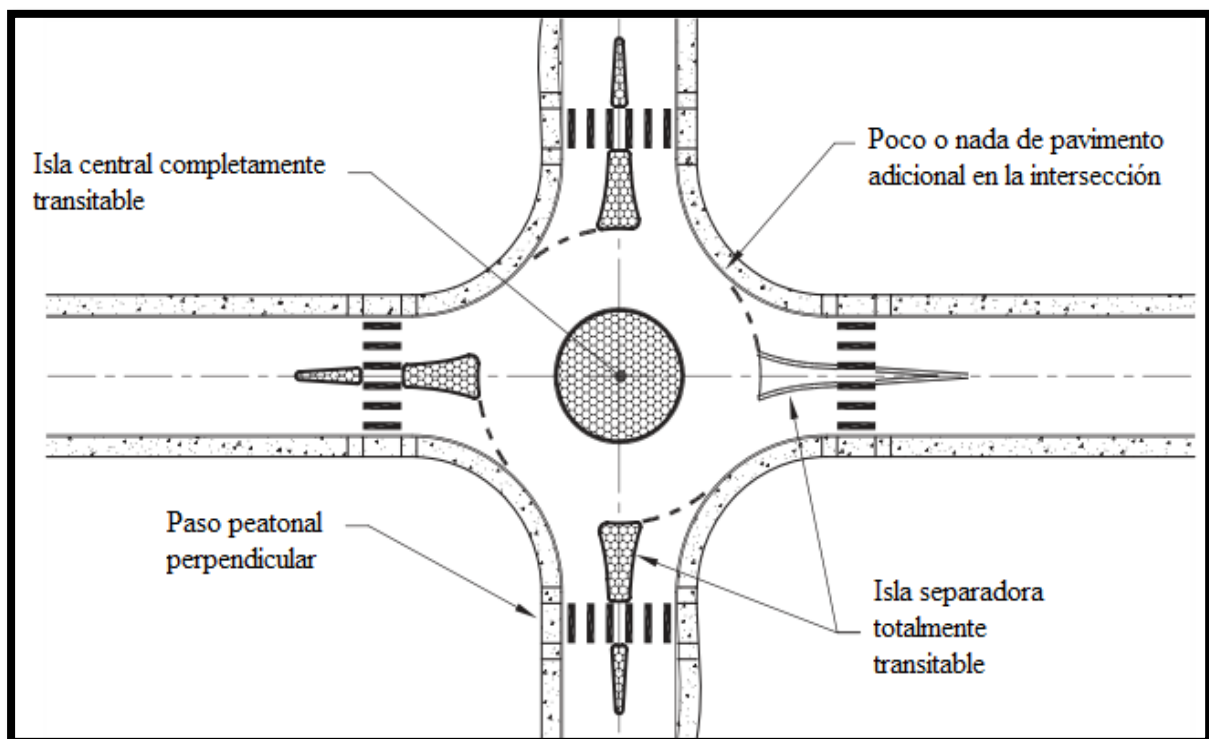


Figura 11: Características de una Minirrotonda Típica.

Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.

#### 2.2.7.1.2 ROTONDAS DE UN SOLO CARRIL

Este tipo de rotonda se caracteriza por tener una entrada de un solo carril en todos los ramales y un carril de circulación. Se distinguen de las mini-rotondas por sus grandes diámetros de círculos inscritos e isletas centrales no transitables. Su diseño permite una velocidad ligeramente superior en la entrada, calzada circulatoria, y salida. Típicamente, el diseño geométrico incluye isleta partidoras ajardinadas, una isleta central no transitable, cruces peatonales, y un delantal de camiones. El tamaño está muy condicionado por el vehículo de diseño y la zona de camino. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)



Las rotondas de un solo carril tienen entradas de carril único en todas las aproximaciones y una vía de circulación. Por lo general, tienen islas divisoras elevadas montables, un delantal de camión que se puede montar y una isla central, que por lo general es ajardinada. (Transportation, Washington State Department of, 2017)

### 2.2.7.1.3 ROTONDAS MULTICARRILES

Las rotondas varios carriles tienen por lo menos una entrada con dos o más carriles. En algunos casos, pueden tener un diferente número de carriles en una o más aproximaciones (por ejemplo, entradas de dos carriles en la calle principal y entradas de un solo carril en la calle secundaria). También incluyen rotondas con entradas en una o más aproximaciones que se abocinan desde uno hasta dos o más carriles. (Transportation Research Board, 2010)

Las rotondas de varios carriles tienen al menos una entrada o salida con dos o más carriles y más de un carril de circulación. La práctica operacional para camiones que negocian rotondas es invadir carriles adyacentes. (Transportation, Washington State Department of, 2017)

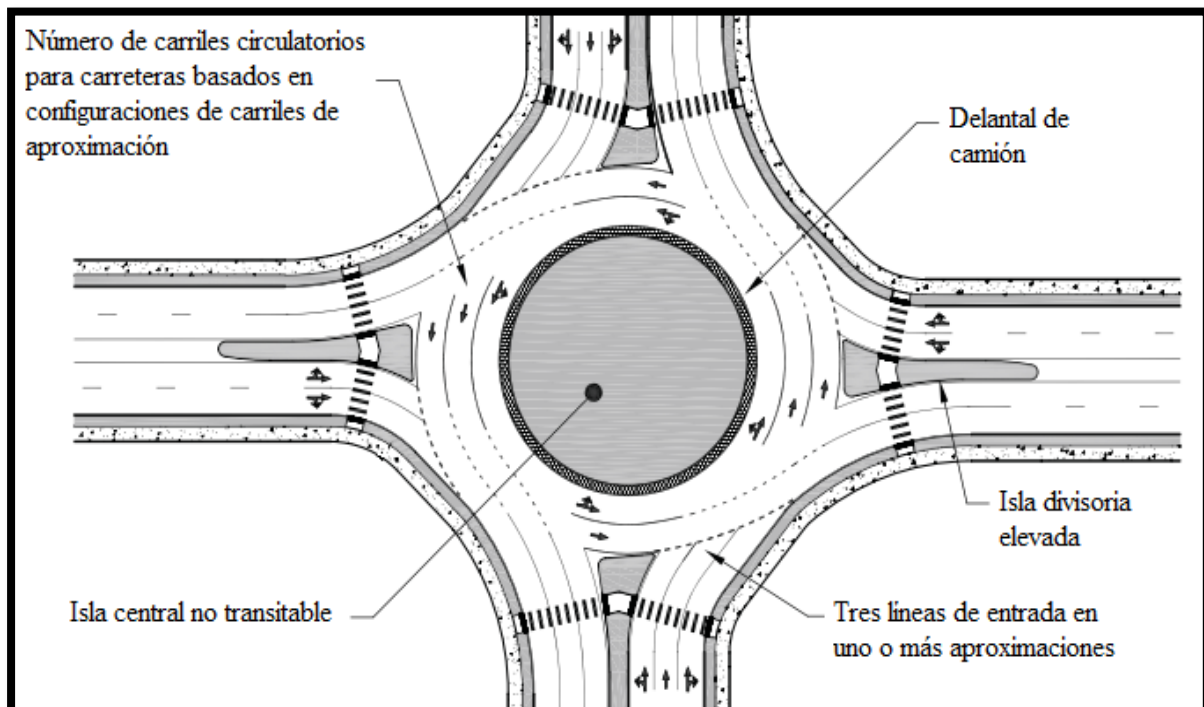


Figura 12: Características de una Rotonda Multicarril Típica.

Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.



### 2.2.7.2 CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS DE UNA ROTONDA

- **Isleta Central**

Es la zona elevada en el centro de una rotonda en torno de la cual circula el tránsito. La isleta central no necesariamente tiene que ser de forma circular. En el caso de las minirrotondas, la isleta central es traspasable. (Transportation Research Board, 2010)

La isla central es la porción de la rotonda que se encuentra dentro de la carretera que circula y generalmente incluye una plataforma interior para camiones y un área ajardinada. La forma de la isla central es una función de las necesidades específicas del sitio de una intersección rotonda. No tiene que ser una forma idéntica de las dimensiones del diámetro del círculo inscrito, pero debe apoyar los principios de diseño de deflexión y bajas velocidades, y la acomodación del vehículo de diseño. (Transportation, Washington State Department of, 2017)

- **Isleta Partidora**

Es una zona elevada o pintada en un acceso de aproximación a la rotonda, utilizada para separar los tránsitos entrante y saliente, desviar y lentificar el tránsito entrante, y permitir a los peatones cruzar el camino en dos etapas. (Transportation Research Board, 2010)

- **Calzada Circulatoria**

Es la trayectoria curva utilizado por los vehículos para viajar en sentido contrario al reloj alrededor de la isleta central. (Transportation Research Board, 2010)

- **Delantal**

Es la parte traspasable de la isleta central adyacente a la calzada circulatoria que puede ser necesaria para acomodar a los vehículos de gran tamaño. A veces se provee en el exterior de la calzada circulatoria. (Transportation Research Board, 2010)

- **Línea De Entrada**

Marca el punto de entrada en la calzada circulatoria. Físicamente es una extensión de la línea de borde de la calzada circulatoria, pero funciona como una línea de ceda el paso, o dé paso, en ausencia de una línea separada de ceda el paso. Los



vehículos que entren deben ceder el paso a cualquier tránsito que circulate procedente de la izquierda, antes de cruzar esta línea. (Transportation Research Board, 2010)

- **Cruces accesibles a los peatones**

En las rotondas diseñadas con sendas peatonales, típicamente ellas se ubican retiradas hacia atrás de la línea de entrada, y la isleta partidora suele cortarse para permitir que los peatones, sillas de ruedas, cochecitos de niños y bicicletas pasen a través. Los cruces peatonales deben ser accesibles con pendientes y advertencias detectables apropiadas, de conformidad con los requisitos de la ADA. (Acta de Americanos con Discapacidades). (Transportation Research Board, 2010)

- **Franja ajardinada**

Las franjas ajardinadas separan a vehículos y peatones, y ayudan a guiar a los peatones hasta los lugares de cruce. Esta característica es particularmente importante como una clave para guiar a las personas con problemas visuales. Las franjas ajardinadas también pueden mejorar significativamente la estética de la intersección. (Transportation Research Board, 2010)

### **2.2.7.3 CONSIDERACIONES DE ROTONDAS**

#### **2.2.7.3.1 SEGURIDAD**

El desempeño de seguridad de una rotonda es producto de su diseño. En las rotondas los vehículos viajan en el mismo sentido, eliminando los conflictos de giro en ángulo recto a la izquierda asociados con las intersecciones tradicionales. Además, el buen diseño de una rotonda asigna alta prioridad al control de la velocidad mediante las características geométricas, dispositivos de control de tránsito, o por la interacción con otro tránsito. Debido a esto, el control de la velocidad se puede alcanzar en todo momento del día. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Las rotondas de un solo carril diseñadas para operar a baja velocidad son uno de los tratamientos más seguros disponibles para las intersecciones a nivel. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Los conductores no tienen que tomar decisiones sobre qué carril usar. Los peatones cruzan un carril de tránsito a la vez. Las velocidades y anchos de las plataformas



son suficientemente bajos como para permitir la cómoda mezcla entre flujos vehiculares y de peatones. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

A pesar de estos desafíos, a menudo el nivel global de seguridad de las rotondas multicarriles es mayor que el de las intersecciones semaforizadas comparables, particularmente en términos de accidentes mortales y lesiones. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### 2.2.7.3.2 DECISIONES DE LOS USUARIOS

Generalmente, las decisiones de los usuarios -conductores, peatones y ciclistas- son más simples en las rotondas que en otros tratamientos de intersección. Sin embargo, las rotondas también otorgan mayor responsabilidad sobre las personas para tomar decisiones en lugar de dirigirlas mediante un dispositivo de control de tránsito. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

##### **A. Conductores**

Los conductores que se acercan a una rotonda de un solo carril tienen dos decisiones básicas con respecto a otros usuarios: seleccionar el carril adecuado (según corresponda) para su destino, y ceder el paso a quienes tienen el derecho de paso. La toma de decisiones de navegación es generalmente más compleja que para otros tipos de intersecciones, principalmente porque el conductor no puede ver siempre la salida o destino y porque la intersección curvada obliga a los conductores a cambiar gradualmente la dirección, lo que puede desorientar a un conductor en cuanto a su origen y destino. Como consecuencia, el proyectista puede necesitar dar orientación adicional en forma de señales y marcas para ayudar a la navegación del conductor. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

##### **B. Peatones**

El diseño de una rotonda permite a los peatones cruzar un sentido de tránsito por vez en cada ramal de la rotonda. Esto es mucho más simple que las intersecciones controladas por pare en dos sentidos, donde los peatones cruzan paralelos con la calle principal y lidian con posibles conflictos por delante y por detrás de ellos (por ejemplo, giros a izquierda y derecha en la calle principal). Aunque las intersecciones semaforizadas puede proporcionar una indicación de cuándo los peatones tienen el derecho de paso (a través de una indicación de camine), los posibles conflictos pueden provenir de múltiples direcciones: giros a la izquierda en



verde, giros a la derecha en verde, giros a la derecha en rojo y los vehículos directos que cruzan en rojo. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### **C. Ciclistas**

Las decisiones de los ciclistas en las rotondas dependen de cómo el ciclista decida viajar a través de la intersección. Si viaja como un vehículo, como suele ser el caso de los ciclistas experimentados y en entornos de bajo volumen y velocidad, el proceso de decisión es similar al de los vehículos motorizados. Si viaja en calidad de peatón, como suele ser el caso de ciclistas menos experimentados y en ambientes de mayor volumen, el proceso de decisión es similar al de los peatones. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### **2.2.7.3.3 OPERACIONES DE TRÁNSITO**

La operación del tránsito vehicular en una rotonda está determinada por la aceptación de claros: los vehículos que entran buscan y aceptan claros en la circulación de tránsito. Las bajas velocidades de la rotonda de facilitan este proceso de aceptación de claros. Por otra parte, la eficiencia operativa (capacidad) de las rotondas es mayor a velocidad de circulación baja, debido a los dos fenómenos siguientes: (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

1. A mayor velocidad del tránsito, más grandes serán los claros que el tránsito entrante aceptará con comodidad. Esto se traduce en menos claros aceptables y, por lo tanto, más casos de vehículos que entran quieren entrar, detenidos en la línea de ceda el paso. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)
2. El tránsito entrante y que primero estuvo detenido en la línea de ceda el paso requiere claros más grandes aún en el tránsito circulante para acelerar y convergir con el tránsito que circula. A mayor velocidad del tránsito, más grande debe ser el claro. Esto se traduce en menos claros aceptables y, por lo tanto, en demoras mayores para el tránsito que entra. (National Cooperative Highway Research Program, 2010) (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### **2.2.7.3.4 REQUERIMIENTOS DE ESPACIO**

A menudo, las rotondas requieren más espacio en la vecindad de la intersección que las intersecciones comparables controladas por pare o por semáforos. Esta necesidad de espacio es dictado por una serie de factores, incluyendo el tamaño y la forma de la rotonda (por ejemplo, circular en comparación con no circular). Sin embargo, como



se discutió previamente en el contexto de un corredor, el espacio adicional necesario en las inmediaciones de una rotonda puede ser compensado por el reducido espacio necesario entre las intersecciones. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

En la medida en que una rotonda comparable supere a un semáforo en términos de menores demoras y colas más cortas, requerirá menos espacio de almacenamiento de colas en los ramales de acceso. Si una intersección semaforizada requiere largos o múltiples carriles de giro para proveer suficiente capacidad de almacenamiento, una rotonda con capacidad similar puede requerir menos espacio en las aproximaciones. Como resultado, las rotondas pueden reducir la necesidad de zona de camino adicional en las conexiones entre intersecciones, a expensas de necesidades de zona de camino adicional en las intersecciones mismas. También puede ser posible espaciar las rotondas más juntas que los semáforos, debido a longitudes de cola más cortas. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### 2.2.7.3.5 ADMINISTRACIÓN DE ACCESO

Las rotondas se pueden utilizar en las principales intersecciones públicas y privadas para facilitar los movimientos más importantes y mejorar la administración-de-acceso. Los puntos de accesos públicos y privados secundarios entre las rotondas pueden acomodarse mediante intersecciones parcial o totalmente controladas por señales pare en los dos sentidos, con las rotondas proveyendo oportunidades de giros en U. La mayor parte de los principios utilizados para la administración de acceso en las intersecciones convencionales también se pueden aplicar en las rotondas. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Mientras que las rotondas pueden permitir menos carriles entre las intersecciones, el patrón de tránsito que surge de las rotondas puede tener un impacto significativo en los accesos a mitad-de-cuadra existentes. El patrón de salida más el azar que surge de una rotonda y la sección potencialmente más angosta entre las rotondas pueden reducir el número de claros disponibles para las intersecciones y accesos a propiedad a mitad de cuadra no semaforizadas. Como resultado, una intersección no semaforizada pueden tener menos capacidad y más demora corriente-abajo de la rotonda que la corriente-abajo de un semáforo, aun teniendo en cuenta los giros en U que las rotondas facilitan. Esto debe revisarse sobre una base caso-por-caso con





los datos patrones de movimientos de giro de un corredor. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### *2.2.7.3.6 FACTORES AMBIENTALES*

Las rotondas pueden proporcionar beneficios ambientales si se reducen las demoras vehiculares y el número y la duración de las detenciones en comparación con otros tipos de intersecciones. Incluso cuando haya grandes volúmenes, los vehículos continúan avanzando lentamente en las colas en lugar de llegar a una completa detención. Esto puede reducir significativamente el impacto del ruido, la contaminación del aire y el consumo de combustible al reducir el número de ciclos de aceleración/desaceleración y el tiempo dedicado al punto muerto. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### *2.2.7.3.7 COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO*

Los costos de proyecto y construcción de una rotonda pueden variar significativamente en función del tamaño de la rotonda, la disponibilidad de zona de camino, los requisitos de iluminación nocturna, y el diseño de otras características estéticas que puedan desearse. Una rotonda nueva de un solo carril en un entorno no edificado puede tener costos de construcción comparables con una intersección semaforizada. Al crecer el tamaño de la rotonda, sobre todo en una zona comercial o residencial completamente edificada, el costo de la construcción de la rotonda puede ser mayor que el de una intersección semaforizada. Sin embargo, las operaciones y el costo de mantenimiento de una rotonda pueden ser menores que el de una intersección semaforizada, con la posible excepción de mayores necesidades de iluminación nocturna de la rotonda. Aunque el costo inicial de construcción pueda ser mayor, una rotonda puede tener menores costos de operación y mantenimiento que una intersección semaforizada, y su vida útil es significativamente más larga, de aproximadamente 25 años, en comparación con 10 años de una intersección semaforizada típica. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

A lo largo de su vida útil, las rotondas reditúan importantes ahorros de costos para la sociedad debido a la reducción de los accidentes, sobre todo los mortales y/o con heridos graves. (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 1986)

#### *2.2.7.3.8 APACIGUAMIENTO DEL TRÁNSITO*

Las rotondas pueden apaciguar el tránsito vial al reducir la velocidad de los vehículos

mediante el diseño geométrico, en lugar de dispositivos de control de tránsito o volumen de tránsito. En consecuencia, la reducción de velocidad se puede realizar a cualquier hora del día y en calles y caminos de cualquier volumen de tránsito. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Es difícil para los conductores circular a alta velocidad a través de una rotonda adecuadamente diseñada, con canalización sobre elevada que fuerce físicamente a los vehículos a cambiar de dirección. Los ejemplos incluyen el uso de rotondas en la transición desde un entorno rural de alta velocidad hasta un entorno urbano de baja velocidad, y para separar los usos comerciales de las zonas residenciales. Al reducir la velocidad, las rotondas complementan otras medidas de apaciguamiento del tránsito. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Al reducir la velocidad, las rotondas complementan otras medidas de apaciguamiento del tránsito. La Figura muestra una foto de una rotonda en Clearwater, Florida, que provee esta característica de portal entre usos comerciales y residenciales del suelo. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

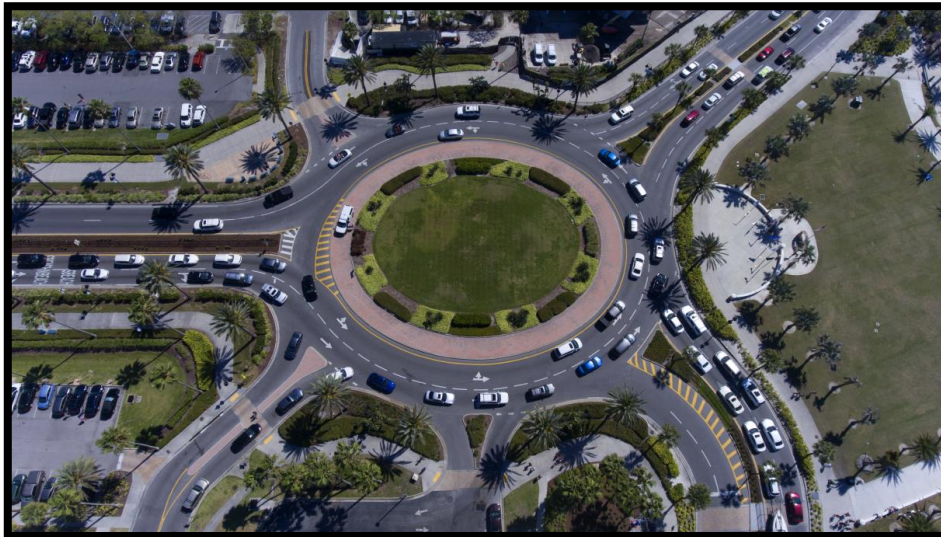


Figura 13: Rotonda en Clearwater, Florida.

Fuente: <http://forwardpinellas.org/blog/drones-planning-tool-visual-storytelling/>.

#### 2.2.7.3.9 ESTÉTICA

Las rotondas son propicias para proveer a las comunidades entradas atractivas. Los tratamientos paisajísticos y ajardinamientos son características estéticas deseables que se pueden instalar en la isleta central y en las isletas partidoras, siempre y cuando se cumplan los requisitos de distancia de visibilidad. Puede ser posible colocar



monumentos y obras de arte en algunas partes de la isleta central, si no representa ningún peligro significativo para los vehículos errantes. Además, las texturas y los colores del pavimento añadido a los delantales de camiones u otros elementos mejoran el aspecto visual de la intersección. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### **2.2.7.4 CONSIDERACIONES DE LOS USUARIOS**

Como con cualquier diseño de intersecciones, cada modo de transporte actual requiere una cuidadosa consideración. Esta sección trata algunas de las cuestiones asociadas a cada modo; detalles adicionales sobre la seguridad de modos específicos y problemas de diseño se presentan en los capítulos siguientes. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

##### **2.2.7.4.1 PEATONES**

En las rotondas donde se provea acceso peatonal, los peatones se acomodan en los cruces peatonales alrededor del perímetro de la rotonda. Al proporcionar espacio para hacer una pausa en la isleta partidora, los peatones pueden considerar un sentido de tránsito en conflicto a la vez, lo que simplifica la tarea de cruzar la calle.

La rotonda debe diseñarse como para disuadir a los peatones de cruzar la isleta central; por ejemplo, mediante canteros ajardinados en las esquinas. Los cruces peatonales se retiran hacia atrás de la línea ceda el paso por una o varias longitudes de vehículo para: (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

- Acortar la distancia de cruce en comparación con lugares adyacentes al círculo inscrito,
- Separar puntos de conflicto vehículo-vehículo y vehículo-peatón, y
- Permitir al segundo conductor que entre prestar atención a los peatones que cruzan mientras espera que el conductor de adelante entre en la calzada circulatoria. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

##### **2.2.7.4.2 PEATONES CON DISCAPACIDADES**

Los peatones ciegos o con baja visión tienen varias áreas de dificultad al cruzar una



rotonda. Se espera que un peatón con problemas de visión pero con buenas aptitudes de viaje sea capaz de llegar a una intersección con la cual no esté familiarizado y cruzarla sin un entrenamiento especial para la intersección específica. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Existen también facilidades enfocadas en hacer más cómoda y segura la movilidad de los usuarios discapacitados. Por ejemplo, las personas con ceguera tienden a seguir las líneas de las veredas que son paralelas a las fachadas de las edificaciones aledañas. Colocar pavimento táctil es una de las implementaciones que mejoran considerablemente la percepción de estos usuarios (ONCE & COAM, 2011)

#### *2.2.7.4.3 CICLISTAS*

Las rotondas de un solo carril son mucho más simples para los ciclistas de las rotondas de varios carriles, ya que no requieren de los ciclistas cambiar de carril a la izquierda para hacer movimientos de giro o seleccionar el carril adecuado para su sentido de viaje. Además, en las rotondas de un solo carril los conductores tienen menos probabilidades de cortar a los ciclistas al salir de la rotonda.

Los carriles para bicicletas no se recomiendan en la calzada circulatoria. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### *2.2.7.4.4 VEHÍCULOS GRANDES*

Los vehículos grandes tienen un impacto directo en el diseño de una rotonda. A menudo, las rotondas de un solo carril emplean un delantal traspasable alrededor del perímetro de la isleta central para proporcionar el ancho adicional necesario para el seguimiento de las ruedas del remolque de los vehículos de gran tamaño. Las rotondas de varios carriles están concebidas para permitir que los vehículos de gran tamaño ocupen más de un carril al entrar, circular y salir, o permanecer en su carril. En algunos casos, las rotondas se diseñaron con delantales o plataformas con barreras a través de la isleta central para dar cabida a camiones de gran tamaño, vehículos de emergencia, o trenes.0 (National Cooperative Highway Research Program, 2010)



#### 2.2.7.4.5 TRANSPORTE PÚBLICO

Los vehículos de transporte público son un tipo especial de vehículo grande y tienen requisitos únicos, muchos de los cuales son similares a los de otros tipos de tratamientos de intersecciones. Si la rotonda fue diseñada usando el adecuado vehículo de diseño, un ómnibus no tiene ninguna dificultad física de circular por la intersección. Para minimizar las molestias de los pasajeros, es preferible que los ómnibus no necesiten usar un delantal de camiones presente. Las paradas de ómnibus deben ubicarse cuidadosamente para minimizar la probabilidad de que las colas de los vehículos se extiendan hacia la calzada circulatoria. Normalmente, esto significa que la parada de ómnibus situada en el lado lejano de la intersección necesita dársenas o estar aún más corriente-abajo que la isleta partidora, ubicada de manera que tenga en cuenta la aptitud del chofer del ómnibus de convergir en la corriente de tránsito. Las rutas peatonales de acceso al transporte público deberían diseñarse teniendo en cuenta la seguridad, comodidad y conveniencia. La capacidad de paso de los peatones debe tenerse en cuenta si la demanda es significativa, tal como cerca de una estación o terminal, y sobre tratamientos del transporte público. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Los ómnibus no necesitan utilizar un delantal de camiones para circular por una rotonda (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### 2.2.7.4.6 VEHÍCULOS DE EMERGENCIA

El paso de los vehículos de emergencia a través de una rotonda es el mismo que para otros vehículos de gran tamaño y puede requerir el uso de un delantal tras- pasable. En las rutas de respuesta a emergencias, las demoras de los movimientos relevantes en una rotonda prevista deben compararse con los tipos y controles de intersección alternativos. Así como están obligados a hacerlo en las intersecciones convencionales, los conductores deben ser educados para no entrar en una rotonda cuando un vehículo de emergencia se acerca por otro ramal. Una vez adentro, si es posible deben salir de la calzada circulatoria y facilitar la dispersión de la cola enfrente del vehículo de emergencia. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)



#### 2.2.7.4.7 CRUCES FERROVIARIOS

Los cruces de ferrocarril a través o cerca de una rotonda, pueden implicar muchos de los desafíos de diseño, igual que en otras intersecciones. En las remodelaciones, la vía ferroviaria puede diseñarse para pasar a través de la isleta central o de uno de los ramales. El derrame hacia atrás de las colas desde un bloqueo en la vía ferroviaria puede llenar la calzada circulatoria, y temporariamente impedir el movimiento en cualquier aproximación. Sin embargo, en la medida en que una capacidad de aproximación a una rotonda exceda la de un semáforo en el mismo lugar, las colas se disiparán más rápidamente. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Hay tres formas comunes en que las vías ferroviarias pueden interactuar con una rotonda:

1. En la mediana del camino o por el centro de la rotonda,
2. En diagonal por el centro de la rotonda
3. A través de un ramal en estrecha proximidad a la rotonda. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

En cualquiera de los escenarios, el tránsito carretero no debe ser obligado a detenerse en las vías. Cuando se utilicen barreras de ferrocarril para detener el tránsito vial, su colocación y secuencia con otras barreras debe estudiarse con detenimiento para que todo el tránsito salga de las pistas antes de la llegada del tren. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Un cruce ferroviario con barreras por el centro de una rotonda se puede acomodar de dos maneras.

1. Proporcionar barreras a través sólo en el cruce ferroviario a nivel
2. Proporcionar barreras a través del cruce ferroviario a nivel y en todas las entradas de la rotonda. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Los aspectos que deben considerarse al diseñar el cruce incluyen pero no se limitan a los siguientes:

1. Localización del cruce en relación con la rotonda.
2. Patrones de tránsito y disponibilidad de almacenamiento de cola.



3. Uso de barreras del ferrocarril frente a semáforos viales. Los semáforos ferroviarios fallan en la seguridad cuando una pérdida de energía hace caer la barrera. Semáforos viales fallan en destellar o se apagan.
4. Derecho preferente de secuencia y momento oportuno, incluyendo de colas, velocidad de tren, y otros factores. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Tres escenarios comunes ocurren en la práctica. El primero y más probable es donde los rieles corran paralelas el camino y crucen un ramal de la intersección, un segundo escenario es donde los rieles pase en diagonal a través de la isleta central de la rotonda, un tercer escenario es donde los rieles corran debajo de la mediana de un camino y pasen a través de la isleta central de la rotonda. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

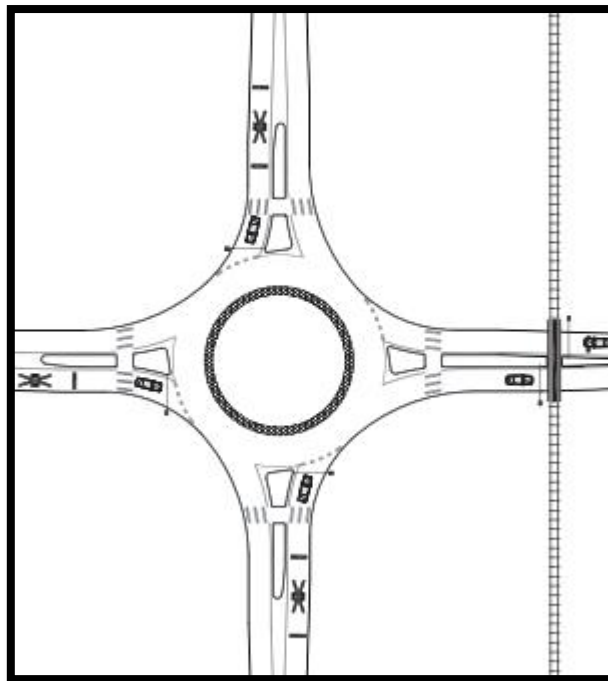


Figura 14: El tren cruza un ramal de la intersección - barras en todas las aproximaciones.

Fuente: National Cooperative Highway Research Program, 2010.

#### (a) Barreras en todas las entradas

- Permite a todos los vehículos salir de la rotonda y despejarla antes de la llegada del tren.
- Aumentan las demoras, en particular cuando el movimiento predominante es a través paralelo al ferrocarril.

- Preferidas donde el cruce de vías está cerca de la rotonda y no se disponga de almacenamiento suficiente entre la rotonda y el ferrocarril. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

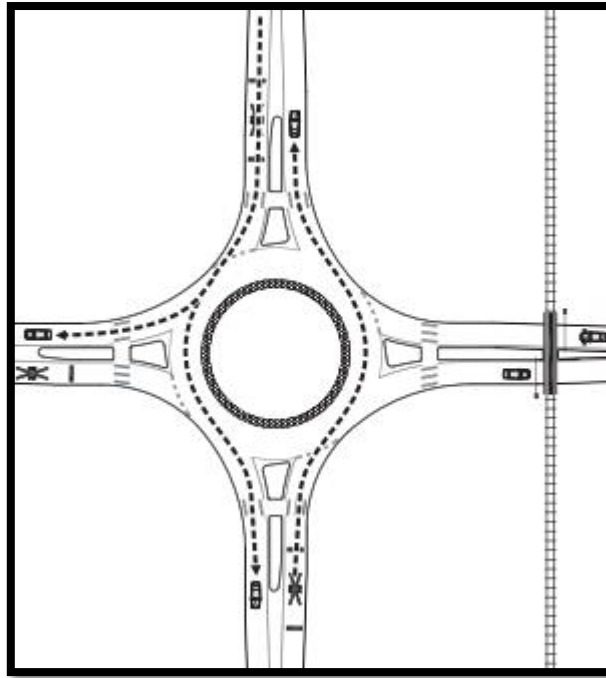


Figura 15: El tren cruza un ramal de la intersección - barra sólo en el carril de aproximación.

Fuente: National Cooperative Highway Research Program, 2010.

#### **b) Barreras sólo en el carril de aproximación**

- Reduce las demoras, al permitir a  $\frac{3}{4}$  del movimiento de la rotonda a seguir funcionando normalmente con el tren presente.
- Requiere una cuidadosa revisión de la separación a la línea ferroviaria y de la capacidad de almacenamiento disponible. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### **2.2.7.5 PLANEACIÓN DE ROTONDAS**

#### **2.2.7.5.1 CONSIDERACIONES DE CONTEXTO**

Adhiriendo a los principios de planeamiento e ingeniería se asegura que la decisión de instalar una rotonda en un lugar específico se hizo adecuadamente.

**Reconversión de una intersección existente en un área donde las rotondas ya ganaron aceptación.** Este ambiente es uno en el que se busca la solución a un



problema específico de emplazamiento. Las comunidades con experiencia limitada a rotondas de un solo carril ahora se sienten cómodas buscando oportunidades para utilizar rotondas de varios carriles con mayor capacidad. Dentro de la zona, el diseño y los procedimientos de evaluación también pueden definirse mejor que en las comunidades que están explorando sus primeras rotondas. Los objetivos básicos del proceso de selección en este caso son para demostrar cómo se verá afectada la comunidad y que la rotonda funcionará correctamente durante el período máximo dentro de los límites de capacidad impuestos por el espacio disponible, y para decidir cuál es la alternativa preferida. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

**Un sistema vial nuevo.** Se imponen menos restricciones si la ubicación en cuestión no forma parte de un sistema vial existente. La zona de camino usualmente es más fácil de adquirir o comprometer. Otras formas de intersección también ofrecen alternativas viables a las rotondas. Con frecuencia no hay observaciones en el terreno de problemas específicos del lugar que deben ser abordados. Es más común que esta situación la enfrenten los desarrollos privados que los organismos públicos, y por lo tanto cobra importancia la coordinación entre los intereses público y privado en el planeamiento, análisis y diseño de la rotonda. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

**La primera rotonda en una zona.** La primera rotonda, en cualquier área geográfica a menudo se enfrenta a niveles significativamente más altos de interés público, o temor, en el concepto de una rotonda, y un fracaso temprano del proceso podría tardar años en recuperarse. Esta situación exige que el organismo de ejecución sea diligente con respecto a los aspectos operacionales y de diseño de rotondas, los impactos sobre la comunidad, las necesidades del usuario, y la aceptación pública, y trabajar de forma interactiva con el público y los funcionarios elegidos en comunicar esos aspectos. Por otra parte, una rotonda aplicada con éxito, especialmente una que resuelve un problema demostrado, podría ser un factor importante en la obtención de apoyo para futuras rotondas en lugares adecuados. Consideraciones importantes: (National Cooperative Highway Research Program, 2010)



#### 2.2.7.5.2 *CONDICIONES ESPECÍFICAS DEL LUGAR*

En el contexto de la evaluación de alternativas de intersección, cada lugar tiene sus características propias, problemas y objetivos de mejoramiento. La elección del óptimo control será el que mejor equilibra esos objetivos. Las rotondas ofrecen beneficios en muchas circunstancias, sin embargo también pueden ser más complicadas para implementar en comparación con otros tipos de control. En la discusión siguiente se identifican varios factores relacionados con el emplazamiento que pueden influir considerablemente en el diseño de la rotonda. Estos factores deben tenerse en cuenta a la hora de comparar opciones y que también cada una compensa los objetivos de mejoramiento: (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

- Las complicaciones físicas o geométricas pueden influir significativamente en el diseño de una rotonda y puede hacer que una rotonda sea imposible o antieconómica. Estas podrían incluir: limitaciones de la zona de camino, pendientes o topografía desfavorable, conflictos de servicios públicos, problemas de drenaje, oblicuidad de la intersección, entre otras. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)
- Las rutas designadas o la proximidad de generadores de importantes tipos de tránsito pueden producir dificultad a los vehículos para transitar la rotonda, tales como camiones de gran tamaño (también conocida como "carga súper"). (National Cooperative Highway Research Program, 2010)
- Otros dispositivos cercanos que requieren control de tránsito del derecho de prioridad, tales como cruces ferroviarios a nivel, podrían crear interacciones de colas con la rotonda que hay que resolver. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)
- Cuellos de botella podrían rutinariamente retrasar el tránsito en la rotonda, tales como señales de exceso de capacidad o puentes levadizos. El funcionamiento exitoso de una rotonda depende del flujo sin obstáculos en la calzada circulatoria. Si tránsito en la calzada circulatoria se detiene, puede ocurrir una paralización momentánea de la intersección. En comparación otros tratamientos de intersección pueden tener menos efectos adversos en esas condiciones. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)



- Numerosos movimientos peatonales o de bicicleta podría entrar en conflicto con los volúmenes de tránsito motorizado vehicular. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

La existencia de una o más de estas condiciones no necesariamente se oponen a la instalación de una rotonda. De hecho se construyeron rotondas en lugares que presentan casi todas las condiciones mencionadas anteriormente. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### 2.2.7.5.3 APLICACIONES POTENCIALES

Las rotondas son una herramienta potencial dentro de la caja de herramientas de opciones de control de la intersección y deben considerarse en una amplia gama de aplicaciones posibles. Existen numerosas razones para la selección de una rotonda como una alternativa preferida, cada razón debe llevar sus propias consideraciones y soluciones de compromiso. Esta sección proporciona una visión superficial de varios ejemplos de emplazamientos o situaciones en las que a menudo se consideran rotondas. También pone de relieve situaciones en las que pueden existir compensaciones o ciertos aspectos del diseño de la rotonda que en general requieren una mayor investigación para determinar la viabilidad de una rotonda y si es la opción preferida. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### a. CENTROS URBANOS

Escenarios urbanos son las áreas activas y por lo general tienen una mezcla de consideraciones de competencia y usuarios automóbiles de pasajeros, autobuses, vehículos de emergencia, camiones, peatones y ciclistas durante todo el día, todo ello en un entorno limitado. Las rotondas se pueden considerar una elección óptima en situaciones donde existan o estén planeadas estrategias de administración de accesos a lo largo de un corredor que facilite los giros en U en intersecciones cercanas. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)





Figura 16: Rotonda Lujiazui en Shanghai - China.

Fuente: <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2012/10/08/rotonda-lujiazui/>

### **b. GEOMETRÍA INUSUAL**

Las intersecciones con inusuales configuraciones geométricas, ángulos de intersección, o más de cuatro ramales son a menudo difíciles de manejar operativamente. En tales situaciones las rotondas son un probado dispositivo de control de tránsito, que efectivamente administran los flujos de tránsito sin necesidad de costosos gastos en un equipamiento controlador de semáforo único, o de inusual progresión de fases. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)





Figura 17: Geometría Inusual de la rotonda Colville - Washington

Fuente: National Cooperative Highway Research Program, 2010.

### c. INTERSECCIONES POCO ESPACIADAS

Las rotondas equilibran los flujos de tránsito y dan cabida a longitudes de colas entre intersecciones cercanamente espaciadas. El ejemplo mostrado en la siguiente figura se ve como la intersección de tres calles configurada en un par de rotondas. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)





Figura 18: Rotonda poco espaciada en Buffalo – New York.

Fuente: National Cooperative Highway Research Program, 2010.

#### 2.2.7.5.4 *DIMENSIONAMIENTO A NIVEL DE PLANEAMIENTO Y REQUERIMIENTOS DE ESPACIO*

##### **a. ESTIMACIONES DE PLANEAMIENTO DE LAS NECESIDADES DE CARRIL**

Una pregunta básica que hay que responder a nivel de planeamiento es cuántos carriles son necesarios a través de una rotonda para servir a la demanda de tránsito. El número de carriles afecta la capacidad de la rotonda y su tamaño. Esta sección incluye consideraciones a nivel de planeamiento, con el propósito de la revisión inicial de la viabilidad rotonda. El análisis operacional más detallado puede ser requerido en etapas posteriores para confirmar los resultados a nivel de planeamiento. Algunas hipótesis y aproximaciones han sido necesarias en este capítulo para producir una aproximación a nivel de planeamiento. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

El planeamiento de alto nivel a menudo requiere una evaluación inicial de alternativas en la que los datos de movimiento de giro, pueden no estar disponibles, pero los volúmenes TMDA son conocidos. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

La capacidad de una rotonda, en general está dada por la cantidad de tránsito en conflicto (vehículos que viajan a lo largo de la calzada circulatoria) que está presente en cada entrada de la rotonda. Un alto volumen en conflicto reduce el número de oportunidades para que los vehículos entren a la rotonda y por lo tanto reduce la capacidad de un determinado ramal de aproximación. En cambio, cuando hay un bajo volumen de tránsito en conflicto, el ramal de aproximación tendrá una mayor capacidad y permitirá que entren a la rotonda un mayor número de vehículos. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Cada ramal de aproximación de la rotonda se evalúa individualmente para determinar el número de carriles de entrada que se requieren basado en la tasa de flujo en conflicto. El número de carriles en la calzada circulatoria es el número de carriles necesarios para garantizar la continuidad de carriles a través de la intersección. Asignaciones de carriles más detalladas y mejoras de las configuraciones de carril se pueden determinar más adelante a través de un análisis

de las operaciones más formal. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

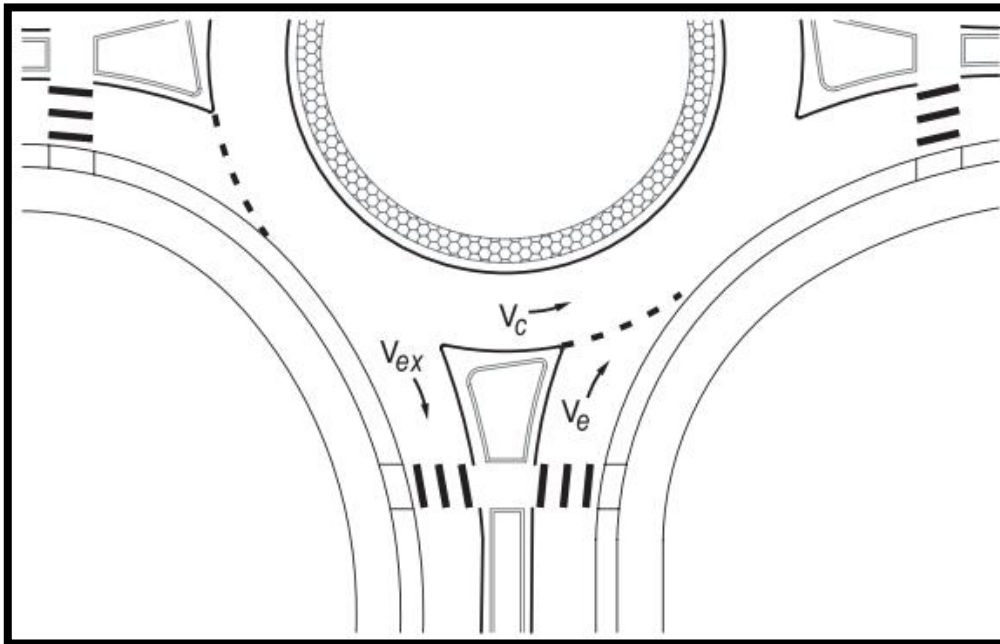


Figura 19: Flujos de tránsito en una entrada de rotonda.

Fuente: National Cooperative Highway Research Program, 2010.

La suma de los volúmenes de tránsito entrante ( $v_e$ ) y en conflicto ( $v_c$ ), como se ilustra en la figura, se puede utilizar para evaluar el número de carriles necesarios en la entrada. Si la suma de los volúmenes que entran y en conflicto es inferior a 1.000 vehículos por hora (veh/h), entonces una rotonda de un solo carril se puede suponer razonablemente que opera dentro de su capacidad. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Tabla 6: Volumen de vehículos para determinar el número de carriles de entrada requeridos.

Rango de volumen (suma de volúmenes entrantes y conflictivos)	Número de carriles requeridos
0 to 1,000 veh/h	<ul style="list-style-type: none"> <li>La entrada de un solo carril probablemente sea suficiente</li> </ul>
1,000 to 1,300 veh/h	<ul style="list-style-type: none"> <li>La entrada de dos carriles puede ser necesaria</li> <li>Un solo carril puede ser suficiente en base a un análisis más detallado</li> </ul>
1,300 to 1,800 veh/h	<ul style="list-style-type: none"> <li>La entrada de dos carriles probablemente sea suficiente</li> </ul>
Por encima de 1,800 veh/h	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se pueden requerir más de dos carriles de entrada</li> <li>Se debe realizar una evaluación más detallada de la capacidad para verificar los números y arreglos del carril</li> </ul>

Fuente: Adaptado de Transportation, Washington State Department of, 2017.



### **2.2.7.6 METODOLOGÍA HCM 2010**

El método analítico presentado en el HCM 2010 representa una importante actualización del método presentado en la edición de 2000. Se basa principalmente en un estudio reciente de las operaciones de rotonda para las condiciones de los EUA sobre la base de un estudio de 31 sitios. Los procedimientos permiten la evaluación del funcionamiento operacional de una rotonda de un solo carril o de dos carriles, existente o en proyecto, dado los niveles de demanda de tránsito. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### **CALCULO DE LA CAPACIDAD EN ROTONDAS CON LA METODOLOGÍA HCM 2010**

Paso 1: Convierta volúmenes de demanda de movimiento a tasas de flujo.

Paso 2: Ajuste las tasas de flujo para vehículos pesados.

Paso 3: Determine las tasas de flujo circulante y saliente.

Paso 4: Determine las tasas de flujo de entrada por carril.

Paso 5: Determine la capacidad de cada carril de entrada y carril de derivación según corresponda en equivalentes de automóviles de pasajeros

Paso 6: Determine el conflicto peatonal en relación a los vehículos.

Paso 7: Convertir las velocidades y capacidades de flujo de carril en vehículos por hora.

Paso 8: Calcule la relación volumen-capacidad de cada carril.

Paso 9: Calcule el retraso de control promedio para cada carril.

Paso 10: Determine el nivel de servicio (NDS) para cada carril en cada enfoque.

Paso 11: Calcule el retraso de control promedio y determine el nivel de servicio (NDS) para cada enfoque y la rotonda como un todo.

Paso 12: Calcule las colas del percentil 95 para cada carril. (Transportation Research Board, 2010)

#### **2.2.7.6.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS**

El análisis operacional de las rotondas requiere recopilación o proyección de



volúmenes de movimientos de giro en el período pico. Para intersecciones convencionales existentes, se determina mediante técnicas estándar. Para rotondas existentes, los movimientos de giro se recogen con una variedad de técnicas: (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

- Grabación en directo de los patrones de movimiento de giro con observadores. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)
- campo. Esto sólo es factible en condiciones de bajo volumen la rotonda completa es visible desde un solo lugar. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)
- Grabación en vídeo de la intersección completa, seguido por la extracción manual de los movimientos de giro del video. Esta técnica es posible bajo cualquier condición de volumen, pero por lo general requiere que todos los movimientos de giro sean visibles desde una ubicación. Se utilizan varias ubicaciones de vídeo, pero deben ser cuidadosamente sincronizados para extraer datos en forma satisfactoria. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)
- Observadores de campo en cada una de las salidas, grabación manual vehículos que se acercan a la salida. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)
- Vincular contadores colocados transversalmente en cada entrada, cada salida, y la calzada circulatoria en frente de cada isleta partidora, además del conteo manual de los movimientos de giro a la derecha. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)
- Técnicas de estudio de origen-destino. Esto es generalmente más efectivo cuando se están estudiando al mismo tiempo múltiples intersecciones. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### 2.2.7.6.2 DETERMINACIÓN DE ÍNDICES DE FLUJO EN ROTONDAS

El índice de flujo que circula en oposición en una determinada entrada se define como el flujo en conflicto con el flujo de entrada de ese ramal. Los movimientos que contribuyen a que el flujo circule hacia el norte se ilustran en el siguiente gráfico. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)



Donde:

$V_{CNB}$  es el flujo que circula frente a la entrada norte, y los movimientos que contribuyen son dirección este directo ( $V_{EBT}$ ), dirección este giro a la izquierda ( $V_{EBL}$ ), dirección este giro en U ( $V_{EBU}$ ), dirección sur giro a la izquierda ( $V_{SBL}$ ), dirección sur giro en U ( $V_{SBU}$ ), y dirección oeste giros en U ( $V_{WBU}$ ). (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

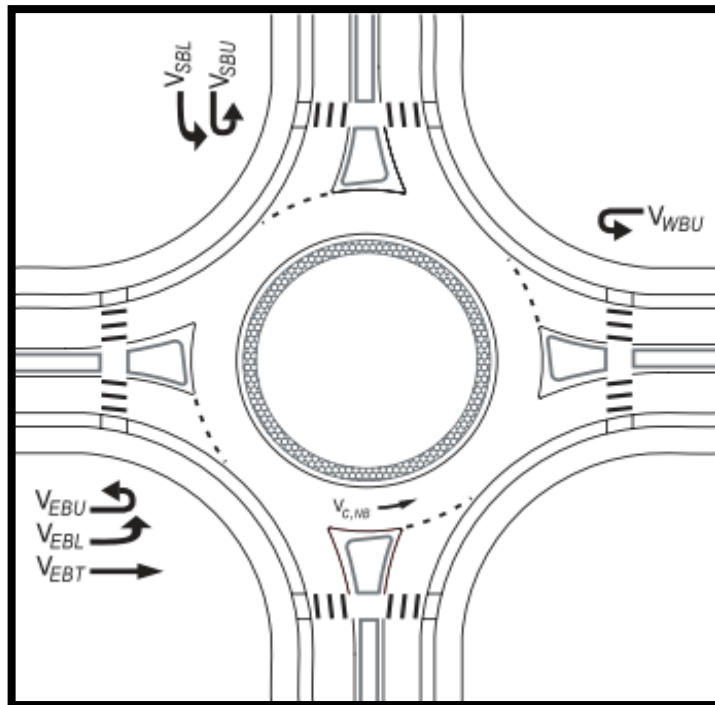


Figura 20: Cálculo del caudal circulante.

Fuente: National Cooperative Highway Research Program, 2010.

El flujo que sale por un ramal dado se utiliza principalmente en el cálculo del flujo de conflicto para los carriles de desvío para giro a derecha y en la determinación de las colas en los cruces peatonales laterales de salida. El cálculo del flujo que sale por la salida de dirección sur se ilustra en la siguiente figura. Si hay un carril de desvío inmediatamente corriente arriba de la entrada, el flujo que usa el carril de desvío se deduce del flujo de salida. En esta Figura,  $V_{ex/SB}$  es el flujo de salida hacia el sur, y los movimientos que contribuyen son dirección este giro a la derecha ( $V_{EBR}$ ), dirección sur directo ( $V_{SBT}$ ), dirección oeste giro a la izquierda ( $V_{WBL}$ ), dirección norte giro en U ( $V_{NBU}$ ). (National Cooperative Highway Research Program, 2010)



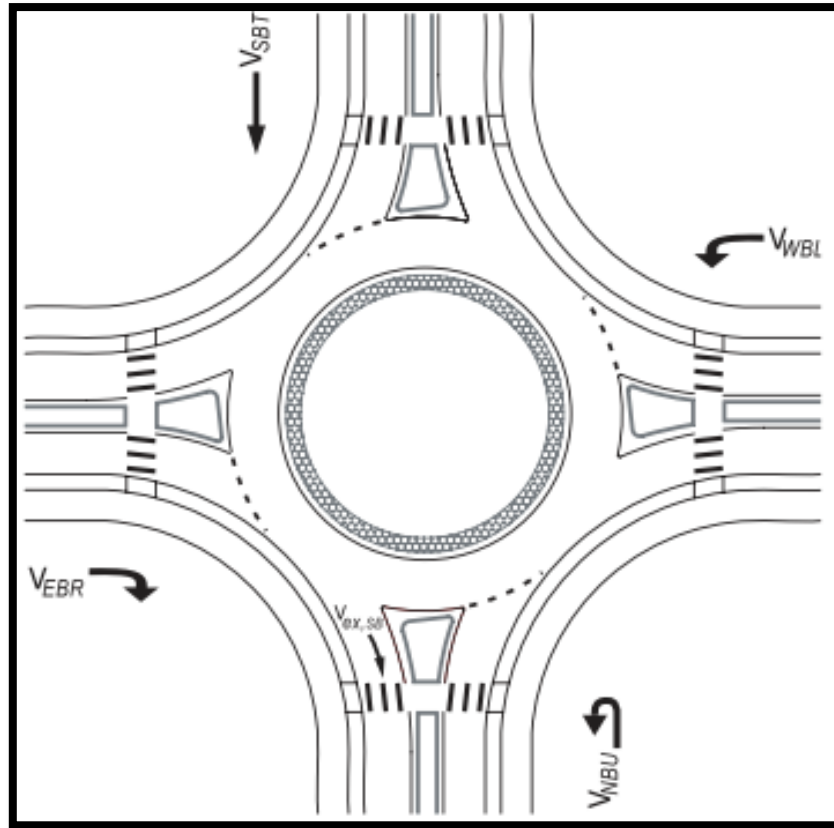


Figura 21: Cálculo del flujo de salida.

Fuente: National Cooperative Highway Research Program, 2010.

### 2.2.7.6.3 AJUSTES POR FLOTA MIXTA DE VEHÍCULOS

Para tener en cuenta las características de flujo de vehículos, se ajusta la tasa de flujo para cada movimiento con los factores indicados en el cuadro siguiente. Tener en cuenta que las ecuaciones de capacidad señaladas en este capítulo incorporan implícitamente estos factores. Como resultado, los ajustes de estos factores deben hacerse sólo en relación con la revisión de los efectos de los ajustes de otros factores. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Tabla 7: Equivalencias de los vehículos de pasajeros.

Tipo de vehículo	Equivalencia de vehículos de pasajeros ET
Vehículo de Pasajeros	1.0
Vehículo pesado	2.0
Bicicleta	0.5

Fuente: Adaptado de Transportation Research Board, 2010.

El cálculo para incorporar estos valores se da en la ecuación siguiente:

$$v_{i,pce} = \frac{v_i}{f_{HV}} f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T (E_T - 1)}$$

Donde:

$v_{i,pce}$  = Tasa de flujo de demanda para movimiento i

$v_i$  = Volumen de demanda de movimiento

$f_{HV}$  = Factor de ajuste de vehículos pesados

$P_T$  = Porcentaje de volumen de la demanda de vehículos pesados

$E_T$  = Vehículos de pasajeros equivalentes para vehículos pesados

(National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### 2.2.7.6.4 CAPACIDAD

Una rotonda es una intersección regulada con señal de prioridad; pero, por su diseño geométrico, hay un solo movimiento secundario que ingresa con ángulo oblicuo a la intersección. La capacidad de un acceso dependerá sólo del flujo que circula frente a este, llamado flujo circulante. (Fernandez A & Dextre, 2011)

La capacidad de cada entrada a una rotonda es la velocidad máxima a la que se puede esperar razonablemente que los vehículos ingresen a la rotonda desde una aproximación durante un período de tiempo determinado bajo las condiciones de tránsito y carreteras (geométricas). Un análisis operacional considera un conjunto preciso de condiciones geométricas y tasas de flujo de tráfico definidas para un período de análisis de 15 minutos para cada entrada indirecta. (The Federal Highway Administration, 2004)

La capacidad de una infraestructura vial es el máximo número de vehículos que razonablemente pueden pasar por una intersección durante un intervalo de tiempo dado, normalmente una hora, bajo las condiciones prevalecientes de la infraestructura vial, del tránsito y de los dispositivos de control. (Transportation Research Board, 2010)

La capacidad de un enfoque indirecto está directamente influenciada por los patrones de flujo. Los tres flujos de interés, el flujo entrante, el flujo circulante y el flujo saliente. (Transportation Research Board, 2010)

## A) CAPACIDAD MÉTODO HCM

Sobre la base de la investigación nacional, el HCM emplea una serie de modelos simples de regresión empírica, para reflejar la capacidad de las rotondas con un máximo de dos carriles.

La capacidad de un carril de entrada con la oposición de un carril de circulación (ejemplo, una entrada de un solo carril en una rotonda de un solo carril, o cualquier carril de una entrada de dos carriles en conflicto con un carril de circulación se basa en el flujo en conflicto) La Ecuación para la estimación de la capacidad se da en: (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

$$C_{e,pce} = 1,130e^{(-1.0 \times 10^{-3})v_{c,pce}}$$

Donde:

$C_{e,pce}$  = Capacidad de carril de entrada, ajustado para vehículos pesados

$v_{c,pce}$  = Flujo en conflicto

Las ecuaciones siguientes se dan la capacidad de los carriles de la derecha e izquierda, respectivamente, de una entrada de rotonda de dos carriles con la oposición de dos carriles en conflicto: (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

$$C_{e,R,pce} = 1,130e^{(-0.7 \times 10^{-3})v_{c,pce}}$$

$$C_{e,L,pce} = 1,130e^{(-0.75 \times 10^{-3})v_{c,pce}}$$

Donde:

$C_{e,R,pce}$  = Capacidad de carril de entrada derecha, ajustado para vehículos pesados

$C_{e,L,pce}$  = Capacidad de carril de entrada izquierda, ajustado para vehículos pesados

$v_{c,pce}$  = Flujo en conflicto

(National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### CARRILES DE DESVÍO PARA GIRAR A LA DERECHA

Los carriles de desvío derecha, no comparten la misma línea de entrada con los carriles designados para que los vehículos atravesen y giren a la izquierda. Se usan

dos tipos de carriles de desvío para giro a derecha en rotondas de uno o varios carriles donde:

La capacidad de un carril de desvío para giro a derecha ceda el paso con oposición de un carril de salida, se aproxima utilizando la ecuación (1). (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

$$C_{bypass,pce} = 1,130e^{(-1.0 \times 10^{-3})v_{ex,pce}} \dots\dots(1)$$

La capacidad de un carril de desvío para giro a izquierda ceda el paso con oposición de dos carriles de salida, se aproxima utilizando ecuación (2). (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

$$C_{bypass,pce} = 1,130e^{(-0.7 \times 10^{-3})v_{ex,pce}} \dots\dots(2)$$

Donde:

$C_{bypass,pce}$  = Capacidad de carril de desvío, ajustado para vehículos pesados

$v_{ex,pce}$  = Flujo en conflicto de salida

(National Cooperative Highway Research Program, 2010)

## B) CAPACIDAD MÉTODO TRL

Este modelo estadístico, se basa en el análisis de 88 rotondas con más de 11.000 minutos de recolección de datos, en donde se han deducido las siguientes fórmulas a partir de regresiones no lineales, en la cual se relaciona la capacidad de las entradas en base al flujo del anillo de circulación y parámetros que dependen de la geometría de la entrada. (Transport Research Laboratory, 1980)

Este método parte de la hipótesis de que la relación entre los dos tránsitos, el que circula por el anillo y el entrante, es una relación lineal o casi lineal que calcula la capacidad de cualquier rotonda, excepto en las que poseen calzadas separadas. (Transport Research Laboratory, 1980)

### - Ángulo de entrada a la rotonda ( $\varphi$ )

Para la determinación de este parámetro se pueden aplicar procedimientos diferentes que dependen de la configuración de los elementos que componen la rotonda. Los

dos primeros métodos son aplicables para rotondas convencionales; estos son prácticamente iguales entre sí y se exponen a continuación. (Transport Research Laboratory, 1980)

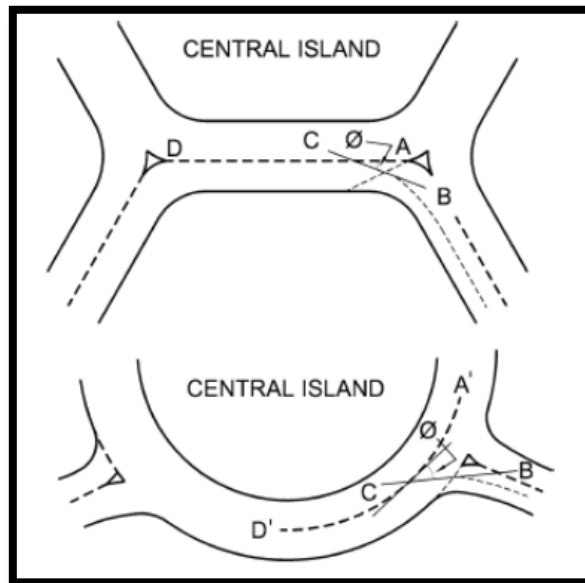


Figura 22: Construcción geométrica para hallar el valor de  $\phi$

Fuente: (Transport Research Laboratory, 1980)

En cambio, el tercer procedimiento, aplicable a rotondas con formas más irregulares, tales como se muestra en la figura, consiste en restar de  $90^\circ$  la mitad del ángulo que forman las líneas tangentes a dos curvas en los puntos de intersección de éstas con el borde exterior de la rotonda. Estas curvas son equidistantes a las medianas y a los bordes exteriores del carril de entrada y el carril de salida contiguo. (Transport Research Laboratory, 1980)

$$\phi = 90^\circ - \frac{\widehat{GLB}}{2}$$

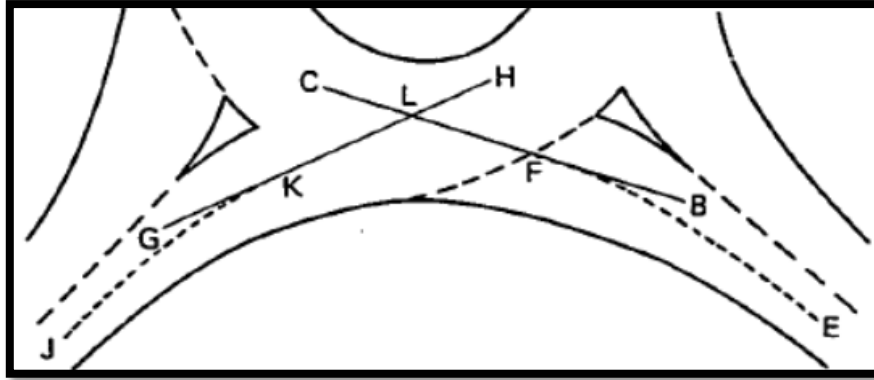


Figura 23: Construcción geométrica para hallar el valor de  $\phi$ .

Fuente: (Transport Research Laboratory, 1980)

- **Radio de curvatura de la curva de entrada (r)**

El radio de la curva de entrada se calcula como el mínimo radio de curvatura del círculo que se pueda inscribir en la curva de entrada a la rotonda. (Transport Research Laboratory, 1980)

- **Ancho de entrada a la rotonda (e)**

El ancho de entrada equivale a la longitud del segmento perpendicular a la curva de entrada construido a partir del punto A de la isla ubicada en la entrada a la rotonda.

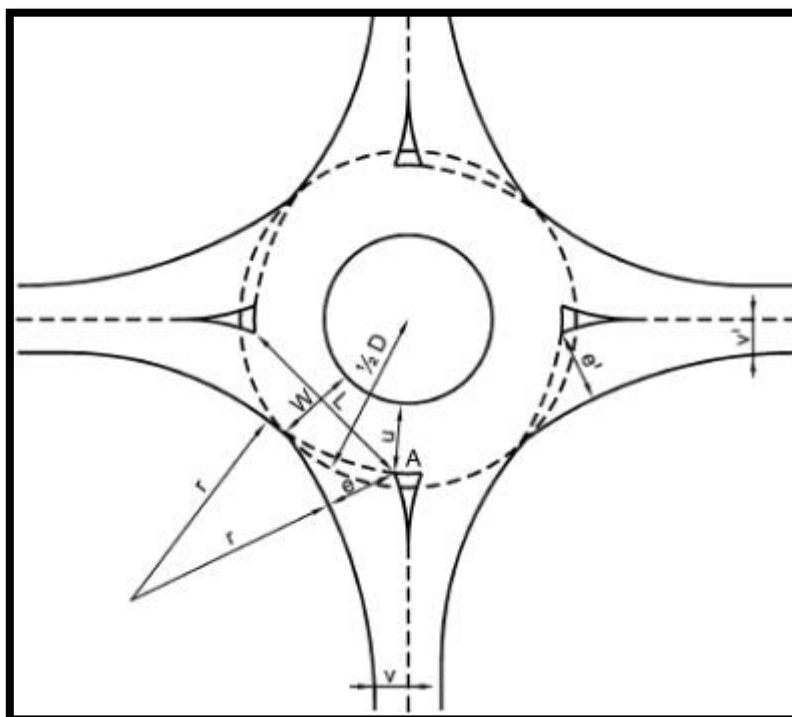


Figura 24: Parámetros geométricos de una rotonda.

Fuente: (Transport Research Laboratory, 1980)



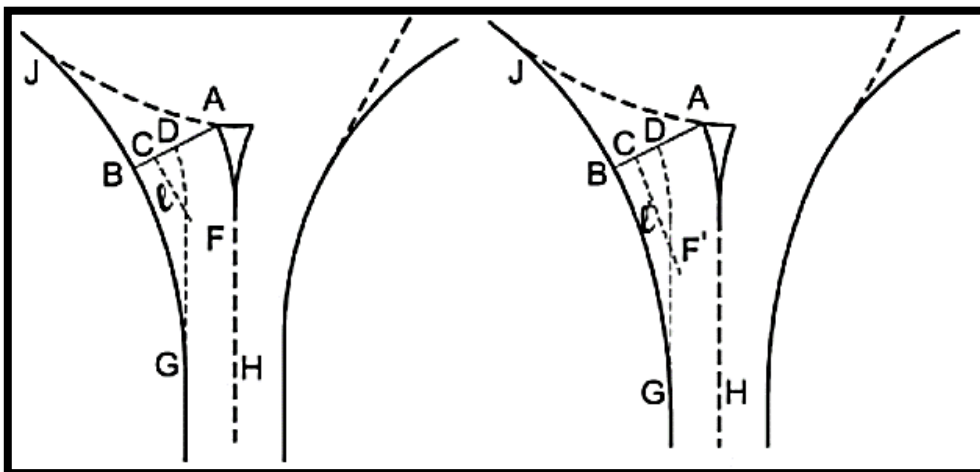
En caso de que no haya isla, o la forma de ésta sea diferente se prolongará la mediana de la entrada hacia el borde exterior de la rotonda; así, el punto de intersección será el que reemplace al punto A. (Transport Research Laboratory, 1980)

#### - Longitud de la curva de entrada (l)

En la figura 19, se muestra la ubicación de la longitud de la curva de entrada "l" en la rotonda. Esta se calcula al trazar una curva paralela a HA desplazada una distancia igual a "v". Esta curva interseca en D al segmento que define al ancho de entrada "e". Se ubica el punto medio C de BD y se traza un segmento perpendicular a BD que pase por C (mediatriz). La longitud del segmento determinado por C y el punto de intersección de la mediatriz y la curva GD será la longitud "l", definida como la longitud de desarrollo de la curva de entrada. El valor de "l" se halla de forma similar, pero en vez de trazar la mediatriz, se trazará una curva paralela a BG que pase por C. El segmento determinado por C y el punto de intersección de GD con la curva paralela a BG será la longitud de "l'". (Transport Research Laboratory, 1980)

Figura 25: Construcción geométrica para hallar el valor de l.

Fuente: (Transport Research Laboratory, 1980)



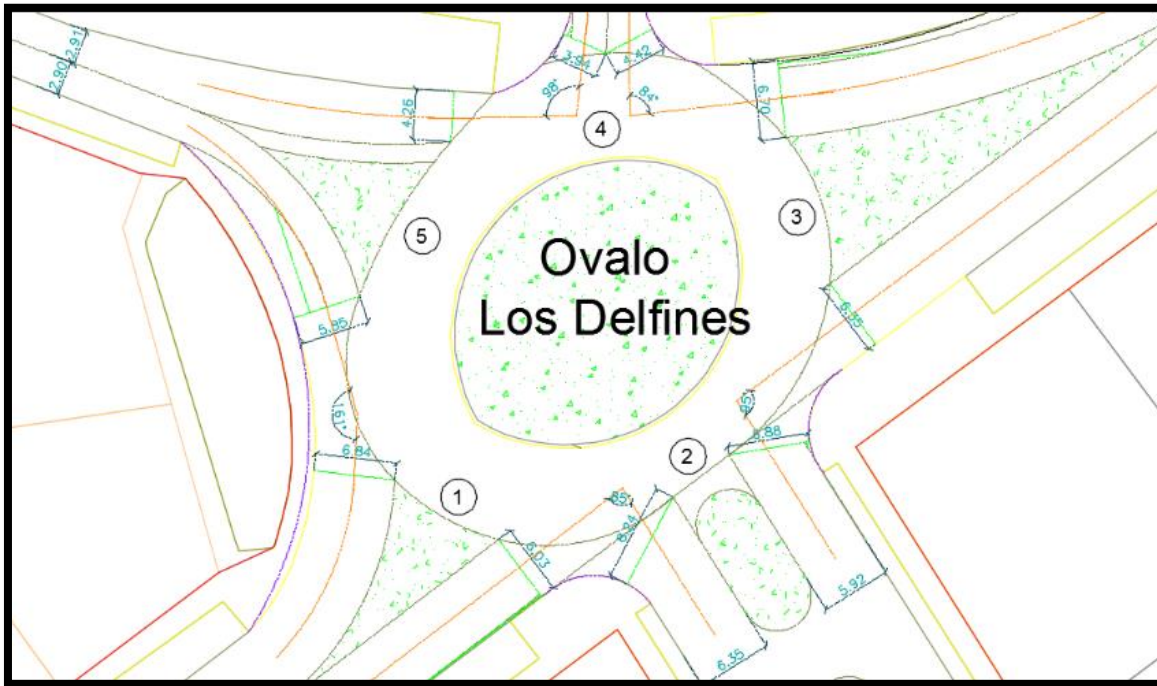


Figura 26: Ovalo irregular Los Delfines con 5 entradas con 4 salidas en Lima.

Fuente: (Niето, 2016)

$$Q_e = k \times (F - f_c \times Q_c)$$

Donde:

$Q_e$  = Capacidad de una entrada, veh/h.

$Q_c$  = Flujo circulante, veh/h.

$k, F$  y  $f_c$  = Parámetros calibrados en función de las características geométricas de la entrada y de la rotonda.

$$k = 1 - 0.00347 \times (\phi - 30) - 0.978 \times \left(\frac{1}{R} - 0.05\right)$$

$$F = 303 \times x$$

$$f_c = 0.210 \times t \times (1 + 0.2x)$$

$$t = 1 + \left[ \frac{0.5}{1 + e^{\left(\frac{D-60}{10}\right)}} \right]$$

$$x = v + \frac{(e-v)}{(1+2S)}$$



$$S = \frac{(e-v)}{l}$$

$e$  = Ancho de la entrada (m).

$v$  = Ancho del acceso de entrada (m).

$l$  = Longitud (m).

$S$  = Agudeza de la aproximación.

$D$  = Diámetro del círculo inscrito (m).

$\phi$  = Ángulo de entrada (°).

$R$  = Radio de entrada (m).

$x$  = Constante dependiente de  $e$ ,  $v$ ,  $S$ . (Transport Research Laboratory, 1980)

Tabla 8: Rangos para los cuales el modelo lineal de Kimber es válido

Variable	Símbolo	Rango
Ancho de entrada (m)	$e$	3,6 – 16,5
Mitad del ancho de la calzada de aproximación (m)	$v$	1,9 – 12,5
Longitud de desarrollo de la curva de entrada (m)	$l$	1 - $\infty$
Agudeza de la entrada (adimensional)	$S$	0 – 2,9
Diámetro del círculo inscrito (m)	$D$	13,5 – 171,6
Ángulo de entrada (°)	$\phi$	0 - 77
Radio de entrada (m)	$r$	3,4 - $\infty$

Fuente: (Transport Research Laboratory, 1980)

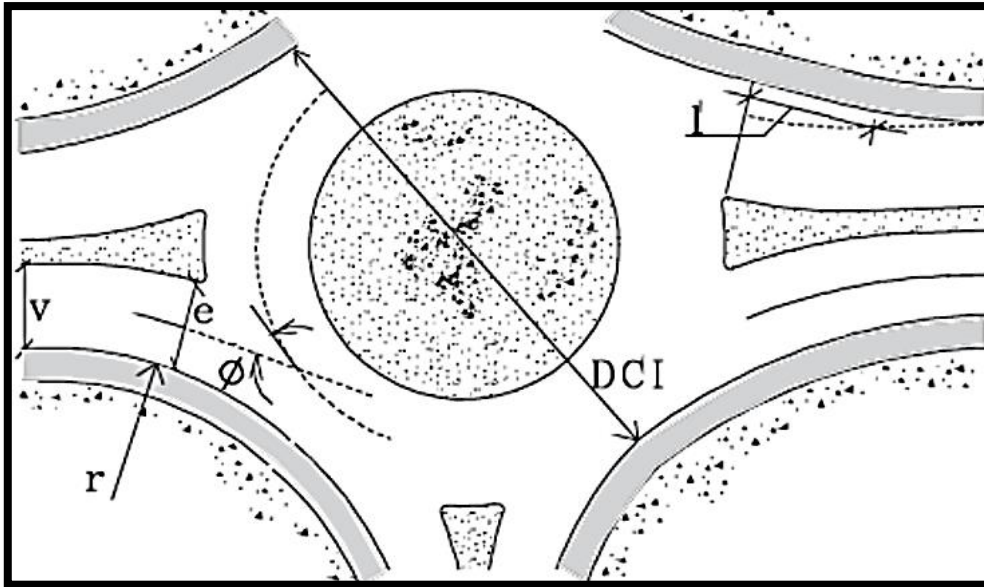


Figura 27: Parámetros geométricos del método TRL.

Fuente: (Transport Research Laboratory, 1980)

#### 2.2.7.6.5 RELACIÓN VOLUMEN-CAPACIDAD

La relación volumen-capacidad es una comparación de la demanda en la entrada de la rotonda con la capacidad de la entrada y proporciona una evaluación directa de la suficiencia de un diseño dado. Para un carril determinado, la relación volumen-capacidad,  $x$ , se calcula dividiendo la capacidad calculada del carril por su tasa de flujo de demanda, como se muestra en la ecuación. Ambos valores de entrada están en vehículos por hora. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

$$x = \frac{v}{c}$$

Donde:

$x$  = Relación Volumen – Capacidad

$v$  = Volumen (Veh/h)

$c$  = Capacidad (Veh/h)

#### 2.2.7.6.6 CONTROL DE DEMORA

$$d = \frac{3,600}{c} + 900T \left[ x - 1 + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{\left(\frac{3,600}{c}\right)x}{450T}} \right] + 5 \cdot \min[x, 1]$$

Donde:

$d$  = Control de retardo promedio (s/veh)

$x$  = Relación de volumen - capacidad por carril

$c$  = Capacidad de carril (veh/h)

$T$  = Periodo de tiempo, h ( $T=1$  para un análisis de 1 hora,  
 $T=0.25$  para un análisis de 15 minutos)

(National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### 2.2.7.6.7 CALIDAD DE SERVICIO Y NIVEL DE SERVICIO

El HCM define calidad de servicio como cuán bien funciona una instalación de transporte o servicio desde la perspectiva de un viajero. Por otra parte, el HCM define los niveles de servicio (NDS) como una estratificación cuantitativa de una medida del funcionamiento o medidas que representan la calidad del servicio. Para rotondas, el nivel de servicio se definió usando control de demora, se asigna nivel de servicio F si la relación de volumen-capacidad de un carril es superior a 1 independientemente del control de demora. Para evaluar los niveles de servicio en la aproximación y en la intersección, los niveles de servicio se basan únicamente en el control de demora. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Tabla 9: Criterios de niveles de servicio.

Control de demora (s/veh)	Nivel de servicio por relación Volumen - Capacidad	
	$v/c \leq 1.0$	$v/c > 1.0$
0-10	A	F
>10-15	B	F
>15-25	C	F
>25-35	D	F
>35-50	E	F
>50	F	F

Fuente: Adaptado de (Transportation Research Board, 2010)

#### 2.2.7.6.8 LONGITUD DE COLA

La longitud de cola es importante al evaluar la adecuación del diseño geométrico de las aproximaciones de la rotonda. La duración estimada de una cola también proporciona información adicional sobre las prestaciones de funcionamiento de una rotonda en comparación con otros tipos de intersección. La interacción de la cola con intersecciones adyacentes o entradas de vehículos es otra consideración

importante. La cola de 95 percentil de un carril en una aproximación determinada se calcula utilizando la siguiente ecuación. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

$$Q_{95} = 900T \left[ x - 1 + \sqrt{(1-x)^2 + \frac{\left(\frac{3,600}{c}\right)x}{150T}} \right] \left(\frac{c}{3,600}\right)$$

Donde:

$Q_{95}$  = Cola de 95 percentil de un carril (veh)

$x$  = Relación de volumen - capacidad por carril

$c$  = Capacidad de carril (veh/h)

$T$  = Período de tiempo, h ( $T=1$  para un análisis de 1 hora,  
 $T=0.25$  para un análisis de 15 minutos)

(National Cooperative Highway Research Program, 2010)

## **2.2.7.7 DISEÑO GEOMÉTRICO**

### **2.2.7.7.1 DISEÑO PARA USUARIOS NO-MOTORIZADOS**

Al igual que con el vehículo motorizado de diseño, los criterios de diseño de los usuarios potenciales no motorizados de las rotondas (por ejemplo, ciclistas, peatones, patinadores, usuarios de sillas de ruedas, cochecitos) deben considerarse en el desarrollo de muchos de los componentes del diseño geométrico de una rotonda. Estos usuarios abarcan una amplia gama de edades y habilidades, y pueden tener un efecto significativo en el diseño de una instalación. Las dimensiones del diseño básico para los usuarios de diseño diferentes se dan en el siguiente cuadro. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)



Tabla 10: Dimensiones clave de diseño para usuarios no-motorizados.

<b>Usuario</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Características de la rotonda de afectados</b>
<b>Ciclista</b>		
Ancho	1.80 m	Ancho de isleta partidora en cruce peatonal
Ancho mínimo de operación	1.20 m	Ancho de carril ciclista en accesos; ancho de senda de uso compartido.
<b>Peatones (caminar)</b>		
Ancho	0.5 m	Ancho de vereda, ancho cruce peatonal
<b>Usuario silla de ruedas</b>		
Ancho mínima	0.75 m	Ancho de vereda, ancho de cruce peatonal
Ancho de operación	0.90 m	Ancho de vereda, ancho de cruce peatonal
<b>Persona que empuja el coche</b>		
Longitud	1.70 m	Ancho de isleta ancho partidora en cruce peatonal
<b>Patinadores</b>		
Ancho de trabajo típico	1.80 m	Ancho de vereda

Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.

Detalles adicionales sobre el diseño para peatones y ciclistas. Hay dos cuestiones generales de diseño que son más importantes para los usuarios no motorizados. En primer lugar, la lenta velocidad de los vehículos automotores facilita el uso más seguro de las rotondas por parte de los usuarios no motorizados. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### 2.2.7.7.2 TAMAÑO, POSICIÓN Y ALINEAMIENTO DE APROXIMACIONES

Tres decisiones clave de diseño son optimizar tamaño, posición y alineamiento de los ramales aproximación. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

El diseño de una rotonda implica optimizar tres decisiones de diseño: (1) el tamaño, (2) la posición, y (3) el alineamiento de los ramales de aproximación. Existen numerosas combinaciones posibles de cada elemento, cada una con sus propias ventajas y desventajas. A menudo, la selección de la combinación óptima se basa

en las limitaciones del emplazamiento del proyecto, equilibradas con la capacidad de controlar adecuadamente la velocidad de los vehículos, acomodar los vehículos pesados, y cumplir los otros objetivos de diseño. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### 2.2.7.7.3 DIÁMETRO DE CÍRCULO INSCRITO

La selección de un diámetro del círculo inscrito es generalmente el primer paso en el proceso de diseño. Después de la terminación de un concepto de diseño, una mirada crítica se debe dar a la evaluación de si el diámetro inicial supone es óptimo. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

El diámetro del círculo inscrito debe ser lo suficientemente grande para acomodar el vehículo de diseño mientras se mantiene una velocidad más lenta de los vehículos pequeños. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

El diámetro del círculo inscrito en una rotonda de un solo carril lo general tiene que ser por lo menos 32 m para acomodar un WB-15 de vehículo de diseño, un diámetro más grande es normalmente necesario para los vehículos de diseño más grande que un WB-15. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Para una rotonda de dos carriles, el diámetro mínimo círculo inscrito es normalmente de 46 m. Diámetros en el rango de 49 a 55 m son comunes puntos de partida para diseñarla rotonda de dos carriles. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Tabla 11: Rangos típicos de diámetro de círculo inscrito de rotonda.

Configuración de Rotonda	Vehículo de Diseño Tipo	Rango de Diámetro de Círculo Inscrito Común *
Minirrotonda	SU-30 (SU-9)	14 a 27 m
Rotonda de un solo Carril	B-12	27 a 46 m
	WB-15)	32 a 46 m
	(WB-20	40 a 55 m
Multicarril rotonda (2 carriles )	WB-15	46 a 67 m
	WB-20	50 a 67 m
Multicarril rotonda (3 carriles )	WB-15	61 a 76 m
	WB-20	67 a 91 m

Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.

Se supone un ángulo de  $90^\circ$  entre las entradas y no más de cuatro patas. La lista de vehículos posible diseño no es todo incluido.

#### 2.2.7.7.4 ALINEAMIENTO DE LAS APROXIMACIONES

El alineamiento de los ramales de aproximación juega un papel importante en el diseño de una rotonda. El alineamiento afecta la cantidad de desviación (control de velocidad), a la capacidad para adaptar el vehículo de diseño, y a los ángulos de visibilidad de los ramales adyacentes. Generalmente, el tamaño y posición de la rotonda gobiernan el alineamiento óptimo de las aproximaciones. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

**Desplazamiento del alineamiento hacia la izquierda del centro** Se resume varias opciones para los alineamientos de las aproximaciones. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

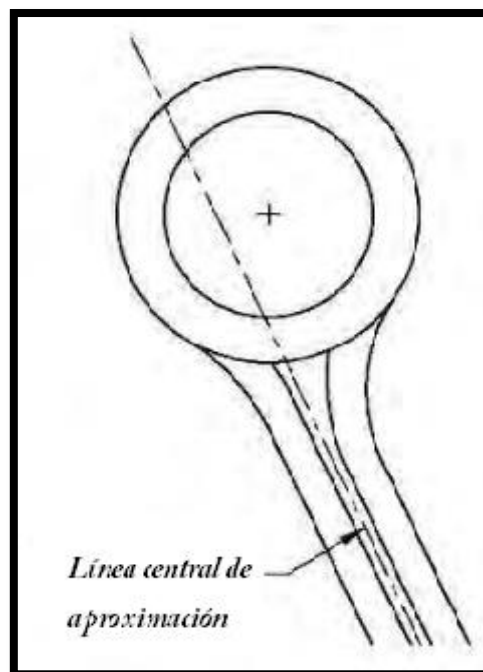


Figura 28: Desplazamiento del alineamiento hacia la izquierda del centro.

Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.

#### VENTAJAS:

- Permite mayor desviación.

- Beneficioso para acomodar los camiones grandes con un círculo inscrito de diámetro pequeño, permite un radio de entrada más grande, mientras que mantiene el control y de la velocidad y desviación.
- Puede reducir los impactos en el lado derecho del camino. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### DESVENTAJAS

- El aumento del radio de salida o la salida tangencial reduce el control de las velocidades de salida y de la aceleración por la zona de cruce peatonal. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### Alineamiento a través del Centro de la rotonda.

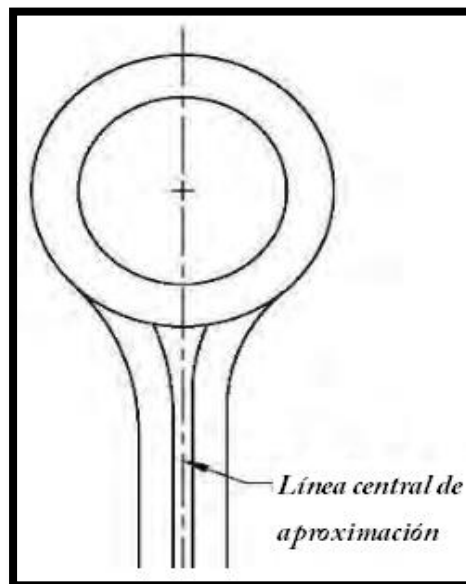


Figura 29: Alineamiento a través del Centro de la rotonda.

Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.

### VENTAJAS:

- Reduce la cantidad de cambios de alineamiento a lo largo de la camino de aproximación para mantener el impacto más localizados a la intersección.
- Permite una cierta curvatura de salida para animar a los conductores a mantener velocidades más lentas a través de la salida. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

## DESVENTAJAS

- El aumento del radio de salida reduce el control de las velocidades/aceleraciones de salida a través de la zona de cruce peatonal.
- Puede requerir un diámetro de círculo inscrito ligeramente mayor (comparado con el diseño de desplazamiento a la izquierda) para proporcionar el mismo nivel de control de velocidad. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### Alineamiento a la derecha del centro

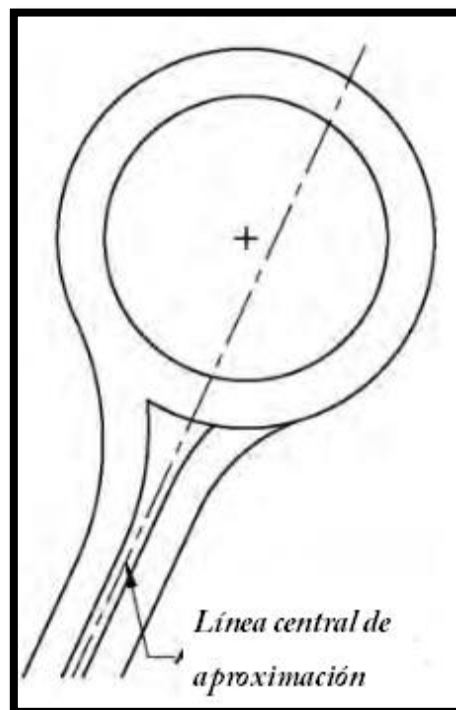


Figura 30: Alineamiento a la derecha del centro.

Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.

## VENTAJAS:

- Puede utilizarse para rotondas de gran diámetro de círculo inscrito donde los objetivos de control de velocidad aún pueden cumplirse
- Aunque no es de uso general, esta estrategia puede ser apropiada en algunos casos (siempre que se cumplan los objetivos de velocidad) para minimizar los impactos, mejorar ángulos de visión, etc. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

## DESVENTAJAS

- A menudo, más difícil de alcanzar los objetivos de control de velocidad, sobre todo en rotondas de diámetro pequeño
- Aumenta la curvatura de salida que debe maniobrarse (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### 2.2.7.7.5 ÁNGULO ENTRE RAMALES DE APROXIMACIÓN

#### Ramales perpendiculares

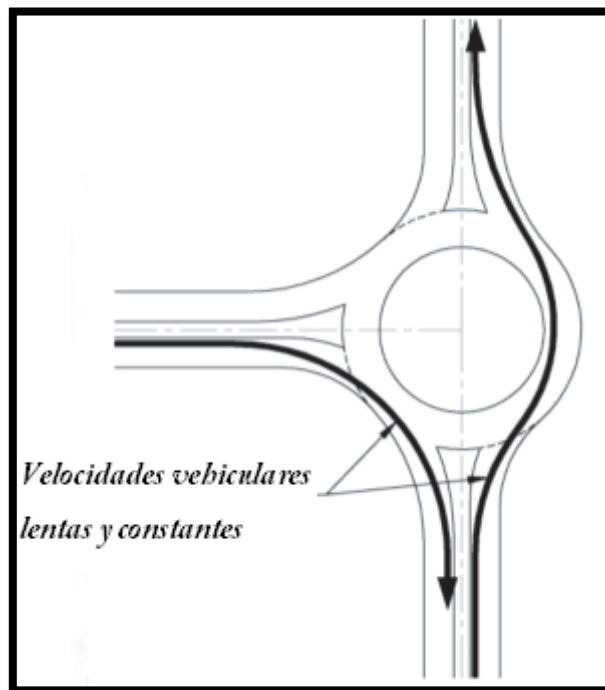


Figura 31: Ramales perpendiculares.

Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.

En general, los ángulos rectos entre aproximaciones proporcionarán velocidades lentas y uniformes si se usan en combinación con otras características de diseño adecuadamente dimensionadas. A menudo es más fácil obtener velocidades aceptables de trayectorias rápidas con un ángulo de aproximación recto que con una oblicuidad. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Cuando la intersección de los caminos es oblicua bajo las condiciones actuales, para alcanzar un estado ideal sería necesario realinear uno o más ramales de aproximación. La posibilidad de realinear un ramal puede depender de otras limitaciones del lugar y puede no ser posible en todos los casos. Generalmente es



deseable realinear para alcanzar un ángulo lo más cercano a  $90^\circ$  como sea práctico. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### Ángulo grande entre ramales

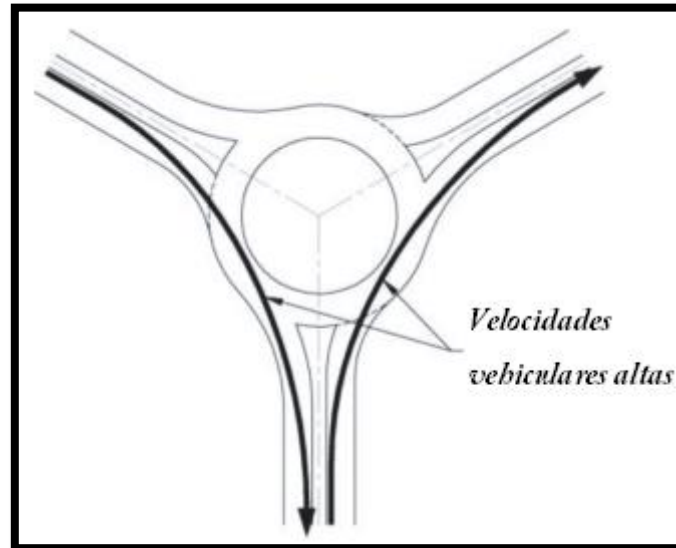


Figura 32: Ramales perpendiculares.

Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.

En situaciones que implican un gran ángulo entre los ramales, es conveniente volver a alinear uno o más ramales para tratar de lograr una condición más perpendicular. Los ángulos grandes dificultan proveer la desviación adecuada y pueden resultar en altas velocidades de los vehículos, especialmente para los giros a la derecha. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Los radios de entrada para las rotondas multicarriles deben superar los 20 m para fomentar adecuadas trayectorias naturales y evitar colisiones laterales en la entrada. Los ingenieros deben evitar uso de geometrías demasiado apretadas para alcanzar los objetivos de la trayectoria más rápida. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Las opciones para obtener el control de velocidad adecuada sin realinear las aproximaciones incluyen pero no están limitados a: (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

- Cambiar el diámetro del círculo inscrito.
- Desviar el eje de la aproximación hacia la izquierda del centro de la rotonda.

- Reducir los anchos y radios de entrada. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### 2.2.7.7.6 ROTONDAS DE UN SOLO CARRIL

##### A. ISLETAS PARTIDORAS

Generalmente, la longitud total de la isleta elevada debe ser por lo menos de 15 m, aunque es conveniente de 30 m para proteger a los peatones y alertar a los conductores acerca de la geometría de la rotonda. En los caminos de mayor velocidad, a menudo son beneficiosas isletas partidoras de 45 m o más. Además, la isleta partidora debe extenderse más allá del final de la curva de salida para evitar que el tránsito saliente invada accidentalmente la trayectoria del tránsito opuesto. El ancho de la isleta partidora debe tener un mínimo de 1,8 m en el cruce peatonal para proveer adecuado refugio a los peatones, incluidos los usuarios en sillas de ruedas, a quienes empujan un cochecito, o caminan al lado de su bicicleta. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

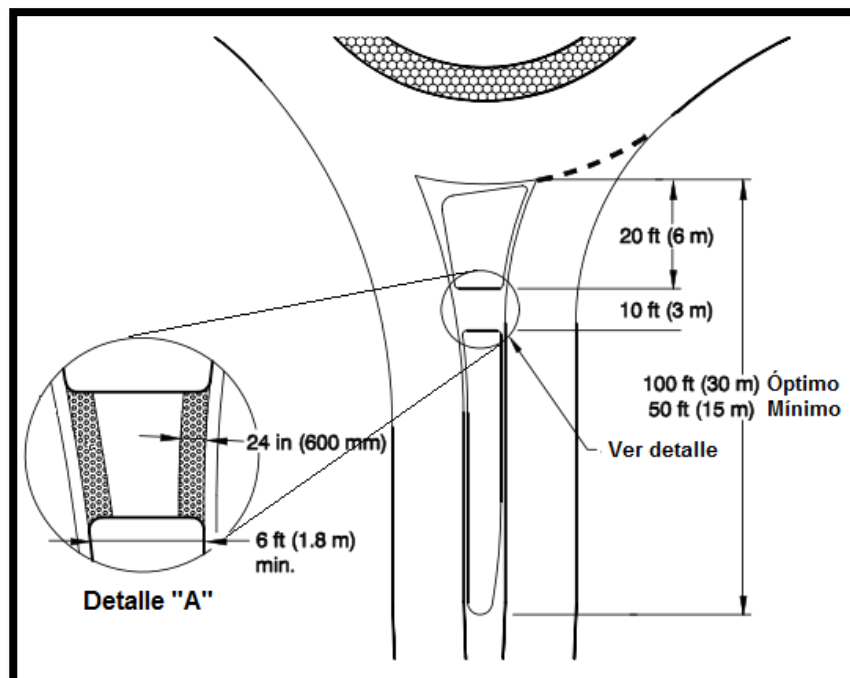


Figura 33: Dimensiones mínimas de la isleta partidora.

Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.

##### B. ANCHO DE ENTRADA

La anchura de la entrada se mide desde el punto donde la línea de entrada cruza el borde izquierdo de la calzada hasta el borde derecho de la calzada, a lo largo de una



línea perpendicular a la línea del cordón derecho. La anchura de cada entrada está dictada por las necesidades del flujo de tránsito que entra, principalmente el vehículo de diseño. Sin embargo, esto debe equilibrarse con otros objetivos de comportamiento, incluyendo el control de la velocidad y las necesidades del cruce peatonal. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Los anchos típicos de las entradas de un solo carril van de 4,2 a 5,5 m, los cuales suelen ser acompañados desde los anchos corriente arriba. Sin embargo, los valores superiores o inferiores a este rango pueden ser apropiados para el vehículo de diseño del lugar específico, y los requerimientos de velocidad de las trayectorias vehiculares críticas. Un ancho de entrada de 4.6 m es un valor común de partida para una rotonda de un solo carril. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### **C. ANCHO DE LA CALZADA CIRCULATORIA**

El ancho requerido de la calzada circulatoria se determina por el número de carriles de entrada y los requerimientos de giro del vehículo de diseño. Excepto opuesto a un carril de solo-giro-derecha, el ancho circulante debe ser debe ser por lo menos igual al ancho de entrada máximo, y hasta el 120% de la mayor anchura de entrada. Para rotondas de un solo carril, por lo general el ancho de la calzada circulatoria se mantiene constante a lo largo de la rotonda. Los anchos típicos de la calzada circulatoria varían entre 4,8 y 6 m en las rotondas de un solo carril. Se debe tener cuidado para evitar que el ancho de calzada circulatoria sea demasiado amplio en una rotonda de un solo carril porque los conductores pueden pensar que dos vehículos puedan circular lado-a-lado. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### **D. ISLETA CENTRAL**

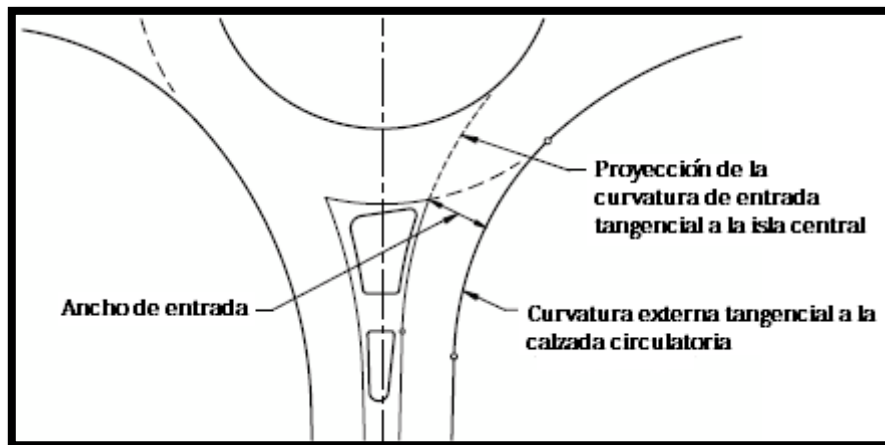
La isleta central de una rotonda es el área elevada, generalmente no traspasable rodeada por la calzada circulatoria. También puede incluir un delantal de camiones traspasable. Típicamente, la isleta se ajardina por razones estéticas y para realzar el reconocimiento del conductor al acercarse a la rotonda. Las isletas centrales elevadas de las rotondas de un solo carril son preferibles a las isletas deprimidas, las cuales son difíciles de reconocer por el conductor que se acerca, y pueden ser crear un problema de drenaje. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Las isletas centrales circulares son preferibles a las formas ovaladas o irregulares, pero a veces son necesarias las formas no circulares. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

## E. DISEÑO DE LA ENTRADA

En las rotondas urbanas de un solo carril, por lo general los radios de entrada van de 15 a 30 m. Un punto de partida común es un radio de entrada en el rango de 18 a 27 m; sin embargo, un radio más grande o más pequeña puede ser necesario para dar cabida a los vehículos grandes o servir a rotondas de diámetro pequeño, respectivamente. Pueden usarse radios más grandes, pero es importante que no sean tan grandes como para dar lugar a excesivas velocidades de entrada. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Figura 34: Diseño de entrada a rotonda de un solo carril.



Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.

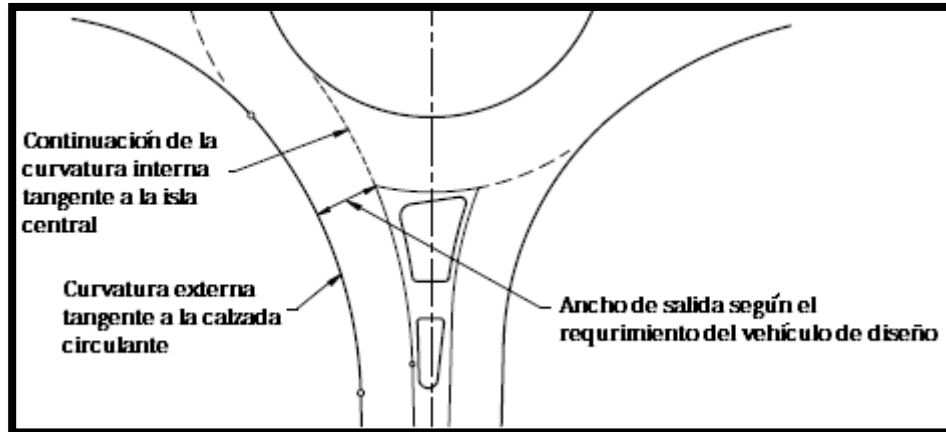
## F. DISEÑO DE LA SALIDA

Generalmente, para reducir al mínimo la probabilidad de congestión y accidentes en las salidas, los radios del cordón de salida son más grandes que los radios de cordón de entrada. Sin embargo, esto se equilibra con la necesidad de mantener una velocidad baja a través del paso peatonal al salir. El diseño de la salida también está influido por el entorno de diseño (urbano o rural), la demanda de los peatones, el vehículo de diseño, y las limitaciones físicas. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Comúnmente, el cordón de salida se diseña para curvilíneamente tangencial al borde exterior de la calzada circulatoria. Análogamente, la proyección del borde

interior (izquierda) de la calzada de salida es curvilíneamente tangencial a la isleta central. En general, los radios de cordón de salida no deben ser menores que 15 m, con valores más comunes entre 30 y 60 m.

Figura 35: Diseño de salida de una rotonda de un solo carril.



Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.

#### 2.2.7.7.7 ROTONDAS MULTICARRILES

El diseño de rotondas multicarriles tiende a ser menos tolerante que el diseño de la rotonda de un solo carril. El diseño multicarril puede impactar directamente en la trayectoria del vehículo y en la elección de carril, lo cual puede afectar el nivel de seguridad y la capacidad. Capacidad, seguridad, impactos en las propiedades y los costos están interrelacionados, y equilibrar estos componentes se hace más difícil con el diseño de las rotondas multicarriles. Debido a este equilibrio de los elementos de diseño que se requiere para cumplir con los principios de diseño, se desalienta el uso o creación de diseños estándares repetitivos. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### A. NÚMEROS Y DISPOSICIONES DE CARRILES

Las rotondas multicarriles tienen por lo menos una aproximación con por lo menos dos carriles en las entradas y salidas. El número de carriles puede variar de una aproximación a otra, siempre y cuando estén debidamente asignados por señales y marcas. Del mismo modo, el número de carriles en la calzada circulatoria puede variar dependiendo del número de carriles de entrada y salida. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### B. ANCHO DE ENTRADA



El ancho necesario de entrada para cualquier diseño dado depende del número de carriles y vehículo de diseño. Un ancho de entrada típico para entradas de dos carriles varía entre 7.3 a 9.1 m para entradas de dos carriles, y entre 11 y 13.7 para entrada de tres carriles. Los anchos típicos de carriles individuales en la entrada varían entre 3,7 y 4,6 m. Primeramente, el ancho de entrada debe **determinarse sobre la base del número de carriles identificado en el análisis operacional combinado con los requerimientos de giro del vehículo de diseño**. El ancho de entrada excesivo puede no producir beneficios de capacidad si el ancho de entrada no puede ser plenamente utilizado por el tránsito. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### **C. ANCHOS DE LA CALZADA CIRCULATORIA**

En las rotondas multicarriles, el ancho calzada circulatoria puede ser variable en función del número de carriles y los requerimientos para girar del vehículo de diseño. No es necesario una anchura constante a lo largo de toda la calzada circulatoria, y es deseable proporcionar sólo el ancho mínimo necesario para servir a las configuraciones de carriles requeridos en parte específica de la rotonda. Una combinación común es de dos carriles de entrada y salida a lo largo del camino principal, pero sólo entrada y salida de un carril en la calle secundaria. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Típicamente, los anchos de carril de la calzada circulatoria multicarril varían entre 4.3 y 4.9 m. Estos valores resultan de un ancho total de calzada circulatoria de 8.5 a 9.8 m para calzada circulatoria de dos carriles, y de 12.8 a 14.6 para ancho de calzada circulatoria de tres carriles. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### **D. GEOMETRÍA DE LA ENTRADA Y ALINEAMIENTO DE LA APROXIMACIÓN**

En las rotondas multicarriles, el diseño de la curvatura de entrada debe equilibrar objetivos contrapuestos de control de velocidad, alineamiento adecuado de las trayectorias naturales, y la necesidad de líneas de visibilidad adecuadas. A menudo, esto requiere varias iteraciones de diseño para determinar los adecuados tamaños, ubicación, y alineamientos de aproximación. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Los radios de entrada demasiado pequeños (menos de 13,7 m) pueden ocasionar conflictos entre corrientes de tránsito adyacentes, lo que puede resultar en pobre





uso de carriles pobres y reducción de la capacidad. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### **E. ISLETAS PARTIDORAS**

Típicamente, para diseñar las rotondas multicarriles primero se establece la geometría de la entrada, tal que permita controlar adecuadamente la velocidad de entrada de la trayectoria más rápida, evitar el traslape de trayectorias de entrada y dar cabida al vehículo de diseño. Luego se desarrolla la isleta partidora junto con el diseño de la salida; la isleta partidora debe proporcionar un ancho adecuado para refugiar a los peatones y ubicar señales. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### **F. CURVAS DE SALIDA**

el diseño de la curvatura de salida en las rotondas multicarriles es más complejo que en las rotondas de un solo carril. Si no se asignan adecuadamente los carriles, los conflictos pueden ocurrir entre los vehículos que salen y circulan. El inadecuado diseño horizontal de las salidas también puede resultar en traslape de las trayectorias de salida, similar al que se produce en las entradas. Comúnmente, los radios de las curvas de salida son más grandes que los de entrada, como consecuencia de otros factores (alineamiento de entrada, diámetro, etc.); los radios más grandes de las curvas de salida se suelen utilizar para promover un buen alineamiento de la trayectoria vehicular. Sin embargo, el diseño debe equilibrarse para mantener velocidades bajas en los cruces peatonales de la salida. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### **2.2.7.7.8 DISTANCIA VISUAL**

Los dos aspectos más relevantes de la distancia visual de las rotondas son la distancia visual de detención y la distancia visual de intersección. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### **A. DISTANCIA VISUAL DE DETENCIÓN**

La distancia visual de detención es la distancia a lo largo de un camino necesaria para un conductor perciba y reaccione ante un objeto en el camino y se detenga completamente antes de llegar al objeto. Debe proporcionarse en todos los puntos de



una rotonda, y en cada aproximación de entrada y salida. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

$$d = (1.468) (t) (V) + 1.087 V^2/a$$

Donde:

d = distancia de frenado a la vista, pies;

t = tiempo de percepción y reacción al frenado, supuesto de 2,5 s; V = velocidad inicial, mph, y

a = desaceleración del conductor, supuesta 11,2 pies/s<sup>2</sup>. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Tabla 12: Valores para la distancia visual de detención.

Velocidad (km/h)	Computarizada Distancia * (m)
10	8.1
20	18.5
30	31.2
40	46.2
50	63.4
60	83
70	104.9
80	129
90	155.5
100	184.2

Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.

También debe chequearse la distancia visual hacia delante en la entrada; sin embargo, esto normalmente se satisface al proporcionar suficiente distancia visual de detención en la calzada circulatoria. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Por lo menos en tres lugares críticos debe revisarse la distancia visual de detención. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

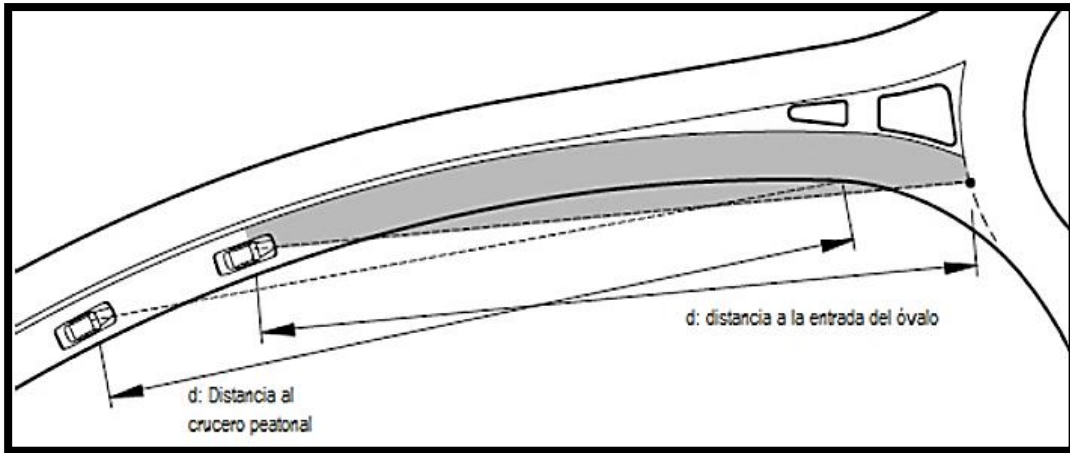


Figura 36: Distancia visual de detención en la aproximación.

Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.

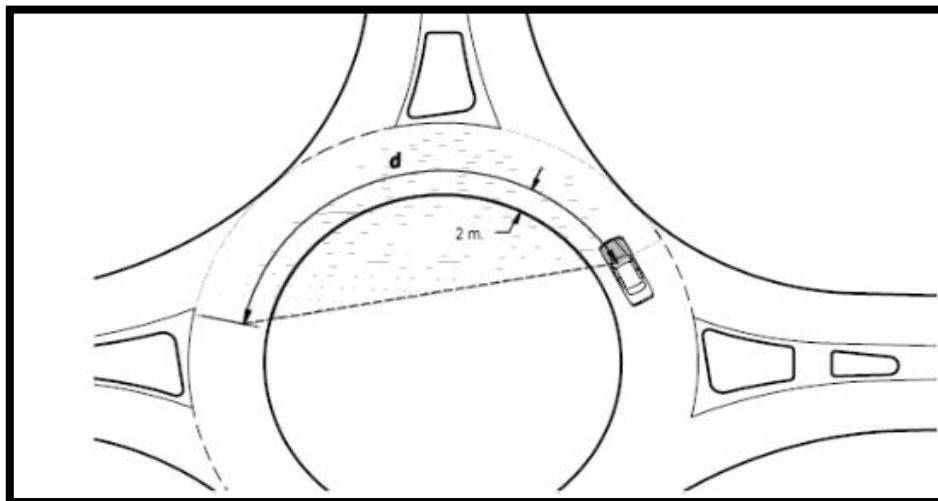


Figura 37: Distancia visual de detención en la calzada circulatoria.

Fuente: National Cooperative Highway Research Program, 2010.

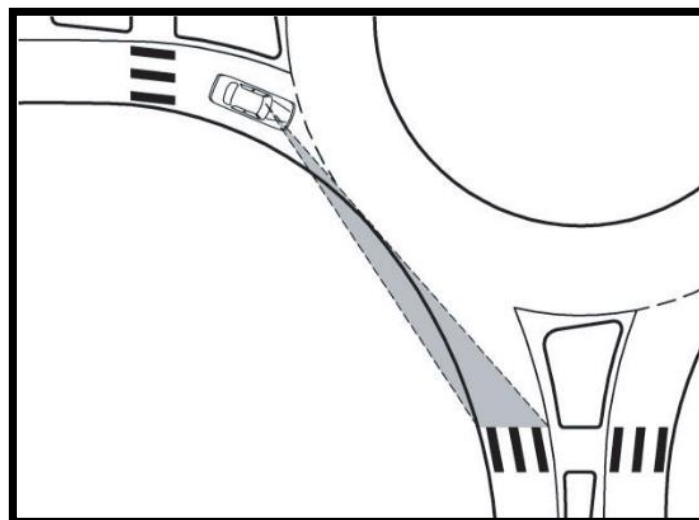


Figura 38: Distancia visual de paso peatonal en la salida.

Fuente: National Cooperative Highway Research Program, 2010.

## B. DISTANCIA VISUAL DE INTERSECCIÓN

La distancia visual de intersección es la distancia requerida para un conductor sin derecho de paso para percibir y reaccionar ante la presencia de vehículos en conflicto. La distancia visual de intersección se obtiene mediante el establecimiento de los triángulos visuales que permitan a un conductor ver y reaccionar con seguridad a los vehículos potencialmente conflictivos. En las rotondas, los únicos lugares que requieren una evaluación de la distancia visual de intersección son las entradas. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

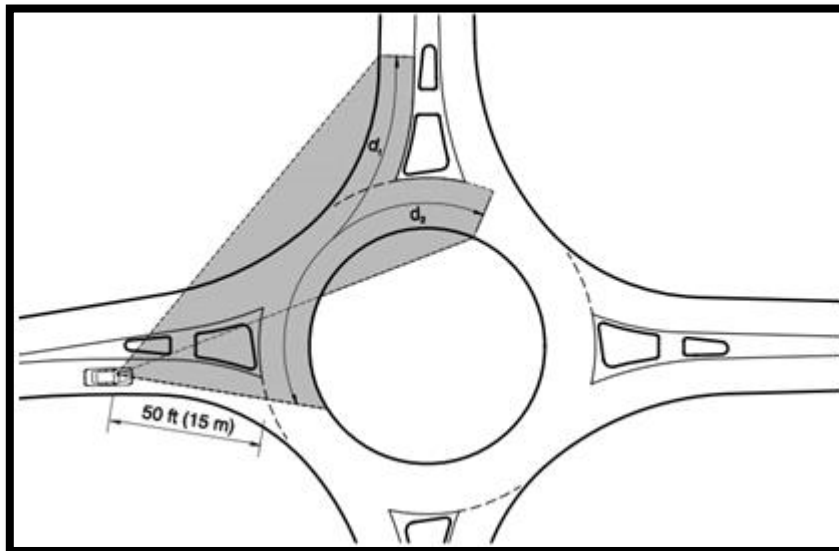


Figura 39: Distancia visual de intersección.

Fuente: National Cooperative Highway Research Program, 2010.

## REFERENCIAS.

d1: Distancia de corriente entrante

d2: Distancia de corriente circulante.

Si el ramal de aproximación del triángulo visual es mayor que 15 m, puede ser aconsejable añadir jardinería para restringir la distancia visual a los requerimientos mínimos. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

## C. ÁNGULOS DE VISIBILIDAD

El ángulo de intersección entre entradas consecutivas no debe ser demasiado agudo, para permitir a los conductores girar cómodamente sus cabezas hacia la izquierda para ver el tránsito de sentido contrario desde la entrada inmediata corriente arriba. El ángulo de intersección entre las entradas consecutivas y el ángulo de visibilidad hacia

la izquierda de todas las entradas deben responder a las mismas guías de diseño que para las intersecciones convencionales. La guía de diseño para conductores y peatones ancianos recomienda usar un ángulo mínimo de intersección de  $75^\circ$ . (Transportation Research Board, 2010)

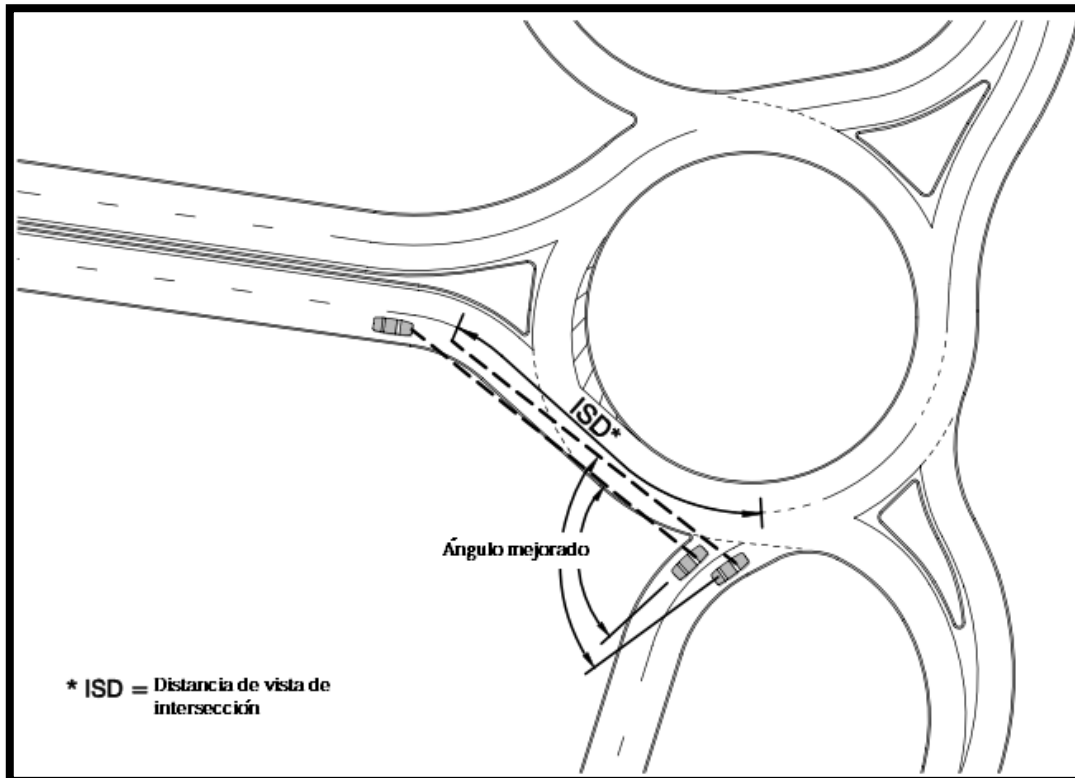


Figura 40: Rotonda con ángulo mejorado como mínimo  $75^\circ$ .

Fuente: Adaptado de National Cooperative Highway Research Program, 2010.

### 2.2.7.8 SEÑALIZACIÓN

Las señales deben ubicarse donde haya máxima visibilidad para los usuarios viales y un riesgo mínimo de ocultamiento momentáneo para los usuarios vulnerables, incluidos los peatones, motociclistas y ciclistas. Las necesidades de la señalización son diferentes para aplicaciones urbanas y rurales, y para distintas categorías de rotondas. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### 2.2.7.8.1 SEÑALES HORIZONTALES

##### A. MARCAS DE PAVIMENTO DE APROXIMACIÓN Y SALIDA

- **Líneas de eje central y de borde**

Las marcas de doble línea central amarilla, que representa la prohibición de adelantamiento en los dos sentidos, deben usarse en las calzadas indivisas que se aproximan a las isletas partidoras. Inmediatamente antes de la isleta partidora, la doble línea central amarilla debe dividirse en dos marcas amarillas dobles, creando un aproximamiento hacia la isleta partidora elevada. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

- **Líneas de carril**

Las marcas de línea blanca de carril deben usarse en las aproximaciones y en las salidas multicarriles; y se recomiendan en las aproximaciones y salidas de la rotonda para impedir cambios de carril en las inmediaciones de la rotonda. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Las líneas blancas llenas se recomiendan en las aproximaciones y salidas. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)



Figura 41: Líneas entre carriles de entrada.

Fuente: National Cooperative Highway Research Program, 2010.

- **Marcas de carril ciclista**





En las aproximaciones a las rotondas, las líneas del carril ciclista deben terminarse tan pronto como comience el aproximamiento, y por lo menos 30 m desde el borde de la calzada circulatoria. Las líneas de carril ciclista deben ser a rayas o puntos en los últimos 15 a 60 m para advertir a los ciclistas que deben convergir, darles más espacio para maniobrar y encontrar un adecuado claro en el tránsito. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Las marcas de carril ciclista deben terminarse antes de la calzada circulatoria. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

- **Flechas de uso-de-carril**

Las flechas de uso de carril son uno de los principales componentes del sistema integral de señalización y marcación de rotondas. En las aproximaciones, las flechas de uso-de-carril y señales de control-de-carril de intersección deben complementarse y dar un mensaje coherente a los viajeros. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

- **Palabras y marcas de símbolos en el pavimento**

En las rotondas pueden utilizarse: Números de ruta, destinos, nombres de calles y puntos cardinales. Las marcas viales que muestran el número de ruta de destino, nombres de calles o puntos cardinales (norte, sur, este u oeste) se pueden utilizar para ayudar al conductor a seleccionar el carril de entrada correspondiente en las aproximaciones de la rotonda. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

La Marca de símbolo o palabra Ceder el paso Adelante. El símbolo del triángulo Ceda el paso Adelante o las marcas de palabras en el pavimento CEDA EL PASO ADELANTE se utilizan a veces en las aproximaciones a una rotonda para complementar una señal Ceda el Paso Adelante. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

- **Líneas de Entrada y Ceda el paso**

Transversalmente a los carriles de entrada deben usarse extensiones a trazos o puntos de la línea de borde de la calzada circulatoria, las cuales funcionan como líneas de entrada al marcar el límite entre los vehículos que entran y los que circulan. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)



- **Marcas de cruces peatonales**

Las marcas de cruce peatonal deben instalarse en todos pasos peatonales de rotondas urbanas y suburbanas. Las marcas de cruce peatonal orientan a los peatones en su paso por una rotonda y dan claves visuales a los conductores de los lugares en donde los peatones pueden estar en la calzada. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

Los pasos peatonales deben marcarse para dar una clave visual importante a conductores y peatones, y establecer legalmente la ubicación del paso peatonal ubicado algo atrás de la intersección. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

## **B. MARCAS DE PAVIMENTO EN LA CALZADA CIRCULATORIA**

- **Líneas de eje central y de borde**

En general, las líneas amarillas de borde deben ubicarse a lo largo de las isletas partidoras, en el borde izquierdo de las calzadas de aproximación y de salida, y en el borde izquierdo de los desvíos para girar a la derecha, para aumentar el reconocimiento del conductor del cambio de calzada. Las rayas de borde pueden omitirse a lo largo de las isletas partidoras para que las isletas mismas proporcionen la delimitación del borde. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

- **Líneas de carril**

Las marcas de línea blanca de carril deben usarse en las aproximaciones y en las salidas multicarriles; y se recomiendan en las aproximaciones y salidas de la rotonda para impedir cambios de carril en las inmediaciones de la rotonda. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

- **Marcas de cruces peatonales**

Las marcas de cruce peatonal deben instalarse en todos pasos peatonales de rotondas urbanas y suburbanas. Las marcas de cruce peatonal orientan a los peatones en su paso por una rotonda y dan claves visuales a los conductores de los lugares en donde los peatones pueden estar en la calzada. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)



Los pasos peatonales deben marcarse para dar una clave visual importante a conductores y peatones, y establecer legalmente la ubicación del paso peatonal ubicado algo atrás de la intersección. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

#### 2.2.7.8.2 SEÑALES VERTICALES

##### A. SEÑALES REGULATORIAS

- **Señal Ceda el paso**

La señal Ceda el paso (R1-2) se requiere en el lado derecho de cada entrada a la rotonda. Una segunda señal de Ceda en el lado izquierdo de la aproximación y montada en la isleta partidora provee visibilidad adicional y se la recomienda particularmente en las aproximaciones multicarriles. (Transportation Research Board, 2010)

Las señales Ceda el paso se requieren en todas las aproximaciones. (Transportation Research Board, 2010)

- **Señal de flecha direccional**

Son el método preferido de indicar la dirección (sentido) de viaje en la calzada circulatoria. Deben colocarse en la isleta central opuestas a las entradas de la rotonda para dirigir el tránsito en sentido anti horario alrededor de la isleta central. (Transportation Research Board, 2010)

- **Señal sentido único**

Las señales de un solo sentido se pueden utilizar como complemento o en lugar de la señal de flecha direccional para establecer la dirección y sentido del flujo. (Transportation Research Board, 2010)

- **Placa de circulación de rotonda**

La placa de Circulación de Rotonda también se puede colocar abajo se las señales Ceda en las aproximaciones de rotondas para complementar las señales Flecha Direccional de Rotonda o Una Mano. (Transportation Research Board, 2010)



- **Señal Mantenga su Derecha**

Las señales Mantenga su Derecha se usan comúnmente en la nariz de isletas partidoras no montables. En las isletas partidoras pequeñas suele usarse una señal angosta Mantenga su Derecha o un marcador de objeto como sustituto. Esto puede reducir el racimo de señales y mejorar la visibilidad de la señal de Ceda el paso y otras señales en una aproximación de rotonda. (Transportation Research Board, 2010)

- **Señales control-de-carril de intersección**

Las señales de control de intersección pueden utilizarse en las aproximaciones de las rotondas multicarriles para complementar las flechas de uso-de-carril y otras marcas del pavimento, y dar un mensaje coherente a los viajeros. En las rotondas se prefieren las señales anticipadas de control de carril, aunque puede haber ocasiones propicias para usar otras señales de control-de-carril. (Transportation Research Board, 2010)

## **B. SEÑALES PREVENTIVAS**

Una serie de señales de advertencia son apropiadas para rotondas. La cantidad de señales de precaución que un conductor necesita se relaciona con la instalación de la intersección y las velocidades vehiculares en las calzadas de aproximación. (Transportation Research Board, 2010)

- **Señal de intersección circular**

En cada aproximación antes de una rotonda debe instalarse una señal Intersección Circular, sobre todo si la rotonda no es claramente visible desde la aproximación. El propósito de esta señal es informar a los usuarios que se están acercando a una intersección con forma de rotonda. (Transportation Research Board, 2010)

- **Señal de cruce peatonal**

Las señales Cruce peatonal pueden usarse en los cruces peatonales en entradas y salidas de las rotondas, complementadas con una placa de flecha diagonal apuntando hacia abajo que muestre la ubicación del cruce. Las señales de cruces peatonales deben usarse en todos los cruces peatonales de entradas y salidas multicarriles y en los carriles de desvío para giro a la derecha. Las señales Cruce peatonal que se



instalen no deben obstruir la señal de Ceda el paso. (Transportation Research Board, 2010)

- **Señales Informativas**

Son importantes al proveer a los conductores información adecuada sobre cómo llegar a destino. Esto es especialmente cierto en rotondas, donde las trayectorias semidirectas pueden desorientar a los conductores no familiarizados. (Transportation Research Board, 2010)

- **Señales Adelantadas**

Las señales de información de destino – adelanto deben usarse en las zonas rurales y en zonas urbanas / sub urbanas donde fueren adecuadas; incluyen señales que solo usan texto y flechas, o diagramas. (Transportation Research Board, 2010)

## **2.2.8 MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN**

El modelamiento y la simulación consisten en el trabajo con el computador y, más específicamente, en el trabajo con o el desarrollo de software para, justamente, modelar y simular. Las aplicaciones de software pueden ser comprendidas sucintamente en los siguientes términos: Existe el software propietario, el software libre y el software de dominio público (sin licencia). En el caso particular de la computación científica, empresarial y de negocios, los productos de software propietario son todos aquellos que trabajan bajo licencias de código cerrado, tales como Mathematica, MatLab, EcoSim, Arena, IThink, Stella, ProModel, VISSIM y muchos más. No podemos hacer uso de estos productos sin pagar las licencias, además, por lo general, no es permitido (= legal) modificar, desensamblar, copiar o distribuir dicho software. El software libre, por su parte, permite todo aquello que el software propietario no admite, salvo algunos compromisos o restricciones contractuales (como poner al servicio del público las mejoras realizadas a un producto dado o que dichas modificaciones posean, a su vez, licencias tecnológicamente neutras). Las licencias para el software libre se pueden clasificar en licencias de código abierto permisivas y licencias de código abierto robustas e incluyen productos de software como SciLab, E-Cell Simulation Environment, Swarm, Simex, Biome, Cage, ParadisEO. (Maldonado & Gómez Cruz, 2010)



### **2.2.8.1 MÉTODO DE MODELACIÓN**

El modelo científico es un instrumento de la investigación de carácter material o teórico, creado para reproducir el objeto que se está estudiando. Constituye una reproducción simplificada de la realidad que cumple una función heurística que permite descubrir nuevas relaciones y cualidades del objeto de estudio. Un modelo científico es la configuración ideal que representa de manera simplificada una teoría. Es un instrumento de trabajo que supone una aproximación intuitiva a la realidad y que tiene por función básica la de ayudar a comprender las teorías y las leyes. La aplicación del método de la modelación está íntimamente relacionada con la necesidad de encontrar un reflejo mediatizado de la realidad objetiva. De hecho el modelo constituye un eslabón intermedio entre el sujeto (investigador) y el objeto de investigación. La modelación es justamente el método mediante el cual se crea abstracciones con vistas a explicar la realidad. (Maldonado & Gómez Cruz, 2010)

#### **2.2.8.1.1 CARACTERÍSTICAS DE UN MODELO**

- Tener una determinada correspondencia con el objeto del conocimiento.
- Ofrecer información acerca de la estructura y las relaciones que se dan en el objeto de estudio.
- Ser operativo y mucho más fácil de estudiar que el fenómeno real.
- Poder sustituir al objeto de estudio, en determinadas etapas del conocimiento.

(Maldonado & Gómez Cruz, 2010)

#### **2.2.8.1.2 TIPOS DE MODELOS**

##### **El modelo icónico**

Es una reproducción a escala del objeto real, donde se muestra la misma figura, proporciones y características que tiene el objeto real. (Maldonado & Gómez Cruz, 2010)





### **El modelo analógico**

Consiste en un esquema, diagrama o representación donde se refleja la estructura de relaciones y determinadas propiedades fundamentales de la realidad. (Maldonado & Gómez Cruz, 2010)

### **El modelo teórico**

Utiliza símbolos para designar las propiedades del sistema que se desea estudiar. Tiene la capacidad de representar las características y relaciones fundamentales del objeto, proporcionar explicaciones y servir como guía para generar hipótesis teóricas. (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

Aunque el modelo muestra aspectos importantes para la teoría y ayuda a su comprensión, hay que tener presente que es una visión simplificada y por tanto incompleta de la realidad, la cual puede presentarse compleja y de difícil comprensión. (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

#### **2.2.8.2 SOFTWARE DE MÉTODOS DETERMINÍSTICOS**

Están disponibles varios software de métodos deterministas fundados en la investigación y la práctica internacionales. Estos métodos modelan el flujo de vehículos y la tasa de flujo; son sensibles a diversos flujos y características geométricas de la rotonda, incluyendo números de carril y los acuerdos y/o dimensiones geométricas específicas. Algún software incluye más de un modelo y utilizan extensiones más allá de la investigación original fundamental. Desde 1990, el software de métodos deterministas más comúnmente empleados en los EUA se basaron en la investigación y práctica australiana y británica; los métodos desarrollados en Francia y Alemania tuvieron un uso limitado. Por ejemplo, la investigación británica sugiere una relación mucho más fuerte entre la capacidad y gradaciones finas de la geometría que la investigación en otros países, incluyendo los EUA la investigación indica que el ancho de aproximación, el ancho de entrada, y la longitud efectiva de aproximación tienen los efectos más significantes en la capacidad. Además, el estudio británico encontró que el ángulo de entrada y el radio de entrada tienen un importante efecto combinado y que el diámetro tiene un efecto pequeño, sólo se vuelve significativo con un alto volumen de circulación. Por el contrario, la investigación australiana encontró efectos más significantes relacionados con el flujo



de tránsito, incluyendo evaluaciones carril-carril y sensibilidad a los patrones de origen-destino. (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

A pesar de que la investigación en los EUA no confirmó estos resultados en rotondas americanas, los principios expresados en estas herramientas son útiles para guiar a un diseñador en la toma de decisiones sobre sus eventuales repercusiones en el funcionamiento operacional debido a cambios en los flujos de tránsito o a modificaciones geométricas. (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

Como con cualquier procedimiento de análisis, se debe tener cuidado para garantizar que el procedimiento esté siendo aplicado correctamente. Temas comunes a comprobar para incluir: (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

**Calibración de comportamiento de los conductores locales.** Para los modelos con base analítica, incluir el uso de valores medidos localmente para los parámetros de aceptación de claros o la aplicación de factores globales que dan forma al modelo de capacidad. Para modelos basados en la regresión, incluir el ajuste de la interceptación para que coincida con los valores de tiempos de seguimiento medidos en campo. (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

**La calibración de la geometría efectiva.** Para los modelos basados en la regresión que emplean variables continuas para las dimensiones clave, considerar ajustes de la geometría efectiva. Particularmente para las entradas de un solo carril que tienen grandes anchos entre cordones para dar cabida a los vehículos grandes. Los modelos basados en la regresión no reconocen que una entrada grande de un solo carril tiene solamente un carril y por lo tanto puede ser modelada como una entrada de dos carriles. (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

**Asignación y uso de carril.** Algunos modelos son sensibles al uso de carriles y a la asignación, mientras que otros no lo son. Deben realizarse ajustes para tener en cuenta configuraciones de carril o efectos en el sistema (por ejemplo, destinos corriente abajo) que podrían causar que el tránsito prefiera un carril sobre otro, lo cual influye en la capacidad y medidas de funcionamiento. (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)



### **2.2.8.3 MÉTODOS DE SIMULACIÓN**

Están disponibles una variedad de paquetes de software de simulación para modelar redes de transporte. Varios de estos son capaces de modelar rotondas, y características que cambian con frecuencia. Estos modelos muestran los vehículos individuales y por lo tanto son sensibles a los factores a ese nivel: el comportamiento de auto-siguiente, comportamiento de cambio de carril, y toma de decisiones en los cruces (p.ej., la aceptación de claros). Desde 1990, los métodos de simulación más comúnmente empleados en los EUA se basan en la investigación y práctica en los EUA, RU y Alemania. (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

Al igual que con los métodos de software determinísticos descritos anteriormente, se debe tener cuidado para asegurar que el modelo de simulación esté aplicado correctamente. Los elementos para comprobar incluyen: (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

- Calibración de comportamiento de los conductores locales.** La calibración de modelos estocásticos es más difícil que la de los modelos deterministas porque algunos factores de calibración, tales como los relacionados con la agresividad del conductor, a menudo se aplican de manera global a todos los elementos de la red y no sólo a las rotondas. En otros casos, la codificación específica del modelo se ajusta para reflejar el comportamiento del conductor local, incluyendo puntos de anticipación a la aceptación de claro y lugares para cambios de carril discrecional y obligatorio. (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

- Chequeo del patrón de volumen.** Para los modelos de red con asignación dinámica de tránsito, el volumen de tránsito en un enlace determinado puede no coincidir con lo que se midió o proyectó. (National Cooperative Highway Research Program, 2010)

### **2.2.8.4 ESQUEMA DE MODELADO COMPUTACIONAL DE SISTEMAS COMPLEJOS**

Proceso de Modelado con Abstracción Intermedia (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

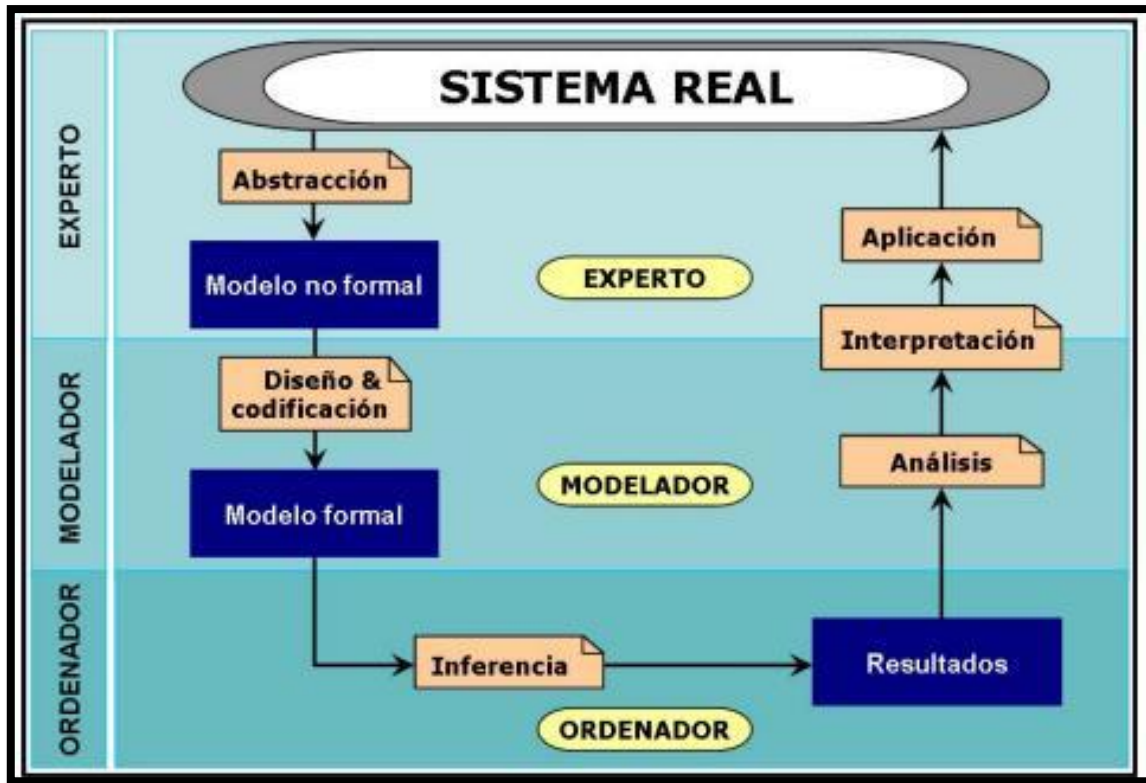


Figura 42: Esquema de modelo computacional de sistemas complejos.

Fuente: Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008.

### El experto

Es una persona con un gran conocimiento del sistema real que se pretende modelizar y de su funcionamiento. Sin embargo, el experto no está necesariamente familiarizado con la creación y el uso de modelos formales. El modelador, por el contrario, es un profesional cuya labor principal consiste en diseñar, implementar y analizar modelos formales. El modelador tiene, por tanto, conocimientos avanzados de algún formalismo que permita crear y estudiar modelos formales (p. ej. cálculo simbólico, lógica proposicional, o un lenguaje de programación). Finalmente, el ordenador es el encargado de ejecutar o resolver el modelo formal, i.e. el ordenador deduce las implicaciones lógicas que se derivan de las premisas que definen el modelo y de las condiciones iniciales. Tradicionalmente, esta labor deductiva venía siendo realizada por matemáticos, quienes a menudo eran capaces de resolver el modelo formal para casos muy generales. En el caso de modelos de sistemas complejos cuya resolución matemática general es en muchas ocasiones inviable es un ordenador el que normalmente asume este rol. Una vez presentados los tres roles, pasamos a explicar brevemente cada una de las etapas del proceso de modelado. (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

**Abstracción.**

La primera etapa es el proceso de abstracción, el cual nos conduce a un primer modelo que recoge los aspectos más relevantes del sistema real. Esta primera actividad es realizada por el experto, comienza con la observación del sistema real (que a menudo incluye una extracción de datos), y finaliza con la primera conceptualización del sistema objetivo. El trabajo del experto consiste en definir los objetivos concretos que se pretenden alcanzar con el proceso de modelado, identificar los componentes más importantes del sistema y las interacciones que pueda existir entre ellos, y describir las relaciones causales más significativas. (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

El resultado de la labor del experto es un modelo normalmente no formal, frecuentemente expresado en lenguaje natural, y que a menudo incluye diagramas conceptuales sencillos (p. ej. diagramas de bloques) (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

Es posible que esta primera abstracción no sea completa, y se use términos ambiguos como «aprendizaje» o «imitación» sin especificar de manera precisa cómo se producen exactamente. Además, puesto que a menudo este primer modelo está expresado en lenguaje natural, es posible que ni siquiera tenga coherencia lógica interna. Lo que sí que debe recoger de manera clara e inequívoca esta primera abstracción es el conjunto de componentes, interacciones y variables críticas del sistema (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

**Diseño & Codificación.**

La segunda etapa consiste en diseñar e implementar un modelo formal a partir de la abstracción llevada a cabo por el experto. Esta tarea corre a cargo de la persona que asume el rol del modelador (que potencialmente es la misma que asumió el rol de experto), y supone dos retos fundamentales que explicamos a continuación. El primer reto aparece cuando el modelo creado por el experto no está completamente especificado, algo que ocurre con sorprendente frecuencia. Imagine, por ejemplo, que el experto explica que una población evoluciona de forma que los individuos con más recursos tienden a reproducirse más que aquellos con menos recursos. Obviamente, existe una infinidad de algoritmos diferentes que implementan esta idea: la relación entre recursos y número de descendientes puede ser lineal, cuadrática, exponencial,



etc. Todas estas relaciones satisfacen la premisa del experto y por lo tanto son en principio igualmente válidas, pero asumir una u otra conducirá en general a diferentes resultados al ejecutar el modelo formal. En otras palabras, a menudo existen multitud de modelos formales diferentes que se ajustan perfectamente a las especificaciones del experto. El segundo reto surge cuando el modelo proporcionado por el experto carece de coherencia interna, algo que puede ocurrir perfectamente puesto que es frecuente que la abstracción del experto esté expresada en lenguaje natural. Descubrir incoherencias lógicas en modelos no formales no es una tarea trivial. Particularmente en el dominio de las simulaciones sociales computacionales. En cualquier caso, estos dos retos para el modelador ponen de manifiesto el enorme valor que tiene formalizar modelos. (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

### **Inferencia.**

Una vez construido el modelo formal, el siguiente paso es ejecutarlo o resolverlo. Si el modelo formal es matemáticamente resoluble, a menudo es una persona la que asume este rol de deducir las implicaciones lógicas que suponen los axiomas y las reglas que definen el modelo. Si, por el contrario, el modelo es suficientemente complejo, puede ser aconsejable explorar las implicaciones lógicas mediante el uso de la simulación computacional. Conviene enfatizar que, en cualquier caso, este proceso inferencial consiste «simplemente» en aplicar procesos deductivos con el objetivo de averiguar el conjunto de proposiciones que se derivan con necesidad lógica de los axiomas y las reglas que definen el modelo. Estas implicaciones o resultados deberían ser idénticos independientemente del formalismo usado para implementar el modelo formal; si no lo fueran, habríamos probado que los dos (o más) programas usados no están en realidad implementado el mismo modelo formal (i.e. la misma relación entrada-salida). (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

### **Análisis.**

Una vez ejecutada la simulación, obtenemos unos resultados que deberemos analizar para mejorar nuestro entendimiento de cómo funciona el modelo formal que hemos creado. En general, el análisis de la dinámica de modelos de sistemas complejos no es trivial. A menudo es conveniente usar varios formalismos diferentes para estudiar





el mismo modelo formal y sus resultados desde diferentes ángulos. (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

### **Interpretación.**

Después de analizar los resultados obtenidos con el modelo, el modelador y/o el experto los interpretarán usando ya conceptos referentes al sistema real. Nótese que, desde el punto de vista del ordenador, los resultados obtenidos con el modelo formal carecen de significado intrínseco: son simplemente cadenas de bits deducidas a partir de otras cadenas de bits. La interpretación consiste en asignar significado a los resultados obtenidos con el modelo formal, previamente analizados. (Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008)

### **Aplicación.**

Finalmente, el objetivo de todo este ejercicio de modelado no es otro que aplicar sobre el sistema real el conocimiento que hemos adquirido sobre nuestra abstracción. Como se mencionó en la sección anterior, el término aplicación no debe entenderse necesariamente en su sentido práctico más estricto. La aplicación del conocimiento adquirido puede ser tan concreta como una predicción numérica o tan vaga como una indicación de algún posible comportamiento en términos cualitativos.

(Izquierdo, Galán Ordax, Santos , & Del Olmo Martínez, 2008).

#### **2.2.8.5 MODELOS HÍBRIDOS DE SIMULACIÓN**

Una nueva generación de simuladores, los llamados híbridos. Dentro de esta clasificación, podríamos hablar de las últimas versiones de TRANSMODELER y de AIMSUN, que serían: (Mariló, 2012)

- ✓ TransModeler 2.6 + TransCAD 5.0
- ✓ AIMSUN 6.1.2

Se trata de unos paquetes de simulación en los que se combina, en una sola herramienta, características de micro-, meso- y macrosimulación; y que permiten una fácil comunicación entre las simulaciones, pudiendo simular primeramente la red a nivel macro o mesoscópico para, después, centrarnos en algunos tramos donde describirla a nivel microscópico. (Mariló, 2012)



### 2.2.8.5.1 MODELOS DE SIMULACIÓN MACROSCÓPICA

También conocido con el nombre de modelación de flujo continuo. Nacen con la finalidad de resolver la necesidad de modelizar la interacción entre dos aspectos básicos: la red de tráfico (infraestructura y sistemas de señalización y control) y la demanda de viajeros y su comportamiento. Estos dos factores interaccionan en la medida que los viajeros reaccionan a los límites de velocidad, a las condiciones de la vía y tomando distintas decisiones, de manera que la infraestructura se ha de adaptar a ellos. (Mariló, 2012)

Emplearíamos macrosimulación cuando se analiza un fenómeno con grandes cantidades de elementos cuyas dimensiones y factores descriptivos son notablemente menores al área del fenómeno descrito, siendo más relevante el comportamiento de todo el sistema y la tendencia global, antes que la descripción minuciosa de cada uno de los elementos componentes. (Mariló, 2012)

Estos modelos son más adecuados para el diseño de estrategias de control, puesto que describen de forma analítica los flujos de tráfico y requieren menos tiempo de ejecución. (Mariló, 2012)

En estos modelos, la elección de ruta tomada por los viajeros se modeliza bajo unas condiciones de la infraestructura. De esta forma, se consigue que todas las rutas realmente utilizadas entre el origen y destino tengan el mismo tiempo de viaje (coste) y que este tiempo de viaje no sea más largo que cualquier otra ruta entre esa pareja O/D. (Mariló, 2012)

Finalmente, decir que la aplicación de esta simulación será válida cuando los resultados no sean sensibles a los detalles microscópicos, cuando el área de estudio sea muy amplia para un simulador microscópico y cuando el tiempo y recursos sean limitados. (Mariló, 2012)

Los software que encontraremos en el mercado son: (Mariló, 2012)

- ✓ AUTOS
- ✓ DYNEV
- ✓ EMME/2
- ✓ FREFLO
- ✓ KRONOS
- ✓ METACOR



- ✓ METANET
- ✓ NETVAC
- ✓ OmniTRANS
- ✓ OREMSTransCAD
- ✓ TRANSYT-7F
- ✓ VISUM

#### 2.2.8.5.2 *MODELOS DE SIMULACIÓN MESOSCÓPICA*

En este caso las características comunes que podríamos destacar son: (Mariló, 2012)

Se trata de modelos que emplearemos cuando queramos analizar un fenómeno considerando un nivel intermedio entre las escalas micro y macroscópica. En este caso, la simulación no se centra en una situación o en un sistema definido, sino que hace hincapié en el análisis de un grupo de elementos bien determinados con el objetivo de conocer sus reacciones y darles un seguimiento completo desde que entran y hasta que salen del sistema o red. La representación mesoscópica combina elementos de micro y de macrosimulación, es decir, rellenan el hueco entre la aproximación que ofrecen los modelos macroscópicos y las interacciones individuales de los microscópicos. (Mariló, 2012)

Normalmente describen las entidades a alto nivel de detalle, pero su comportamiento e interacciones utilizan un algoritmo simplificado respecto a los microsimuladores. (Mariló, 2012)

Su forma de trabajar es agrupando bloques de vehículos o combinaciones de éstos, tratando a este grupo como un único paquete o entidad que está guiada a lo largo de la red y que se rige por medio de una función de velocidad-densidad, para poder conseguir que la complejidad de cálculo disminuya y poder así ampliar la zona de estudio. Por tanto, tanto el cambio de carril como la aceleración y desaceleración no están modelizados. (Mariló, 2012)

Se puede decir que la aplicación básica de estos tipos de modelos será allí donde se desearía utilizar simulación microscópica, pero resulta inviable por el amplio alcance de la red viaria o bien cuando los recursos disponibles son limitados. (Mariló, 2012)

- ✓ DYNAMIT DYNASMART
- ✓ INTEGRATION



- ✓ METROPOLIS
- ✓ TRANSIMS
- ✓ TransModeler (Mariló, 2012)

#### 2.2.8.5.3 *MODELOS DE SIMULACIÓN MICROSCÓPICA*

A grandes rasgos, los modelos microscópicos modelan el tráfico a nivel de cada vehículo, su interacción con el resto de los vehículos (basándose en las maniobras de los vehículos dentro del flujo de tráfico), y su interacción con la infraestructura (por tanto, recogen toda la geometría viaria, esquemas de regulación, existencia de vehículos pesados, etc). El nivel de detalle llega al comportamiento básico de un vehículo y, por tanto, de su conductor. Se emplea cuando las dimensiones de los elementos y los factores que envuelven al sistema son todos notables a un alto nivel de precisión. En este tipo de sistemas convencionales interesa conocer todos los más mínimos detalles de una cantidad normalmente reducida de elementos y factores que rodean al fenómeno simulado. Estos simuladores son capaces de alcanzar soluciones eficientes y en detalle. (Mariló, 2012)

Normalmente, esta simulación se rige por una serie de normas de comportamiento que determinan como un vehículo acelera y decelera (modelo basado en la teoría de seguimiento de un vehículo) y cómo cambia de carril (modelo de cambio de carril); incluso describir cómo y cuándo cambia su ruta. (Mariló, 2012)

Además, el control del tráfico sobre el que los vehículos reaccionan, se describe en detalle: señales, manera de operar y la localización y operación de los detectores.

El input se consigue indicando tanto los flujos de vehículos que entran en la red como los porcentajes de giros en las intersecciones, o bien determinando la matriz O/D, que variará con el tiempo (normalmente). (Mariló, 2012)

Por tanto, estos simuladores requieren un estudio exhaustivo de la red viaria a estudiar, conlleva un elevado coste computacional, así que esto hace que este tipo de software sólo sea aplicable a las redes relativamente pequeñas. (Mariló, 2012)

Podemos citar algunos software de simulación que encontraremos en el mercado: (Mariló, 2012)

- ✓ AIMSUN II



- ✓ CORSIM1
- ✓ DRACULA
- ✓ DYNASIM
- ✓ FLEXYT – II
- ✓ FRESIM1 HUTSIM (nanosimulación)
- ✓ INTEGRATION 2.0
- ✓ INTELSIM
- ✓ INTRAS
- ✓ LISA+
- ✓ MATSim
- ✓ MICROSIM
- ✓ MITSIMLab
- ✓ NETSIM1
- ✓ PARAMICS
- ✓ RONETS
- ✓ SATURN
- ✓ SIDRA
- ✓ INTERSECTION
- ✓ SimTraffic
- ✓ THOREAU
- ✓ TRANSYT
- ✓ TSIS1
- ✓ UAF
- ✓ VISSIM (Mariló, 2012)

#### **2.2.8.6 VISSIM**

VISSIM es una herramienta de software para la simulación microscópica y multimodal de tráfico desarrollada durante los años 70' por la empresa PTV-Planung Transport Verkehr, en Kalsruhe, Alemania. Comenzó a distribuirse comercialmente a partir de 1993, por PTV AG que, junto con Innovative Transportation Concepts, Inc. en Norte América, continua desarrollando, distribuyendo y manteniendo este software. (Mariló, 2012)



Se trata de un elemento de simulación microscópica por el hecho de que a los elementos mínimos que lo componen se les asignan modelos de comportamiento individual y multimodal; porque permite modelar los distintos tipos de transporte y las interacciones entre ambos, siendo estos: vehículos (coches, camiones, autobuses, motocicletas, etc), peatones, transporte público y bicicletas. (Mariló, 2012)

Su ámbito de aplicación es bastante amplio: estudios de movilidad y planificación del transporte, sistemas inteligentes de tráfico y sistemas de gestión y control de tráfico. (PTV VISSIM, 2018)

Internamente está constituido por dos subprogramas, el primero de ellos recoge el modelo de flujo de tráfico y es en el que se definen todas las características de la red que se pretende analizar, y el segundo subprograma es el que manda las órdenes para que los vehículos, peatones, etc. se comporten de una manera u otra en función del valor que toman en el modelo de flujo de tráfico las variables. (PTV VISSIM, 2018)

El primer subprograma es en el que se definen las características de los distintos elementos que componen la red. Pudiendo caracterizar entre ellos los siguientes parámetros: (PTV VISSIM, 2018)

#### *2.2.8.6.1 UMBRALES DEL MODELO*

El comportamiento humano tiene una distribución natural: En diferentes conductores se encuentra diferencias en la habilidad a la percepción y estimación, en las distancias de seguridad, en los deseos de velocidad, y en la aceptación de las máximas aceleraciones o deceleraciones; las cuales son características de la agresividad en la conducción. Algunos de estos parámetros también dependen de la capacidad de los vehículos como lo son: la máxima velocidad y máxima aceleración y deceleración. Esto es un fenómeno natural que puede ser representado por distribuciones normales aunque no se tiene un conocimiento exacto acerca de estas distribuciones, por lo tanto diferentes parámetros se usarán al azar dentro del modelo para calcular los valores del umbral y las funciones de conducción. (PTV VISSIM, 2018)





La percepción y reacción están representadas por un conjunto de umbrales y distancias deseadas. Estos umbrales representan diferentes áreas que están asociadas a diferentes situaciones de la interacción entre un vehículo y el vehículo que está frente a él. Estas áreas son: (PTV VISSIM, 2018)

- 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. (PTV VISSIM, 2018)

Por lo tanto, el proceso de conducción de acuerdo a las condiciones dadas se asocia a las diferentes áreas, las cuales son representadas en la siguiente ilustración (PTV VISSIM, 2018)

#### *2.2.8.6.2 APLICACIONES DEL VISSIM*

A continuación enunciaremos algunas de las aplicaciones del VISSIM. (PTV VISSIM, 2018)

- Puede ser utilizado para simular las intersecciones controladas con señales de seda el paso, pare, intersecciones semaforizadas con controlador de tiempos fijos o con semáforos actuando con programa VAP que dan un orden lógico a la intersección.
- Es utilizar para evaluar y controlar la viabilidad y el impacto de integrar sistemas de transporte masivo en redes urbanas como es el caso nuestro y solucionar problemas viales.
- El VISSIM permite comparar de manera fácil y rápida posibles alternativas de solución para el mejoramiento de una intersección o un tramo de una vía específica.
- Permite evaluar el transporte público optimizando tiempos de viajes y demoras.
- Análisis de capacidad y pruebas de los sistemas de prioridad de tránsito.
- Análisis de los sistemas de gerencia de transito tales como control alternativo de rutas, control de circulación, rutas de peaje, control de acceso y carriles especiales.



- Análisis de la vulnerabilidad de redes grandes con la opción alternativa de rutas usando la asignación dinámica.
- Simulación de áreas de tráfico calmado incluyendo a todos los usuarios relevantes del camino.
- Simulación y visualización del pasajero que fluye en un centro multimodal de tránsito o modelo en 3D. (PTV VISSIM, 2018)

### 2.2.8.6.3 ELEMENTOS DE ENTRADA DEL MODELO

#### A. Funciones De Aceleración Y Deceleración

VISSIM utiliza distribuciones estocásticas para las funciones de aceleración y deceleración las cuales dependen de la velocidad actual y representan los diferentes comportamientos en la conducción. (PTV VISSIM, 2018)

Para cada tipo de vehículo se asigna dos funciones de aceleración y otras dos para la deceleración; y se representan mediante gráficas. Cada gráfica consiste de tres diferentes curvas que muestran los valores mínimos, medios y máximos de las funciones. (PTV VISSIM, 2018)

**Aceleración Técnica:** Es la aceleración factible técnica para los vehículos. Es considerada sólo si una aceleración excede la aceleración deseada para mantener la velocidad en pendientes. (Esta es la aceleración que garantizan las industrias de vehículos). (PTV VISSIM, 2018)

**Aceleración deseada:** La que el conductor desea. Esta es usada para cualquier otra situación. (Medida de campo). (PTV VISSIM, 2018)

**Deceleración Técnica:** Es la deceleración factible técnicamente para por los vehículos. Ésta es ajustada a pendientes por cada  $1 \text{ m/s}^2$  para pendientes positivas y para pendientes negativas en  $-1 \text{ m/s}^2$ . (Esta es la deceleración que garantizan las industrias de vehículos). (PTV VISSIM, 2018)

**Deceleración deseada:** La que el conductor desea. Si esta es menor que la máxima deceleración técnica, entonces la deceleración deseada es usada como la máxima para la deceleración (Medida de campo). (PTV VISSIM, 2018)

**Distribuciones:** Algunos parámetros que se manejan en VISSIM están representados por medio de distribuciones de naturaleza estocástica, los cuales



permiten asemejarse más a las situaciones reales. Los siguientes son parámetros que corresponden a esta naturaleza: (PTV VISSIM, 2018)

**Distribución de Velocidad:** Para cualquier tipo de vehículo, la distribución de la velocidad es un parámetro de gran influencia en la capacidad de las vías. Para alimentar el programa se debe tener en cuenta la velocidad deseada para cada tipo de vehículo, la cual se define, como la velocidad a la que un conductor desea viajar a flujo libre la cual puede tener pequeñas variaciones llamadas oscilaciones. (PTV VISSIM, 2018)

**Distribución de Color:** Esta distribución es sólo necesaria para la visualización de las gráficas, y no es un parámetro que afecte los resultados de la modelación. (PTV VISSIM, 2018)

**Distribución de Modelo de Vehículos:** Esta distribución modela los diferentes tipos de vehículos que se pueden encontrar en una red de acuerdo a las características de sus dimensiones, (longitud, distancia al eje frontal, al eje trasero, etc.). Además se puede definir el porcentaje que cada tipo de vehículos conforma en su clase. (PTV VISSIM, 2018)

**Distribución de Tiempos de Demora:** Estas distribuciones son usadas en VISSIM para simular: parqueo, señales de pare, conteo en peajes, paradas de buses. Se puede ingresar mediante dos formas: (PTV VISSIM, 2018)

- Distribución Normal: Con una media y una desviación estándar.
- Distribución Empírica: Se definirá por medio de una gráfica similar a las distribuciones de velocidades donde se hallará un valor máximo y un mínimo y con puntos intermedios con los que se construirá la gráfica. (PTV VISSIM, 2018)

**Tipos de Vehículos.** Se le denomina tipo a un grupo de vehículos con características técnicas y comportamiento de conducción similar, por defecto el VISSIM presenta los siguientes tipos: autos, camiones, bus, bus articulado, trenes, bicicletas y peatones. (PTV VISSIM, 2018)

**Clases de Vehículos.** En este ítem se puede agrupar diferentes tipos de vehículos (creados previamente) que contengan ciertas características similares, para efectos de la investigación se dejarán establecidas las mismas clases que el programa trae por defecto las cuales son: Livianos, pesados, buses, trenes, peatones y bicicletas, además de crear la moto, ya que este vehículo representa un porcentaje



considerable en la composición vehicular de la ciudad de Cartagena. (PTV VISSIM, 2018)

### **B. Comportamiento De Conducción**

El comportamiento de los conductores se refleja en diferentes variables las cuales pueden ser: velocidades, distancias de seguridad, brechas, tiempos de reacción e inclusive dependen de las características físicas de los vehículos y del tipo de conductor (anciano, joven, mujer, etc.). (PTV VISSIM, 2018)

En VISSIM se modela el comportamiento del conductor en cuatro fases las cuales son: (PTV VISSIM, 2018)

- Seguimiento de Vehículo.
- Cambio de Carril.
- Movimiento lateral.
- Control por semaforización. (PTV VISSIM, 2018)

Cada una de estas fases está compuesta por diferentes parámetros los cuales afectan directamente la interacción de los vehículos y por lo tanto pueden causar diferencias substanciales en los resultados de la simulación. El VISSIM asigna un comportamiento de conducción a cada arco por medio del tipo de arco, por lo tanto existe para cada clase de vehículo diferentes parámetros de comportamiento de conducción. (PTV VISSIM, 2018)

#### **2.2.8.6.4 DATOS DE SALIDA**

Luego de la introducción de todos los datos y valores el VISSIM podrá correr el modelo y obtener los valores de control requeridos. Entre los resultados, que se pueden obtener, se encuentran las demoras, paradas, velocidades, longitudes de cola y densidad de tráfico. Sin embargo, para la presentación de los proyectos, la visualización en 2D y 3D es una herramienta que permite un mejor entendimiento de lo planteado y realizado. Por lo expuesto este software permite la recreación de los modelos en ambos formatos para generar, a su vez, video en formato AVI. Para una mejor presentación del modelo 2D se pueden importar imágenes y dibujos CAD; y para el modelo 3D se pueden importar modelos desde el programa Google Sketchup o Autodesk 3DS Max. (PTV VISSIM, 2018)



## 2.2.9 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

### 2.2.9.1 CALIBRACIÓN

La calibración es el proceso que permite modificar los parámetros del modelo, de forma que este pueda representar lo datos recogidos en campo. Los métodos más utilizados para la calibración son la regresión, optimización, determinación de errores, análisis de trayectoria, etc. (The Federal Highway Administration, 2004)

Durante la calibración se tomarán medidas de capacidad, conteo de tráfico y medidas de rendimiento del sistema como tiempos de viaje, velocidades, demoras y colas. Es importante destacar que todos estos datos deben ser recogidos en un mismo periodo de tiempo. (The Federal Highway Administration, 2004)

**Inspección en campo:** Si bien actualmente es posible tener un registro en video de lo que sucede en campo, es muy importante realizar una visita al lugar, sobre todo, durante la hora pico. “Las imágenes en video pueden ser útiles; sin embargo, estas no pueden centrarse en las condiciones aguas arriba que provocan los comportamientos observados”. (The Federal Highway Administration, 2004)

**Tiempo de viaje:** La fuente más confiable para recolectar datos de tiempos de viaje punto a punto es a través del método: “floating car runs”. Este método consiste en que uno o más vehículos sean conducidos por el espacio a estudiarse durante el periodo de análisis. Durante el recorrido, estos irán recogiendo datos de tiempo promedio, velocidad, aceleración, etc. A mayores viajes habrá un mayor porcentaje de confiabilidad, por ejemplo, en condiciones de flujo libre se pueden requerir tan solo 3 recorridos, mientras que en estados de congestión pueden necesitarse 10 o más recorridos. (The Federal Highway Administration, 2004)

Tabla 13: Tiempos de viaje en un tramo de 21 m.

Tiempo de viaje (segundos)	
VISSIM	CAMPO
3.98	3.60
3.28	3.65
3.60	3.90
3.78	3.58
3.64	3.68
3.81	3.95
3.58	3.70
3.38	3.59
3.26	3.65
4.00	3.48
3.74	3.55
4.00	3.78
3.87	3.70
3.76	3.80
3.80	3.65
	3.58
	3.85

Fuente: Adapado de Alvarez Vargas, 2017.

#### 2.2.9.1.1 NUMERO DE SEMILLA (RANDOM SEED)

Los análisis dentro de los modelos que empleen simulaciones deben de utilizar números aleatorios generados a partir de un solo valor inicial (semilla) dentro de cada análisis para minimizar los errores en la simulación. (Alvarez Vargas, 2017)

Esto en el modelo se observa con el cambio de comportamiento de los conductores (gentil, agresivo, etc.) y los tipos de vehículos participantes (motos, camiones, buses, etc.). Cada vez que se cambie este número denominado “semilla”, estos parámetros variarán generando distintos patrones de comportamiento y flujo vehicular. (Alvarez Vargas, 2017)

#### 2.2.9.1.2 NÚMERO DE CORRIDAS

El número semilla, definido anteriormente, tendrá una influencia directa a la hora de realizar el análisis de un modelo microscópico; ya que este se encarga de que cada corrida realizada sea distinta de cualquier otra que se haya efectuado. Los resultados obtenidos, normalmente, se encuentran en un rango cercano al promedio de las respuestas alcanzadas en las corridas llevadas a cabo. Los datos obtenidos de las corridas se deben validar a través de un número mínimo de corridas. Este número de corridas específico, se conseguirá con ayuda de la estadística. Por lo tanto, se debe





tomar una muestra que represente a la población (corridas) de forma adecuada, es decir esta debe ser heterogénea y sin tendencias de ninguna clase. Mientras mejor se represente a la población en la muestra de trabajo, mejores serán los resultados a la hora de extrapolarlos a la población total. (Alvarez Vargas, 2017)

Finalmente, para realizar este análisis estadístico se necesitará de las siguientes ecuaciones estadísticas:

$$S^2 = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{N - 1}$$

Donde:

- S = Desviación estándar
- X = Respuesta del parámetro de eficiencia en una corrida específica
- $\bar{X}$  = Media del parámetro en todas las corridas
- N = Número de corridas (Alvarez Vargas, 2017)

La mejor fuente de datos de tiempo de viaje punto a punto es “floating car runs.”. En este método, uno o más vehículos son conducidos a lo largo de la instalación varias veces durante el período analítico y el tiempo medio de viaje se calcula. La cantidad de corridas de vehículos requeridos para establecer un tiempo medio de viaje dentro de un nivel de confianza del 95% depende de la variabilidad de los tiempos de viaje medidos en el campo. Las condiciones de flujo libre pueden requerir tan solo tres carreras para establecer un tiempo de viaje medio confiable. Las condiciones congestionadas pueden requiere 10 o más ejecuciones. (The Federal Highway Administration, 2004)

El número mínimo de corridas necesarias para determinar el tiempo medio de viaje dentro de un intervalo de confianza deseado del 95 por ciento depende del ancho del intervalo que es aceptable para el analista. Si el analista desea calibrar el modelo a un nivel muy ajustado tolerancia, entonces un intervalo muy pequeño será deseable y un gran número de vehículos se requerirán carreras. Se obtiene el número requerido de corridas de vehículos de la ecuación siguiente: (The Federal Highway Administration, 2004)

$$N = \left( 2 * t_{0.025, N-1} \frac{S}{R} \right)^2$$

Donde:

R = Intervalo de confianza del 95 % para la media real.

$t_{0.025, N-1}$  = Estadística t de Student para error bilateral del 2.5% (total el 5 %) con N-1 grados de libertad (para cuatro corridas,  $t = 3.2$ ; para seis corridas,  $t = 2.6$ ; para 10 corridas,  $t = 2.3$ ) (The Federal Highway Administration, 2004)

S = Desviación estándar de las corridas de vehículos

N = Número de carreras de autos flotantes requeridas

El número mínimo de corridas se calcula de la siguiente forma:

$$N = \left( t_{\alpha/2} * \frac{S}{e} \right)^2$$

Donde:

N = Número mínimo de corridas

$t_{(\alpha/2)}$  = T-Student con N-1 grados de libertad

S = Desviación estándar

E = Margen de error (The Federal Highway Administration, 2004)

Para calcular el número mínimo de corridas consta de los siguientes pasos: Para comenzar, se evalúa el modelo trabajado con un número de al menos 4 corridas. Después, mediante el uso de las ecuaciones antes expresadas, se debe obtener la media, la desviación estándar y el nivel de confiabilidad. Cuando se realizan cálculos estadísticos como los mencionados, es necesario tomar en cuenta el margen de error posible en los resultados obtenidos. (The Federal Highway Administration, 2004)

### 2.2.9.1.3 TIEMPO DE ESTABILIDAD (WARM UP)

El “warm up” o tiempo de estabilidad es aquel en el cual el flujo de tráfico, en el modelo de la simulación, alcanza el equilibrio. En otras palabras, se logra la estabilidad