

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



“Obtención de parámetros de eficiencia empleando los modelos empíricos de análisis alemán y británico. El caso de la rotonda Independencia en Magdalena, Lima”

Tesis para optar el título de INGENIERO CIVIL

AUTOR

Antero Rafael Yépez Sánchez y Kevin Jhonatan Chávez Suárez

ASESOR

Félix Israel Cabrera Vega

Lima, Setiembre, 2020

RESUMEN

El sistema de transporte urbano en Lima, presenta una problemática de congestión vehicular debido a la poca planificación y presencia excesiva de vehículos en las avenidas más concurridas de la capital; sin embargo, el correcto diseño de la infraestructura vial, acorde a la realidad limeña, es un factor principal para entender dicha problemática. Las rotondas son una de las más utilizadas en intersecciones del mismo nivel, por lo que es importante orientar la presente tesis al análisis de las mismas.

Es por esto, que se realiza el estudio de la rotonda Independencia ubicada en el distrito de Magdalena del Mar con la finalidad de comprender los problemas presentes en ella. Para su estudio, se utilizan dos modelos empíricos de análisis del tráfico: Modelo alemán y Modelo británico, los cuales fueron concebidos para su país de origen por lo que se tiene presente esta acotación a lo largo de la tesis.

La revisión de la literatura, presenta definiciones, tipos y elementos de una rotonda; además, de los diferentes modelos empíricos de regresión de lineal desarrollados en países como Francia, Alemania, Inglaterra, Suiza, etc. siendo el modelo alemán y británico los que nos interesan para la investigación y los modelos teóricos basados en la teoría de brechas como el HCM y el modelo de Brilon-Wu. Asimismo, se describen los parámetros de eficiencia aplicables a una rotonda como longitudes de colas, demoras y demoras geográficas en una rotonda.

La metodología de aplicación de los modelos requiere la obtención de los parámetros geométricos de la rotonda Independencia por lo que se realiza un levantamiento topográfico con la finalidad de obtener los valores de los diferentes parámetros. Además, para el cálculo de la capacidad mediante los dos modelos antes mencionados se requieren obtener el flujo vehicular presente en la rotonda, con ayuda de los videos de las cámaras de seguridad otorgados por el municipio del distrito se pudo obtener el conteo vehicular requerido. Con la información recopilada, se realiza el cálculo de los parámetros de eficiencia y se procede a efectuar un análisis estadístico para determinar la confiabilidad de los resultados.

Finalmente, luego de la evaluación estadística se concluye que los modelos alemán y británico no son aplicables para determinar la capacidad en la rotonda Independencia; no obstante, esto no descarta la utilización de ambos modelos en otras rotondas de la capital.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de tesis se lo dedico a Dios, por su protección y bendición en cada momento de mi vida; a mis padres, por siempre confiar en mí y en mis decisiones, por ser mi soporte ante toda adversidad y por motivarme a ser cada día un mejor hijo y profesional; a mi hermana, por ayudarme a ser mejor persona a través del ejemplo que puedo brindarle y por acompañarme en cada una de mis travesías desde pequeño; gracias a mi asesor de tesis por el apoyo brindado y la sabiduría en cada una de sus respuestas; gracias a la universidad por la formación y conocimientos brindados. A todos ellos, mi agradecimiento, cariño y admiración.

Kevin Chávez Suárez

El trabajo de tesis, en primer lugar, se lo agradezco a Dios, quien guía mi camino y me permite desenvolverme a partir de las oportunidades que me brinda día a día. Además, agradezco a quienes estuvieron permanentemente conmigo durante no solo el desarrollo de este trabajo, sino a lo largo de toda mi vida, apoyándome, motivándome y siendo mi fuerza para nunca dar un paso al costado, mis padres y mi hermano. Gracias a ellos, pude forjarme como alumno en la PUCP y, posteriormente, como ingeniero. Finalmente, agradecer a la universidad por la formación integral que me ha brindado todos estos años dentro de ella y, en adición, al ingeniero Cabrera por el apoyo y asesoramiento constante desde que aceptó ser el asesor de esta tesis. A todos ellos, mi agradecimiento, cariño y admiración.

TABLA DE CONTENIDOS

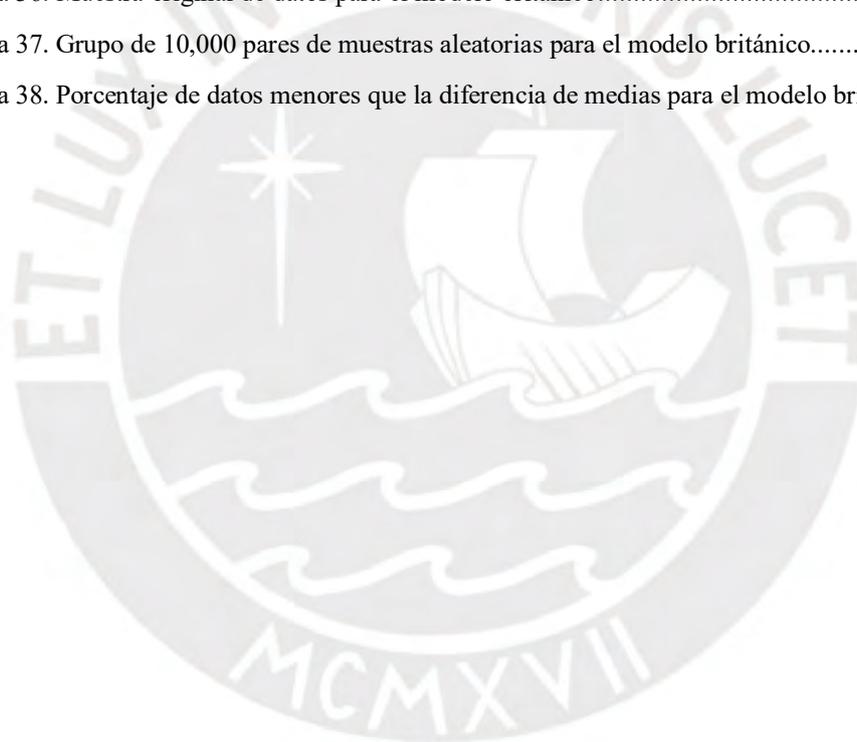
1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1 Objetivo general	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
1.2. Hipótesis	2
1.3. Justificación	2
2. CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	3
2.1. Rotondas	3
2.1.1. Definición	3
2.1.2. Tipos de rotondas	5
2.1.3. Elementos de una rotonda	7
2.2. Modelos empíricos de regresión lineal	8
2.2.1. Modelo de Philbrick	9
2.2.2. Modelo de Glen, Summer y Kimber.....	11
2.2.3. Modelo francés.....	12
2.2.4. Modelo alemán.....	13
2.2.5. Modelo británico	14
2.2.6. Modelo de Bovy (Suiza)	16
2.3. Modelos teóricos basados en la teoría de brechas	18
2.3.1. Modelo HCM 2010.....	20
2.3.2. Modelo Brilon-Wu	21
2.3.3. Modelo de Troutbeck.....	23
2.3.4. Método de SIDRA.....	24
2.3.5. Fórmula de Wardrop.....	27
2.3.6. Modelo de Harders	28

2.4. Medidas de eficiencia en rotondas.....	30
2.4.1. Longitudes de cola en rotondas	31
2.4.2. Demoras en rotondas	32
2.4.3. Demoras geométricas en rotondas	33
2.4.4. Nivel de servicio.....	35
3. CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	36
3.1 Rotonda Independencia	38
3.2 Obtención de parámetros geométricos.....	40
3.2.1. Ancho de la entrada a la rotonda (e).....	40
3.2.2. Mitad del ancho de la calzada de aproximación (v)	41
3.2.3. Longitud efectiva del ensanchamiento de la entrada (l).....	42
3.2.4. Diámetro del círculo inscrito en la rotonda (D).....	43
3.2.5. Radio de la curva de entrada (r)	44
3.2.6. Angulo de entrada (\emptyset)	45
3.3 Parámetros geométricos de la Rotonda Independencia	46
3.4 Obtención del flujo vehicular.....	47
3.5 Cálculo de la capacidad	48
3.5.1 Modelo alemán	49
3.5.2 Modelo británico	49
3.6 Cálculo de los parámetros de eficiencia.....	49
3.7 Análisis Estadístico	50
4. CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	51
4. 1. Características del tráfico de la rotonda Independencia.....	51
4. 2. Coeficiente de Determinación (R^2).....	64
4. 3. Randomization Test.....	65
4. 3. 1 Test para modelo alemán	66
4. 3. 1 Test para modelo británico	68
5. CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
5. 1. Conclusiones	70
5. 2. Recomendaciones	71
6. REFERENCIAS.....	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Elementos de una rotonda.....	7
Figura 2. Valores de α según l.....	17
Figura 3. Parámetros temporales y espaciales	18
Figura 4. Reducción por peatones.....	21
Figura 5. Capacidad vs Flujo circulante.....	22
Figura 6. Capacidad de carril entrante en función de flujo circulante.....	24
Figura 7. Numeración y sentido de la Rotonda Independencia	38
Figura 8. Medición del ancho de carril	39
Figura 9. Medición del diámetro de la pileta.....	39
Figura 10. Dibujo en AutoCAD de la Rotonda Independencia	40
Figura 11. Dibujo en AutoCAD de la obtención del parámetro e	41
Figura 12. Dibujo en AutoCAD de la obtención del parámetro v.	41
Figura 13. Ensanchamiento mediante la adición de un carril	42
Figura 14. Ensanchamiento mediante el abocinamiento de entrada.....	42
Figura 15. Dibujo en AutoCAD de la obtención del parámetro D	43
Figura 16. Dibujo en AutoCAD de la obtención del parámetro r	44
Figura 17. Obtención del parámetro \emptyset procedimientos 1 y2	45
Figura 18. Obtención del parámetro \emptyset procedimiento 3	45
Figura 19. Elementos geométricos de una rotonda	46
Figura 20. Foto del flujo vehicular en la rotonda Independencia	48
Figura 21. Colas británico - Colas medidas – Lunes 19/08/2019	57
Figura 22. Colas alemán - Colas medidas – Lunes 19/08/2019.....	57
Figura 23. Colas alemán – Colas británico – Lunes 19/08/2019.....	58

Figura 24. Colas alemán – Colas medida – Miércoles 21/08/2019.....	58
Figura 25. Colas británico – Colas medida – Miércoles 21/08/2019	59
Figura 26. Colas alemán – Colas británico – Miércoles 21/08/2019.....	59
Figura 27. Colas alemán – Colas medidas – Viernes 23/08/2019.....	60
Figura 28. Colas británico – Colas medidas – Viernes 23/08/2019	60
Figura 29. Colas alemán - Colas británico – Viernes 23/08/2019.....	61
Figura 30. Colas vs Grado de saturación para el modelo alemán	61
Figura 31. Colas vs Grado de saturación para el modelo británico.....	62
Figura 32. Grado de saturación alemán vs británico	64
Figura 33. Muestra original de datos para el modelo alemán	66
Figura 34. Grupo de 10,000 pares de muestras aleatorias para el modelo alemán.....	67
Figura 35. Porcentaje de datos menores que la diferencia de medias para el modelo alemán	67
Figura 36. Muestra original de datos para el modelo británico.....	68
Figura 37. Grupo de 10,000 pares de muestras aleatorias para el modelo británico.....	68
Figura 38. Porcentaje de datos menores que la diferencia de medias para el modelo británico.....	69



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diferencias entre rotondas y círculos de tránsito	4
Tabla 2. Características de cada tipo de rotonda.....	7
Tabla 3. Rangos de aplicación del modelo de Philbrick.....	10
Tabla 4. Rangos de aplicación del modelo de Glen, Summer y Kimber	12
Tabla 5. Parámetros empíricos del Modelo Alemán	14
Tabla 6. Rango de valores de parámetros para Modelo Británico	15
Tabla 7. Valores de parámetro γ	16
Tabla 8. Valores de parámetro β	17
Tabla 9. Valores de intervalos propuestos por HCM2010	20
Tabla 10. Modelos de capacidad propuestos por HCM2010	20
Tabla 11. Cálculos con fórmulas del modelo de Troutbeck	24
Tabla 12. Valores mínimos y máximos para α y β	26
Tabla 13. Valores mínimos y máximos para Δ_c y φ_c	26
Tabla 14. Comparación entre modelo SIDRA y modelo de simulación valor C.....	26
Tabla 15. Nivel de servicio según intervalos de demoras.....	35
Tabla 16. Rangos recomendados de diámetro de círculo inscrito	43
Tabla 17. Vehículos de diseño Green Book 2001	44
Tabla 18. Parámetros geométricos de la Rotonda Independencia.....	46
Tabla 19. Resultados del modelo alemán en rotonda Independencia	51
Tabla 20. Resultados del modelo británico en rotonda Independencia	53
Tabla 21. Resultados de colas	55
Tabla 22. Resultados de demoras y niveles de servicio	63

1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El deficiente y poco planificado sistema de transporte urbano en Lima, acompañado de la excesiva presencia de vehículos en las avenidas más concurridas de la capital y la poca cultura de tránsito que se ha impartido en el país, generan problemas de congestión vehicular y demoras en los tiempos de traslado de los ciudadanos; pero, no solo se debe explicar la problemática bajo esta percepción, sino buscar puntos de mejora de la situación. La infraestructura vial es un factor clave para mejorar dicha problemática, esta debe estar correctamente diseñada y acorde a la realidad del tránsito limeño. Existen diferentes formas de distribución del tránsito vehicular en la convergencia de una o más avenidas, calles, jirones, etc. Siendo las rotondas una de las más utilizadas en intersecciones del mismo nivel, de acuerdo con Guillén Borragán (2006) las rotondas han sido uno de los éxitos más destacados en la ingeniería de tráfico de intersecciones en los últimos años.

La rotonda Independencia es una de las más concurridas en el distrito de Magdalena del Mar por lo que no está exenta a la congestión vehicular y es muy importante para el análisis del tráfico en esta parte de la ciudad. Para contribuir en su mejora, se deben llevar a cabo diferentes estudios del tráfico con la finalidad de comprender los problemas presentes. A partir de ello, se presentan dos opciones: la primera son los modelos analíticos, los cuales fueron concebidos a mediados del siglo pasado, que generan aproximaciones a la realidad y muestran una mayor sencillez en su entendimiento y concepción. Por otra parte, se encuentra la microsimulación, la cual es un concepto basado en la teoría del seguimiento vehicular que emergió con gran fuerza con la aparición de las computadoras, por lo que, pese a ser una teoría contemporánea, se ha empleado y mejorado en los últimos años.

Ante lo expuesto, ambas opciones presentan beneficios y desventajas para su ejecución; sin embargo, en el Perú, los métodos analíticos son muy utilizados para el análisis de tráfico, por lo que, en la presente tesis, se trabajará con dichos métodos y se analizará su capacidad de réplica para la realidad limeña.

Se emplearán dos modelos empíricos para el análisis del tráfico: Modelo alemán y Modelo británico. Dichos modelos emplean diferentes parámetros para efectuar el análisis. Por ello, resulta beneficioso realizar una investigación haciendo uso de los dos y comparar la semejanza de los resultados obtenidos por cada modelo. Es importante mencionar que cada uno de los dos modelos es principalmente aplicable para su país de origen, ya que se concibieron inicialmente para el análisis del tráfico de cada país en concreto. Esta acotación deberá estar presente a lo largo del trabajo de tesis, puesto que, como se sabe, en el Perú no existe la misma cultura de tránsito que en los países en cuestión.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Determinar si los modelos empíricos de análisis alemán y británico son aplicables para determinar la capacidad de la rotonda Independencia.

1.1.2 Objetivos específicos

Comparar la semejanza de los grados de saturación obtenidos con cada uno de los dos modelos empíricos alemán y británico.

Determinar si los valores de colas obtenidos con cada uno de los dos modelos empíricos alemán y británico se asemejan a los valores medidos en campo.

1.2. Hipótesis

Los grados de saturación de la rotonda Independencia obtenidos con cada uno de los dos modelos son semejantes entre sí.

Los valores de colas de cada uno de los tres accesos de entrada que conforman la rotonda Independencia según los dos modelos empíricos son semejantes a los valores medidos en campo.

1.3. Justificación

Según Greenaway (2004), las rotondas son dos veces más seguras que las intersecciones. Esto se debe a que no solo brindan mayor seguridad en el tránsito, sino también otorgan mayor versatilidad permitiendo conexiones entre cuatro o más ramales. Debido a la ubicación de la rotonda Independencia, se añaden otros valores, los cuales se caracterizan principalmente por su cercanía al mercado de Magdalena del Mar, por lo que se debe tomar con atención especial a los vehículos de carga que transitan en la zona. Tal como menciona Rodríguez (2018), los vehículos de carga toman parte del 25% de la congestión vehicular en Lima, de manera que la rotonda surge como opción para aliviar dicha problemática, ya que permite giros de 180° y, por tanto, facilita los giros de vehículos más grandes como los de carga. Además, se presenta la afluencia de diferentes tipos de vehículos como vehículos de transporte público, taxis y vehículos privados lo que resalta la versatilidad del óvalo y hace aún más interesante su análisis. A partir de lo expuesto, el presente trabajo de tesis adquiere valor para determinar la influencia de la rotonda en el tránsito de la Av. Sucre aledaña al mercado del distrito.

Por otro lado, el presente estudio evalúa dos métodos para el análisis de rotondas desde una perspectiva de eficiencia y adaptación al contexto de tráfico limeño, lo cual conlleva a una determinación teórica para evaluaciones posteriores de rotondas.

2. CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA

Las rotondas son construcciones de infraestructura vial en forma circular o de anillo, definidas como intersecciones especiales en las cuales confluyen varios ramales de diferentes características y jerarquías de forma segura y fluida. Dicha infraestructura regula la velocidad dentro de ella debido a que fuerza a reducir la velocidad de los vehículos por su forma circular y permite el flujo ordenado de los mismos, priorizando el tránsito de vehículos dentro de la rotonda sobre los que desean ingresar. Según Cabrera (2018) en su estudio de apuntes de clase de Ingeniería del Tráfico, diversos estudios han mostrado que las rotondas se comportan como una asociación de intersecciones en T y no como una sucesión de tramos de trenzado. Por lo que, se tendrá que calcular su capacidad de manera independiente.

En consecuencia, se tienen distintos modelos para el análisis de capacidad de las rotondas. Los modelos determinísticos de intersecciones son un buen punto de partida para obtener la capacidad de la rotonda. Además, es importante mencionar que tales modelos pueden ser empíricos o teóricos (basados en la teoría del flujo vehicular); sin embargo, en el presente trabajo nos centramos solo en los modelos empíricos.

Se presentarán dos modelos empíricos para la determinación de la capacidad de las rotondas. Los modelos en cuestión son el modelo británico (o de Kimber) y el modelo alemán. Adicionalmente, se calcularán los parámetros de eficiencia de las rotondas para describir la aplicabilidad de los modelos en la realidad limeña, cabe resaltar que los modelos mencionados son basados en parámetros geométricos principalmente aplicables en sus países de origen, por lo que su grado de confiabilidad decrece al ser aplicado en Lima.

2.1. Rotondas

2.1.1. Definición

Las rotondas son intersecciones que, por su geometría y ramales, tienen consideraciones especiales en contraste con las intersecciones (semaforizadas) que se conocen en la mayoría de los casos. Es, además, importante mencionar que una característica principal de este tipo de intersecciones es que presentan en su parte central una zona intransitable por vehículos llamada isleta central, por lo cual la calzada consiste en un anillo que recorre las entradas de todos los ramales que componen a la rotonda. En este punto, se debe hacer énfasis, ya que en muchos casos, se confunde la definición de rotonda considerándolas “falsas rotondas” las cuales, en general, consisten en dos tramos opuestos unidos a través de una isleta central.

Se debe tener en cuenta que las rotondas modernas, a diferencia de las otras intersecciones circulares existentes, presentan un diseño que se ciñe a seguir principios de tráfico distintos a los

que se usaban en las primeras décadas del siglo pasado, por lo que, se debe seguir un principio de seguridad en el tránsito. A partir de esto, se propone: “Las rotondas pueden aportar un sentido de lugar a una intersección y mejorar la calidad visual para los conductores, así como para el público que no conduce” (Jacquemart 1998: 3). Según el informe “Roundbout: An informational Guide”, las rotondas no son el único tipo de intersecciones circulares y, de estas, las que no cumplan con los requerimientos de las rotondas modernas, entonces son consideradas como círculos de tránsito (FHWA 2000: 5). Ante esto, se muestra la tabla dada por la FHWA mostrando las diferencias entre las rotondas modernas y los círculos de tránsito.

Tabla 1. Diferencias entre rotondas y círculos de tránsito

Parámetros de diferenciación	Rotondas	Círculos de tránsito
Control de tránsito	Se usa el control CEDA en todas las entradas	Se usa el control PARE o control CEDA
Prioridad de vehículos	Los vehículos que circulan en la rotonda tienen la preferencia	Se requiere dar preferencia a los vehículos que entran y no a los que circulan
Sentido de circulación	Sentido antihorario	Los círculos de tránsito más pequeños pueden ir en sentido horario y antihorario
Reducción de velocidad	Entrada con baja velocidad y, dentro de la calzada anular, es ajustado por la isleta central	A veces permite la entrada en alta velocidad
Vehículos de diseño	El diseño geométrico de la rotonda es adecuado a los vehículos de diseño	Pueden no estar diseñados adecuadamente para vehículos pesados

Fuente: FHWA (2000)

En adición, es importante mencionar que a los círculos de tránsito se les define como “intersecciones circulares de estilo antiguo en las que las señales de tráfico se usan para controlar uno o más puntos de circulación de entrada y, por lo tanto, tienen características operativas claramente diferentes de las rotondas controladas por rendimiento” (AASHTO 2011: 9-21). Además, cabe resaltar que las otras intersecciones circulares pueden ser de tres tipos:

- Rotatorias
- Círculos semaforizados
- Círculos de tránsito barriales

2.1.2. Tipos de rotondas

Siguiendo lo planteado en el manual Geometric Design of Roundabouts (Highways England 2007), las rotondas son de seis tipos.

- Rotonda normal

Es la más conocida y usada, por ello viene su denominación como normal. Presenta una isleta principal de diámetro no menor a cuatro metros y, además, con entradas que permiten el flujo de varios vehículos. Un punto a tener en cuenta es que el número de entradas adecuado para este tipo de rotondas es cuatro, por lo que, si se tiene un número de entradas mayor, entonces se debe tener en cuenta si es apropiado cambiar al uso de una rotonda doble.

- Mini rotonda

Este tipo de rotonda tiene como principal característica que su isleta central tiene un diámetro menor a comparación de la rotonda normal (menor a cuatro metros). Debido al tamaño pequeño de la isleta central, no se le debe saturar con elementos como postes de alumbrado, señales, entre otros. Además, para un correcto uso de esta rotonda, se debe tener entradas con velocidad de paso limitada (menores a 50 km/h).

- Rotonda doble

Es la unión de dos rotondas normales o mini rotondas conectadas por un tramo de unión o una isleta central alargada.

Tal como se mencionó anteriormente, este tipo de rotonda es apropiada para intersecciones circulares con cinco o más tramos de entrada para proveer mayor seguridad.

- Rotonda a distinto nivel

Este tipo de rotonda, tal como su nombre lo indica, es la encargada de unir, en al menos un tramo que compone a la rotonda, a una carretera que se desprende hacia otro nivel.

Los dos tipos más habituales son la de dos puentes y la tipo “pesa”. La primera, tiene como característica presentar grandes tamaños, por lo que su diseño debe ser minucioso, debido a que, si no es así, puede presentar problemas de velocidades altas generando complicaciones de seguridad en el tránsito. En cuanto a la segunda, tiene una forma compacta dando mayor seguridad.

- Intersección anular

Esta intersección tiene como característica principal que la circulación no es un solo sentido, sino se presenta en dos sentidos alrededor de la isleta central, lo cual se puede presentar con una semaforización adecuada.

- Rotonda semaforizada

Es una rotonda que se presenta por el mal funcionamiento de una predecesora a esta, lo cual conlleva a optar por un sistema de semaforización que corrija los errores iniciales.

Por otro lado, se presenta otra clasificación de rotondas, la cual es concebida por la Federal Highway Administration (2000).

- Mini rotonda

Rotonda con isleta central de diámetro menor a cuatro metros, por lo que presenta baja velocidad de diseño y, por tanto, bajo flujo de tránsito. Cabe resaltar que los vehículos pueden transitar a lo largo de la isleta central y, principalmente, esta se reserva para vehículos más pesados.

- Rotonda de 1 carril

Rotonda con isleta central mayor a cuatro metros, por lo que presenta una mayor velocidad de diseño con respecto a la mini rotonda y la isleta central no es transitable. Además, tal como su denominación la presenta, consiste de un solo carril de entrada, salida y circulación a través del anillo circular.

- Rotonda de múltiples carriles

Rotonda con isleta central mayor a cuatro metros, por lo que presenta una mayor velocidad de diseño con respecto a la mini rotonda y la isleta central no es transitable. La diferencia con respecto a la rotonda anterior es que posee dos o más carriles de entrada, salida y circulación a través de la calzada.

A partir de lo descrito en cada categoría de rotonda considerada por la FHWA, se presenta una tabla elaborada por la misma entidad con respecto a las rotondas y sus tipos según los parámetros típicos de rotondas.

Tabla 2. Características de cada tipo de rotonda

Elemento de diseño	Minirrotonda	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 máxima de entrar en los carriles por aproximación	1	1	2+
Diámetro del círculo inscrito típica	13 a 27 m	27 a 55 m	46 a 91 m
Isleta central de tratamiento	Totalmente transitable	Elevado (puede tener delantal atravesable)	Elevado (puede tener delantal atravesable)
Típica 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 de capacidad (veh/h)	Hasta aproximada 15 000	Hasta aproximadamente 25 000	Hasta aproximadamente 45 000 para rotondas de 2 carriles

Fuente: FHWA (2000)

2.1.3. Elementos de una rotonda

Como se ha ido mencionando a lo largo de este trabajo, las rotondas son intersecciones especiales debido a su geometría circular. Ante esto, los elementos que la componen son importantes para describir la particularidad de las mismas no solo ciñéndose precisamente a su geometría, sino a cómo aporta funcionalmente esta para el tránsito efectivo por la rotonda. A continuación, se presenta una rotonda con todos sus elementos referenciados.

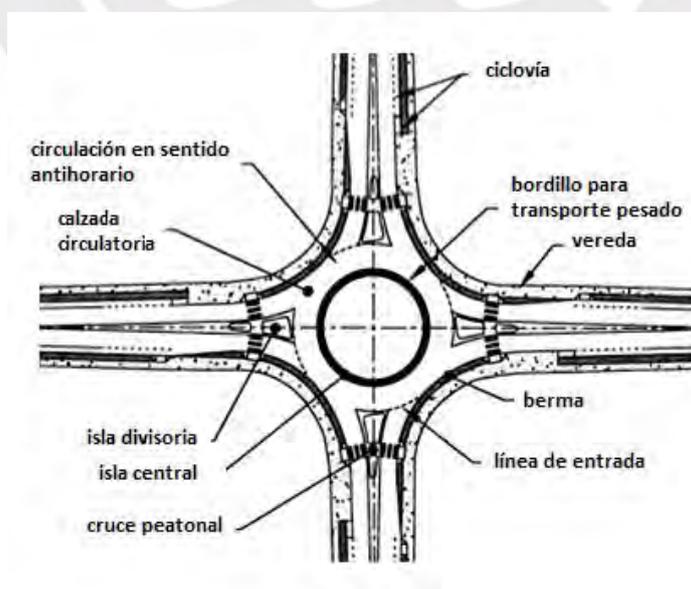


Figura 1. Elementos de una rotonda. Fuente: FHWA (2000)

- Isla central
Este elemento es el que más resalta en una rotonda, ya que, usualmente, es la zona por la cual los vehículos giran a su alrededor. Puede ser transitable; sin embargo, no lo es en la gran mayoría de casos.

- Isla divisoria
Elemento que se encarga de, tal como su nombre lo describe, partir un acceso/ramal de la rotonda, de manera que se divida la entrada y salida a través del ramal en que se ubique, lo cual ayuda en disminuir la velocidad de entrada a la rotonda permitiendo un mejor tránsito peatonal.

- Calzada circulatoria
Es la superficie circular por la cual transitan los vehículos a lo largo de la rotonda (generalmente alrededor de la isleta central). Principalmente, es diseñado de tal forma que el tránsito se dé en sentido antihorario.

- Bordillo para transporte pesado
Parte adyacente de la isleta central que puede ser transitada. Su función principal es la de dar mayor espacio al tránsito para vehículos de gran tamaño.

- Línea de entrada
Tal como muestra su denominación, es la línea que presenta, de manera tangible, la entrada a la calzada circular a través de un acceso/ramal. Además, cumple la función de presentar una restricción a los vehículos entrantes para que cedan el paso a los vehículos que ya transitan dentro de la calzada o a los transeúntes que deseen cruzar hacia la isleta partidora.

- Cruce peatonal

- Berma
Elemento encargado de separar a los peatones de los vehículos.

2.2. Modelos empíricos de regresión lineal

Estos modelos, al ser empíricos, se basan en observaciones constantes de numerosas rotondas, lo cual conlleva a un estudio exhaustivo de las mismas y tras la aplicación de una regresión lineal se obtendrá una función que define al modelo. Es importante mencionar que estos modelos tienen

parámetros con diferentes grados de influencia, siendo los parámetros geométricos uno de los más importantes debido a que son influenciados por el contexto del país en el que se formulan.

En adición, los modelos de regresión lineal se generan a partir de la calibración de datos obtenidos de cada rotonda que se toma en cuenta en un análisis. Para cada modelo que se presenta a continuación, estos se generan a partir de las observaciones realizadas por el autor y verificaciones en rotondas de un mismo país, por lo que se llega a una dispersión de puntos, los cuales los ajusta a partir de una regresión a tal punto de llegar a una línea recta. Estos modelos, al realizar tales ajustes, son propensos a tener una precisión que no posee de una confiabilidad cercana al 100%, ante esto, muchos de los modelos presentan algunas restricciones para su ejecución.

2.2.1. Modelo de Philbrick

En un principio, la fórmula de Wardrop era el medio fundamental con el que se procedía al cálculo de la capacidad de la rotonda; sin embargo, tras un estudio del TRRL en el año 1973, se determina que los parámetros de zona de trenzado aplicados en tal fórmula no tenían ninguna influencia en las rotondas modernas, por lo que su aplicación no era óptima para el diseño de una rotonda.

A partir de ello, se presentaron nuevos modelos que intentaban tomar posición para el cálculo de la capacidad de las rotondas y es ahí que Philbrick propone un modelo para sustentar lo mencionado. Con fines prácticos, Philbrick, a partir de la observación de once rotondas, genera un modelo de regresión lineal, con el que intenta definir con cierto grado de precisión a las rotondas de Gran Bretaña. Sin embargo, en el presente modelo, se innovo tomando en cuenta parámetros relacionados al tráfico (conceptos tales como flujos circulantes, flujos de entrada y variación del tráfico generado según el tipo de vehículo).

Es necesario precisar que, al ser un modelo de regresión lineal basado en la experiencia y observación, lo propuesto por Philbrick tiene ciertas restricciones en su uso. A continuación, se presentan los rangos de valores con los que es aplicable este modelo.

Tabla 3. Rangos de aplicación del modelo de Philbrick

Variable	Símbolo	Rango
Ancho de entrada a la zona de trenzado	e_i	4 - 12.5
Relación entre el ancho de entrada a la zona de trenzado y radio de curvatura de la entrada	$e_i / \sqrt{r_1}$	0.74 - 3.30
Diferencia entre el ancho de entrada a la zona de trenzado y ancho de circulación de la rotonda	$2e_i - w$	-2.5 - 9.5
Flujo circulante	Q_c	580 - 3890

Fuente: Philbrick (1977)

Se procede a mostrar las fórmulas a través de las cuales se realiza el cálculo de la capacidad de los ramales que componen a la rotonda.

$$Q_e = F - f_c Q_c \quad (1)$$

$$F = 233 \times e_i \times \left(1.5 - \frac{1}{\sqrt{r_1}} \right) - 255 \quad (2)$$

$$f_c = 0.0449 \times (2e_i - w) + 0.282 \quad (3)$$

Donde:

Q_e : Capacidad de entrada a la rotonda en pcu/h

Q_c : Flujo circulante en pcu/h

F : Intersección de la recta de regresión lineal con el eje de ordenadas

f_c : Pendiente de la recta de regresión lineal

r_1 : Radio de curvatura de la curva de entrada a la rotonda en metros

e_i : Ancho de entrada a la zona de trenzado en metros

w : Ancho de circulación de la rotonda en metros

2.2.2. Modelo de Glen, Summer y Kimber

El presente modelo se generó como una respuesta a la necesidad de un modelo que mejore lo propuesto por Philbrick, por ello presentan ecuaciones similares, además, al ser ambos modelos de regresión lineal, muestran una misma forma de ecuación que describe al modelo. Por consiguiente, se procede a mostrar las ecuaciones para este modelo.

$$Q_e = F - f_c Q_c \quad (4)$$

$$F = 224 \times \left(v + \frac{e - v}{1 + S} \right) + 35\mu + 2.4D - 135 \quad (5)$$

$$f_c = 0.063 \times \left(v + \frac{e - v}{1 + S} \right) + 0.29 \quad (6)$$

$$S = \frac{e - v}{l} \quad (7)$$

Donde:

Q_e : capacidad de entrada a la rotonda en pcu/h

Q_c : flujo circulante en pcu/h

v : mitad del ancho de carril de aproximación en metros

e : ancho de entrada a la rotonda

μ : ancho de circulación en el punto de máxima deflexión en la entrada en metros

D : diámetro del círculo inscrito en la rotonda en metros

S : agudeza en la entrada

Tal como se observa, a diferencia del modelo de Philbrick, se añaden conceptos tales como agudeza en la entrada y ancho de circulación en el punto de máxima deflexión en la entrada. Por tanto, se da cuenta que, al tener mayor cantidad de parámetros, se puede esperar una mayor precisión en el cálculo de la capacidad de los ramales de la rotonda.

Se debe tener en cuenta que, al ser un modelo de regresión lineal, sus parámetros tienen un intervalo de valores para su correcta aplicación en el posterior cálculo de capacidad de la rotonda, por ello se presenta la siguiente tabla.

Tabla 4. Rangos de aplicación del modelo de Glen, Summer y Kimber

Variable	Símbolo	Rango
Mitad del ancho del carril de aproximación	v	1.9 - 6.9
Ancho de entrada a la rotonda	e	4.5 - 16.5
Agudeza de la entrada	S	0.05 - 1.98
Ancho de circulación en el punto de mayor deflexión en la entrada	u	5.5 - 22.4
Diámetro del círculo inscrito en la rotonda	D	13.5 - 58.5

Fuente: Glen (1978)

2.2.3. Modelo francés

También denominado modelo de CETUR, formulado en 1986, resulta de una modificación del gráfico de SETRA (1984). Este modelo se basa en dos variables. La primera es Q_c llamada tráfico molesto, la cual retrata el tráfico que se tiene en el anillo que interfiere con los vehículos localizados en la entrada del ramal en análisis. La segunda variable es Q_s que hace referencia al tráfico de salida del ramal. Adicionalmente, al ser un método empírico, se presenta un valor fijo en la función de este modelo el cual se obtiene con la medición y estudio de rotondas francesas: siendo este valor igual a 1500 veh/hora como la capacidad máxima de un ramal.

Por lo tanto, la función para un ramal y anillo de un solo carril corresponde a la siguiente expresión:

$$Q_e = 1500 - \frac{5}{6}(Q_c + 0.2Q_s) \quad (8)$$

Dónde:

Q_e : Capacidad de entrada (veh/h)

Q_c : Flujo del anillo (veh/h)

Q_s : Capacidad de salida (veh/h)

Además, para rotondas con número de carriles mayor que 1 se maneja un factor “k” que hace referencia a un factor de corrección con respecto a la expresión antes mostrada.

$$Q_e = 1500 - \frac{5}{6}k(Q_c + 0.2Q_s) \quad (9)$$

Dónde:

Q_e : Capacidad de entrada (veh/h)

Q_c : Flujo del anillo (veh/h)

Q_s : Capacidad de salida (veh/h)

k : Factor de corrección (para número de carriles > 1).

Según CETUR (1986), $k=1$ para rotondas con calzadura anular de 1 carril, $k=0.9$ para rotondas de pequeño diámetro (10 a 30m) con calzada anular de 8m de anchura media (2 carriles) y $k=0.7$ si se trata de rotondas de mayor diámetro con calzada anular de al menos 8m (2 carriles).

2.2.4. Modelo alemán

El presente modelo, pese a ser considerado un modelo empírico de regresión lineal, no sólo se basa en ello, sino también presenta la teoría de la aceptación del hueco de Sieglöch (1973) por tanto, se define bajo una función exponencial. Dicha expresión matemática relaciona la capacidad de entrada y el flujo presente en el anillo de la rotonda. El empirismo que nos presentan los alemanes se ve reflejado en los parámetros A y B.

Se presenta la expresión del modelo alemán como función exponencial

$$Q_e = Ae^{\frac{-B \cdot Q_c}{10000}} \quad (10)$$

Dónde:

Q_e : Capacidad de entrada (veh/h)

Q_c : Flujo del anillo (veh/h)

A, B: Parámetros determinados de forma empírica

Sin embargo, al pasar los años, se replanteó el modelo y se obtuvo un modelo lineal en el cual siguen presente los parámetros A y B. Para este caso, dichos parámetros dependen esencialmente

del número de carriles en el anillo de la rotonda y el número de carriles en el ramal en análisis mediante la siguiente expresión.

$$Q_e = A - BQ_c \quad (11)$$

Dónde:

Q_e : Capacidad de entrada (veh/h)

Q_c : Flujo del anillo (veh/h)

A, B: Parámetros determinados de forma empírica

De tal ecuación, siguiendo el estudio de Pardillo y Sánchez muestra una tabla con los valores empíricos de A y B según el número de carriles que presente la rotonda tanto en la entrada como en el anillo (calzada circular).

Tabla 5. Parámetros empíricos del Modelo Alemán

Número de carriles		Factores según número de carriles	
Anillo	Entrada	A	B
3	2	1408.8	0.422
2	2	1379.9	0.497
2 o 3	1	1100	0.443
1	1	1068.6	0.654

Fuente: Pardillo y Sánchez (2006)

2.2.5. Modelo británico

El presente modelo tiene como autor principal a Kimber, por lo que también puede denominarse modelo de Kimber (1980). Este investigador, tras varios años de estudio de rotondas, llegó a la conclusión que existe una relación lineal entre la capacidad del ramal y los flujos circundantes, teniendo en cuenta parámetros geométricos de la rotonda.

Dentro de la expresión que define al modelo, se encuentran los factores k, x e y. Dichos factores son principalmente reflejo de la geometría de la rotonda; sin embargo, es conveniente tener en cuenta que son cinco puntos principales que tomar para el análisis de la rotonda: ancho de entrada a la rotonda, longitud efectiva del ensanchamiento de la entrada (longitud de abocinamiento), diámetro del círculo inscrito en la rotonda, ángulo de la entrada y radio de la entrada

$$k = 1 - 0.00347(\Phi - 30) - 0.978\left(\frac{1}{r} - 0.05\right) \quad (12)$$

$$x = v + \frac{e - v}{1 + 3.2\left(\frac{e - v}{l}\right)} \quad (13)$$

$$y = 1 + \frac{0.5}{1 + e^{\frac{D-60}{10}}} \quad (14)$$

Dónde:

e: Ancho de la entrada a la rotonda (m)

v: Mitad del ancho de la calzada de aproximación (m)

l: Longitud efectiva del ensanchamiento de la entrada (m)

D: Diámetro del círculo inscrito en la rotonda (m)

r: Radio de la curva de entrada (m)

Ø: Angulo de la entrada (grados)

Cabrera (2018: 10) en su trabajo de Apuntes de Ingeniería del Tráfico, muestra una adaptación de Fernández con valores típicos de los parámetros geométricos de la ecuación anterior mostrada.

Tabla 6. Rango de valores de parámetros para Modelo Británico

Variable	Unidades	Rango
e	m	3.6 - 16.5
v	m	1.9 - 12.5
l	m	1 - ∞
D	m	13.5 - 171.6
r	m	3.4 - ∞
Ø	°	0 - 77

Fuente: Adaptado de Fernández (2011)

Adicionalmente, existen los parámetros a, b y c dentro de la función matemática, los cuales dependen de la geometría. Para el caso de Inglaterra, se adoptan los valores 303, 0.21 y 0.2 respectivamente.

Finalmente, la expresión matemática para el modelo británico es:

$$Q_e = k[ax - by(1 + cx)q_c] \quad (15)$$

Dónde:

q_c : Flujo circundante al ramal (veh/hora)

Q_e : Flujo de entrada (veh/hora)

2.2.6. Modelo de Bovy (Suiza)

“Esta fórmula se recomienda para rotondas (para uso en entornos urbanos y suburbanos) con una isla central no montable, de pequeñas dimensiones (diámetro interno máximo $D_{int} = 18 - 20$ m)” (Mauro 2010: 19). Teniendo en cuenta lo planteado por Mauro, la fórmula que representa al modelo de Bovy para la determinación de la capacidad en una rotonda es la siguiente:

$$C = \frac{1}{\gamma} (1500 - \frac{8}{9} Q_d) \quad (16)$$

Dónde:

C: capacidad de la rotonda (pcu/h)

γ : parámetro según número de carriles

Q_d : tráfico perturbador (pcu/h)

En relación con el parámetro γ , su valor depende exclusivamente del número de carriles que tenga la rotonda en análisis.

Tabla 7. Valores de parámetro γ

Nº carriles	VALOR γ
1 carril	1
2 carriles	0.6-0.7
3 carriles	0.5

Fuente: Mauro (2011)

En la tabla 7, se pueden observar los valores de γ , teniendo en cuenta que para dos carriles los valores tienen un intervalo, del cual depende según el tamaño de entrada que se tiene.

El tráfico perturbador se desprende de la siguiente relación:

$$Q_d = \alpha Q_u + \beta Q_c \quad (17)$$

Dónde:

Q_u : tráfico de salida

Q_c : tráfico circulante

α, β : parámetros geométricos

Para el parámetro α , se debe tomar en cuenta la longitud de entrada en la rotonda (l), ya que existe una relación lineal inversa entre estos dos. Ante esto, si l es mayor que 28 metros, entonces α se asume como 0. En el siguiente gráfico, se presentan 3 rectas denominadas A, B y C, las cuales refieren a condiciones distintas de velocidad del flujo circular. A es para velocidades de 20 a 25 km/h, B para velocidades mayores a 25 km/h (gran perturbación) y C para velocidades menores a 20 km/h (baja perturbación).

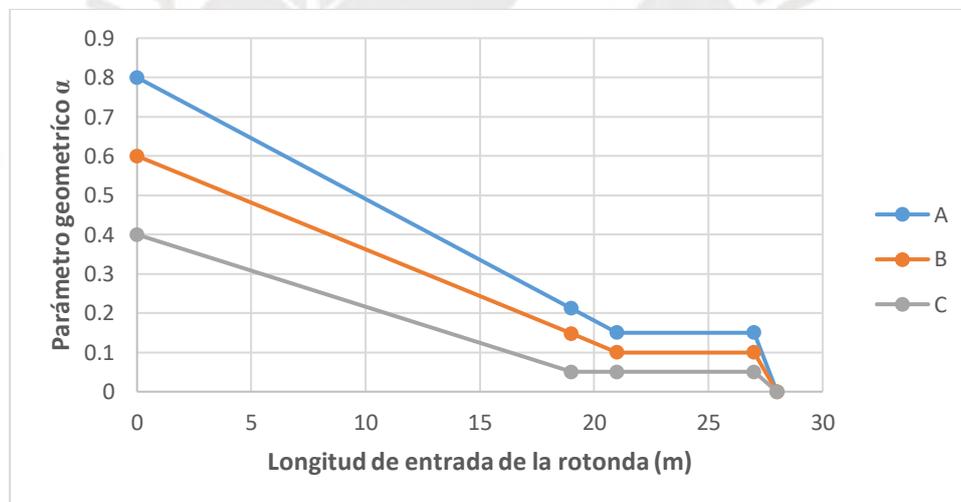


Figura 2. Valores de α según l. Fuente: Mauro (2011)

En cuanto al otro parámetro geométrico (β), este depende del número de carriles que tiene la rotonda en análisis.

Tabla 8. Valores de parámetro β

Número de carriles	β
1 carril	0.9-1
2 carriles	0.6-0.8
3 carriles	0.5-0.6

Fuente: Mauro (2011)

2.3. Modelos teóricos basados en la teoría de brechas

“Para cruzar una vía prioritaria o para incorporarse a ella desde una vía secundaria, los conductores de la rama secundaria observan las brechas (intervalos) que se presentan en el flujo prioritario esperando que se produzca una suficientemente grande como para realizar el movimiento deseado” (Gibson 2001: 27). A partir de lo planteado por Gibson, se desprenden dos ideas principales. La primera viene a ser el concepto de flujo prioritario, lo cual se genera en toda intersección y una rotonda no es excepción de ello, ya que los vehículos que transitan a lo largo de la calzada circular tienen el paso prioritario, mientras que los vehículos que entran a la rotonda a través de los ramales se convierten en parte de los flujos secundarios. En segundo lugar, se puede entender que para que un vehículo, desde el flujo secundario, pueda transitar debe esperar un intervalo de tiempo en el que su tránsito no afecte y traiga problemas con vehículos del flujo prioritario. Ese intervalo de tiempo es el denominado brecha y es el concepto que da origen a la teoría de brechas y que, posteriormente, trae consigo diversos modelos para rotondas.

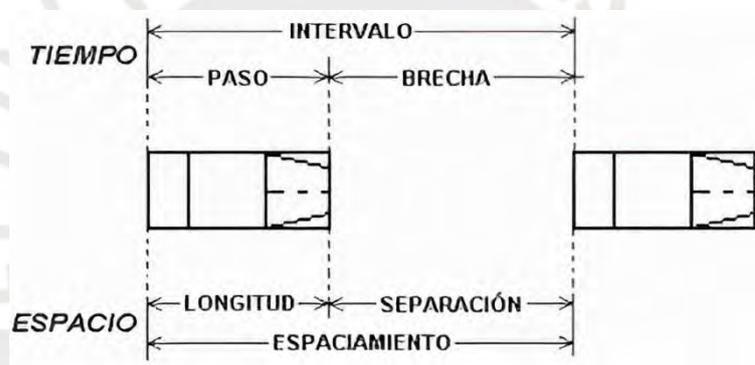


Figura 3. Parámetros temporales y espaciales. Fuente: Cárdenas (2012)

Se puede observar en la figura que la brecha viene a ser un homólogo de separación de dos vehículos desde una perspectiva temporal y no espacial. Sin embargo, la brecha puede ser determinada por distintos conductores de distinta manera, por lo que, se debe optar por una población homogénea de conductores para poder obtener una idea más concisa de este concepto. Esto último toma mayor relevancia cuando nos referimos a la brecha crítica, la cual se define como el valor mínimo del intervalo de tiempo que compone a la brecha, debido a que una mala determinación de brecha crítica conllevaría a graves problemas para los conductores a lo largo de la intersección. Por tanto, siempre debe tomarse en cuenta la siguiente relación:

$$g \geq \tau \quad (18)$$

Dónde:

g: brecha

τ : brecha crítica

Además, la teoría de Brechas tiene seis consideraciones según Gibson (2001: 27):

- Regulación se respeta
- Función de distribución de brechas e intervalos es la misma
- La brecha crítica es la misma para todos los conductores
- Existen 2 formas de llegar a la intersección desde la vía principal:
 - o En pelotón. Tienen un intervalo constante que es igual al mínimo ($\Delta = \frac{1}{Q_p}$, donde Q_p es el flujo en la vía principal)
 - o Libres.
- Proporción de vehículos igual a Θ
- Tiempo de avance de un lugar en la cola de la rama secundaria igual a β .

Siguiendo las consideraciones que propone Gibson, se llega a una expresión que da muestra del modelo genérico de la teoría de Brechas para la capacidad del acceso secundario de la intersección en análisis:

$$Q_s = \frac{q_p(1 - \theta)e^{-\gamma(\tau - \Delta)}}{1 - e^{-q_p\beta}} \quad (19)$$

Dónde:

Q_s : capacidad del acceso secundario (veh/h)

q_p : flujo en la vía prioritaria (veh/h)

Θ : proporción de vehículos en pelotón

Δ : intervalo mínimo

Q_p : capacidad la vía prioritaria (veh/h)

β : tiempo de avance de un lugar en la cola de la rama secundaria (s)

τ : brecha crítica (s)

2.3.1. Modelo HCM 2010

El HCM presentó un nuevo modelo para análisis de capacidad de rotonda, el cual puede ser considerado dentro del grupo de modelos de regresión lineal, ya que este modelo parte de una regresión lineal para la obtención de dos parámetros que componen su expresión general; sin embargo, tiene una diferencia con estos modelos. La diferencia radica en que, pese a trabajar con regresión lineal, se tiene en cuenta la teoría de las brechas, lo cual se puede observar en las expresiones para obtener dichos parámetros (A y B):

$$A = \frac{3600}{t_f} \quad (20)$$

$$B = \frac{t_c - t_f/2}{3600} \quad (21)$$

Se puede observar en ambas expresiones que se van considerando dos intervalos de tiempo. El primero (t_f) refiere al intervalo de seguimiento entre vehículos y está presente en ambas expresiones para determinar los parámetros. El segundo (t_c) refiere al intervalo crítico. Ambos intervalos dependen de las condiciones geométricas de las rotondas, por lo que, el mismo HCM propone valores de A y B según la configuración geométrica de la rotonda.

Tabla 9. Valores de intervalos propuestos por HCM2010

Configuración		t_c	t_f
Entrada de un carril	Un carril de circulación	5.19	3.19
	2 carriles de circulación	4.11	3.19
Entrada de 2 carriles con 2 carriles de circulación	Carril izquierdo	4.29	3.19
	Carril derecho	4.11	3.19

Fuente: HCM (2010)

Por tanto, haciendo uso de estos parámetros, se obtienen las expresiones para determinar la capacidad de una rotonda según HCM2010, las cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 10. Modelos de capacidad

Configuración		Modelo de capacidad
Entrada de un carril	Un carril de circulación	$c = 1.130 \times e^{(-0.0010 \cdot v_c)}$
	2 carriles de circulación	$c = 1.130 \times e^{(-0.0007 \cdot v_c)}$
Entrada de 2 carriles con 2 carriles de circulación	Carril izquierdo	$c_{e,L} = 1.130 \times e^{(-0.00075 \cdot v_c)}$
	Carril derecho	$c_{e,R} = 1.130 \times e^{(-0.0007 \cdot v_c)}$

Fuente: HCM (2010)

Es importante añadir que la presencia de peatones a lo largo de la rotonda es inevitable y es un factor a tomar en cuenta de manera que se llegue a una expresión con mayor precisión que explique en mayor amplitud lo que se sucede en las rotondas. En consecuencia, el modelo del HCM mantiene una relación de reducción de capacidad por el factor de los peatones. Tal relación se muestra en el siguiente gráfico a mostrar, el cual fue planteado por el NCHRP en su publicación “Roundabouts: An informational guide” (2010).

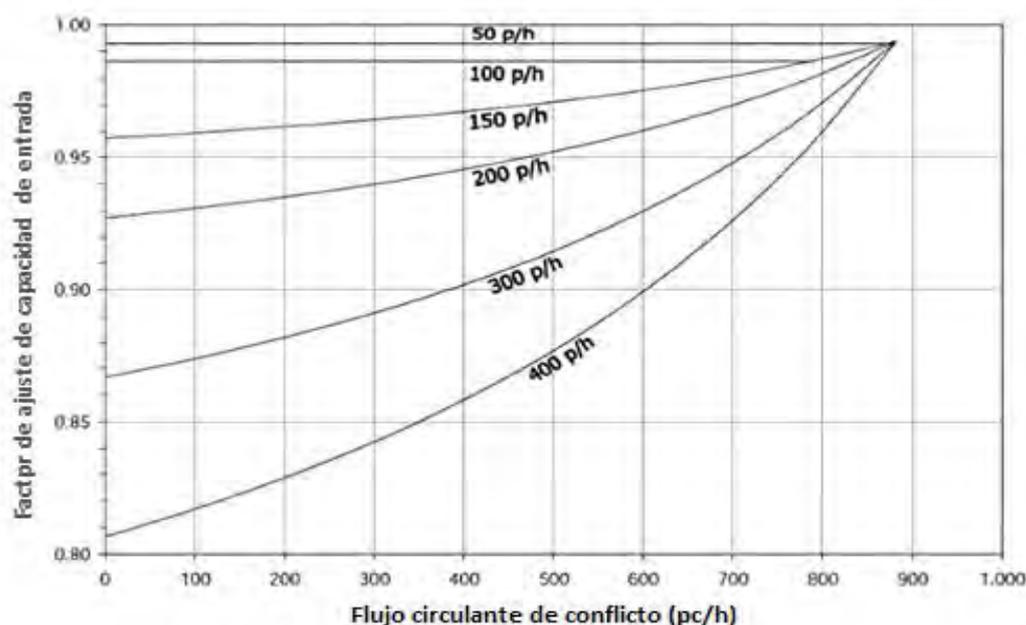


Figura 4. Reducción por peatones. Fuente: NCHRP (2010)

En la figura 4, se verifica que, tal como se suponía, a mayor cantidad de afluencia de personas, entonces el factor es menor y, por tanto, se reduce en mayor cantidad la capacidad de un ramal y de la rotonda. En adición, se generaron curvas para cada cierta cantidad de afluencia de peatones, en los cuales se observa una relación cercana a la lineal para valores no tan altos del flujo circulante de conflicto; sin embargo, adquiere carácter exponencial a medida que se sobrepasa el valor de 400 pc/h de flujo circulante.

2.3.2. Modelo Brilon-Wu

Este modelo propuesto por Brilon-Wu en Alemania se desprende del modelo realizado por Tanner en 1997. A partir de ello, planteó la siguiente ecuación para el cálculo de capacidad de una rotonda:

$$C = 3600 \left(1 - \frac{\Delta \frac{Q_c}{3600}}{n_c}\right)^{n_c} * \frac{n_e}{T_f} * e^{(-\frac{Q_c}{3600} * (T_c - \frac{T_f}{2} - \Delta))} \quad (22)$$

Dónde:

Q_c : flujo circulante en frente de la entrada a la rotonda (pcu/h)

n_c : número de carriles circulares

n_e : número de carriles en la entrada

T_c : brecha crítica

T_f : tiempo de seguimiento

Δ : Avance mínimo entre los vehículos que circulan en el círculo.

Brilon-Wu sigue lo propuesto por la teoría de brecha, por lo que se toma en cuenta el comportamiento de los conductores en el país de origen del modelo (Alemania). Lo dicho se puede constatar cuando se muestran como variables del modelo a la brecha crítica, tiempo de seguimiento y el avance mínimo entre vehículos. Ante esto, siguiendo la fórmula planteada, se obtiene el siguiente gráfico:

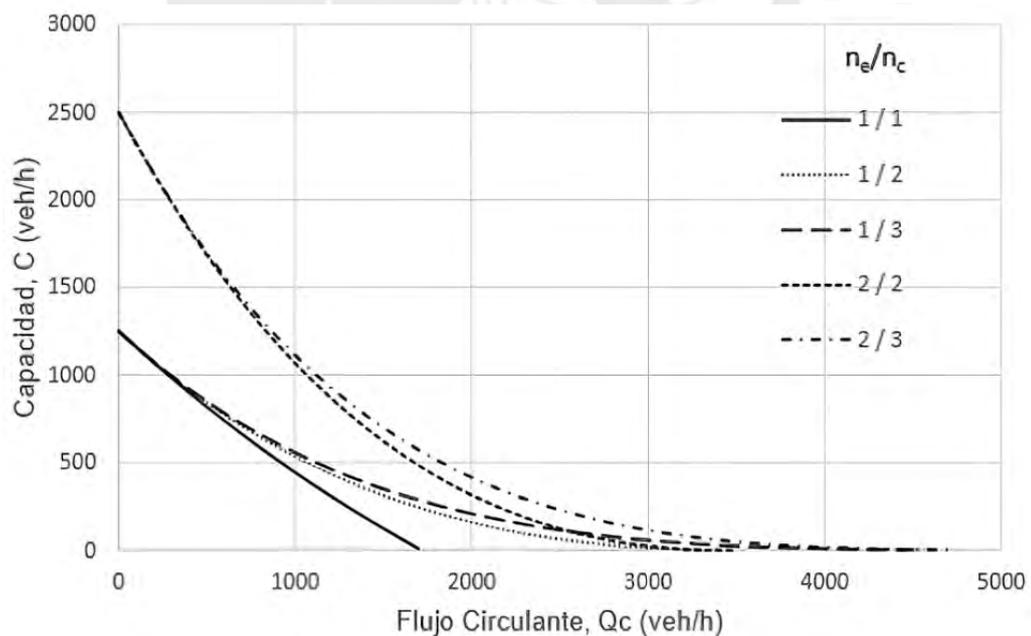


Figura 5. Capacidad vs Flujo circulante. Fuente: HBS (2001)

2.3.3. Modelo de Troutbeck

El presente modelo fue planteado por Troutbeck en Australia el año 1989, el cual es un paso previo a la entrada de los métodos realizados por SIDRA y que sirvió como base y modelo para este. Al tratarse de un modelo que se basa principalmente en la teoría de aceptación de las brechas, entonces consiste en un modelo probabilístico que trata de evocar una intención del conductor de poder ingresar y transitar por una intersección (en este caso, rotonda) a través de un intervalo de tiempo que se presenta cuando se genera un espacio en la intersección para que se dé el escenario esperado por el conductor.

Ante lo mencionado, Troutbeck presentó un modelo basado en una ecuación para determinar la capacidad de los ramales que componen una rotonda. Se presenta la fórmula reducida para rotondas, de manera que muestra una mayor y sencilla aplicación del método australiano o de Troutbeck. Se mantienen los parámetros usados en modelos como el de SIDRA (se tratará en el siguiente punto), pero se usan valores más ajustados al caso de las rotondas. A continuación, se presentan las expresiones mencionadas.

$$Q_e = \frac{3600 \times \varphi_c \times q_c \times e^{-\lambda(\alpha - \Delta_c)}}{1 - e^{-\lambda\beta}} \quad (23)$$

$$\lambda = \frac{\varphi_c \times q_c}{1 - \Delta q_c} \quad (24)$$

$$\beta = 2.819 - 3.94 \times 10^{-4} \times q_c \quad (25)$$

$$\alpha = (1.641 - 3.137 \times 10^{-4} \times q_c) \times \beta \quad (26)$$

Con tales fórmulas, se procede a realizar los cálculos de capacidad de los ramales de una rotonda haciendo uso del modelo presentado por Troutbeck. A partir de ellas, E. Chung y R. Akcelik en su publicación de 1992, "Comparison of roundabout capacity and delay estimates from analytical and simulation models", presentaron resultados de los parámetros que se encuentran inmersos en estas ecuaciones, los cuales se presentan en la siguiente tabla. Tener en cuenta que, los resultados son para una rotonda de un carril de calzada anular, ramal de un carril y diámetro inscrito de 30 metros.

Tabla 11. Cálculos con fórmulas del modelo de Troutbeck

Flujo circulante q_c (veh/h)	Brecha crítica α (seg)	Avance de seguimiento β (seg)	Prop de vehículos libres ϕ
450	3.96	2.64	0.563
900	3.35	2.46	0.375
1350	2.78	2.29	0.188

Fuente: E. Chung y R. Akcelik (1992)

A la vez, se muestra una gráfica, en la cual se presenta la capacidad de los carriles dominantes y sub dominantes en función del flujo circulante en la rotonda. Es importante diferir entre los carriles dominantes y sub dominantes, pues la diferencia reside en la prioridad hacia la entrada a la rotonda, la cual se define por la accesibilidad que presenta cada uno.

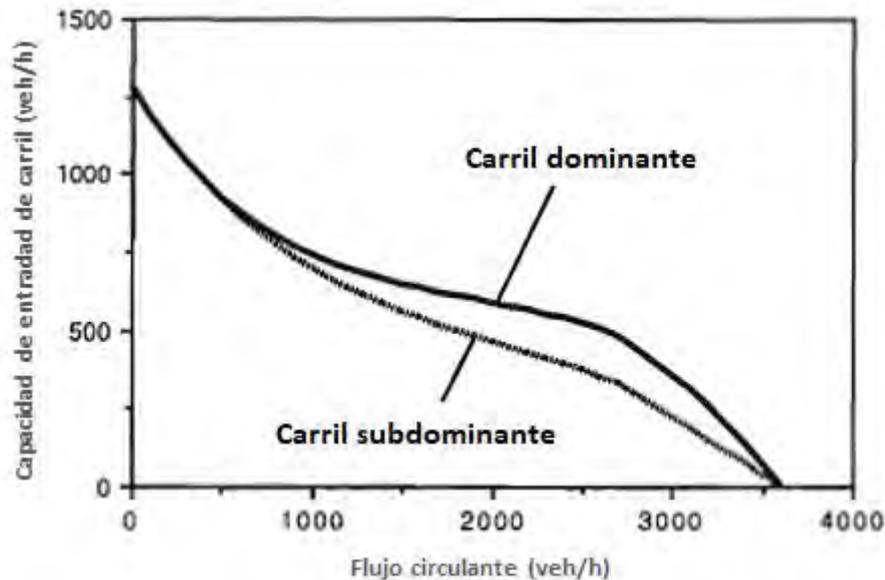


Figura 6. Capacidad de carril entrante en función de flujo circulante. Fuente: E. Chung y R. Akcelik (1992)

De la figura 6, se puede desprender que, en caso de carriles dominantes, la capacidad varía considerablemente entre flujos circulantes menores a 3000 veh/h y mayores a este valor. En contraste, los carriles sub dominantes presentan una relación más cercana a una lineal, por lo que se sigue una tendencia más definida.

2.3.4. Método de SIDRA

El método SIDRA está basado principalmente en la teoría de aceptación de brechas, por lo que adopta estudios realizados por Troutbeck en 1989 y que conllevó a expresiones para rotondas

australianas. En relación a lo antes mencionado, la formulación en SIDRA es que la capacidad de un carril de entrada a la rotonda sigue un flujo principal y un factor de ajuste. Esto se muestra en la siguiente expresión.

$$Q_g = \frac{sg}{c} = \frac{3600}{\beta} \times (1 - \Delta_c q_c + 0.5\beta\varphi_c q_c) \times e^{-\lambda(\alpha - \Delta_c)} \quad (27)$$

Donde:

s: flujo de saturación en veh/h

g: promedio equivalente del tiempo verde en la teoría de aceptación de brechas en segundos

c: promedio equivalente del tiempo del ciclo de semaforización en la teoría de aceptación de brechas en segundos

β : seguimiento de avance de tráfico de entrada en segundos

Δ_c : intervalo mínimo en el modelo de distribución de avance de llegada en segundos

q_c : tasa del flujo de circulación para el carril de entrada en análisis en veh/h

φ_c : proporción de vehículos no agrupados en el flujo de tráfico que circula

λ : parámetro de distribución exponencial

α : aceptación de brechas críticas para el flujo de entrada

Tener en cuenta que el valor sg es correspondiente a un ciclo y su capacidad, por lo que define un factor bastante considerable dentro del modelo, tal como se puede apreciar en la expresión anterior. Por ello, se propuso la siguiente expresión para definirlo.

$$sg = \frac{g}{\beta} = \frac{1}{\lambda\beta} + 0.5 \quad (28)$$

Siguiendo la relación de la teoría de aceptación de brechas, para SIDRA se presenta intervalos de valores para rotondas de seguimiento de avance como brecha crítica, los cuales son parámetros definatorios para este tipo de modelos.

Tabla 12. Valores mínimos y máximos para α y β

	Mínimo	Máximo
Seguimiento de avance (β)	1.2	4
Brecha crítica (α)	2.2	8

Fuente: ARRB Transport Research (1998)

Por otro lado, se proponen, también, intervalos de valor para otros parámetros tales como intervalo mínimo en el modelo de distribución de avance de llegada y la proporción de vehículos no agrupados en el flujo de tráfico que circula.

Tabla 13. Valores mínimos y máximos para Δ_c y φ_c

Número de carriles	Δ_c	φ_c
1	2	$e^{-5.0q}$
2	1.2	$e^{-3.0q}$
>2	1	$e^{-2.5q}$

Fuente: ARRB Transport Research (1998)

A la vez, los mismos autores mencionados en el acápite relacionado al modelo australiano, realizaron una comparación entre el modelo propuesto por SIDRA que se basa en la teoría de aceptación de brechas y un modelo de simulación, el cual, mediante algoritmos, toma en cuenta mayor cantidad de parámetros y, por tanto, teóricamente, son más confiables en sus resultados. En la siguiente tabla, se muestran los resultados obtenidos y, así, tener una visión más amplia en la precisión del modelo presentado.

Tabla 14. Comparación entre modelo SIDRA y modelo de simulación valor C

Flujo circulante q_c (veh/h)	Capacidad de entrada, Q_e (veh/h)	
	SR 45/SIDRA	Modelo C
450	3.96	2.64
900	3.35	2.46
1350	2.78	2.29

Fuente: E. Chung y R. Akcelik (1992)

Es, a partir de la comparación mostrada en la tabla 14, que el modelo de SIDRA es bastante cercano a lo calculado por modelos de simulación, por lo que su aplicación genera confiabilidad en los resultados que se puedan determinar a partir de ellos.

2.3.5. Fórmula de Wardrop

Esta fórmula fue propuesta en 1957 influenciada por los parámetros definidos dos años atrás por el Road Research Laboratory, el cual es un laboratorio de investigación vial de origen norteamericano. Los parámetros que se tenían en cuenta para la capacidad de una vía de una rotonda son, principalmente, cinco. Dichos parámetros consisten en la longitud y ancho del ramal, ancho medio de entrada y salida del ramal, porcentaje de vehículos que realizan maniobra de trenzado y tipo de vehículos. Se debe considerar que, para proponer la fórmula de Wardrop, se definió la acción de trenzado como la maniobra que ejecutan los conductores al conducir en la calzada de la rotonda cruzando dos o más carriles, por lo que, la acción de trenzado conlleva a un mayor tránsito a lo largo de la rotonda. En adición, la presente fórmula, en relación al tipo de vehículo, toma parte un coeficiente que relaciona la cantidad de vehículos de tránsito pesado y vehículos de tránsito normal. A partir de lo mencionado, se propuso la siguiente ecuación:

$$Q_p = \frac{K \times w \times \left(l + \frac{e}{w}\right) \times \left(l - \frac{p}{3}\right)}{l + \frac{w}{l}} \quad (29)$$

Donde:

Q_p : Capacidad de la sección de entrecruzamiento en veh/h

W: ancho de la sección de entrecruzamiento en m

e: ancho promedio de las entradas en la sección de entrecruzamiento

l: longitud de sección de entrecruzamiento en m

p: porcentaje de vehículos que realizan la maniobra de trenzado

K: coeficiente Wardrop

En la actualidad, la fórmula es usada mediante el método de la sección de entrecruzamiento, el cual consiste en, como pasa inicial, plantear una longitud de sección de entrecruzamiento. Dicha longitud adoptada debe cumplir con un requisito principal, debe estar acorde a la geometría de la rotonda. Tras ello, se pasa a calcular la capacidad de cada sección de entrecruzamiento que se dispuso para la rotonda en su totalidad. Finalmente, se hace una comparación entre las capacidades determinadas y el volumen de demanda de cada sección, por lo que se debe cumplir con lo siguiente:

Tal como se ha mencionado en párrafos anteriores, la fórmula de Wardrop es utilizada para el cálculo de la capacidad de las secciones de entrecruzamiento. Dicha fórmula sigue distintos parámetros y, en el caso particular del parámetro del ancho de entrada a la sección de entrecruzamiento, se debe tener en cuenta que se usa un ancho promedio. Por tanto, se procede a mostrar las fórmulas usadas y adaptadas según el tránsito peruano.

$$Q_p = \frac{[160W \times (\frac{1+e}{W})]}{(1 + \frac{W}{L})} \quad (31)$$

$$e = \frac{e_1 + e_2}{2} \quad (32)$$

Donde:

e_1, e_2 : ancho de cada entrada a la sección de entrecruzamiento en metros

2.3.6. Modelo de Harders

El presente modelo, tal como hace cuenta su nombre, fue realizado por Harders en 1968 con el fin de determinar la capacidad de intersecciones que no poseen semaforización basado en teorías de brechas siguiendo una distribución de Poisson.

Para seguir este modelo, se siguen una fórmula que presente la distribución principal de este; sin embargo, se toman otras ecuaciones que alimentan a la anterior mencionada para que, de esta manera, se llegue al análisis y resultado esperado a determinar. Las ecuaciones son las siguientes a presentar.

$$C = F \times e^{-\beta} \times \frac{Q_g}{e^\alpha - 1} \quad (33)$$

$$\alpha = \frac{Q_g}{3600} \times t_f \quad (34)$$

$$\beta = \frac{Q_g}{3600} \times (t_g - t_f) \quad (35)$$

$$F = 1 - Q_g^2 \times 10^{-7} \quad (36)$$

Donde:

Q_g : suma de los tráficos molestos para la entrada en análisis en veh/h

t_g : intervalo crítico

t_f : intervalo complementario

$$\gamma = e^{-\frac{1}{3600}(Q_g \times t_g + Q_e \times t_f)} \quad (37)$$

Donde:

C: capacidad del ramal de entrada a la rotonda en veh/h

Q_e : demanda efectiva del flujo en el ramal

Al analizar la fórmula, se verifica y recuerda el concepto de intervalo crítico que ha sido definido en el numeral 2.3. del presente trabajo; no obstante, intervalo complementario es un concepto aún no explicado. Por tanto, este concepto es definido como el intervalo mínimo para que el vehículo ubicado segundo (detrás del primero) pueda entrar a la intersección y transitar tras el primer vehículo que encontró el intervalo necesario para hacerlo.

Es necesario profundizar en el lado probabilístico de este modelo, ya que añadir el factor “F” que es un factor dado para verificar las dispersiones tanto del intervalo crítico como del complementario. Ante ello, se procede a dar las expresiones que determinan las probabilidades ante ciertos escenarios.

Probabilidad de que no hayan más de n vehículos:

$$p_n = p_0 \times (1 - p_0)^n \quad (38)$$

Probabilidad de que haya n o más vehículos en la cola:

$$s_n = (1 - p_0)^n \quad (39)$$

Dentro del plano probabilístico, un punto importante a destacar es el tiempo de tránsito que debe emplear un conductor al transitar dentro de la rotonda, es decir, para ingresar desde un ramal a la calzada anular. Se sigue la siguiente expresión:

$$t_{med} = \frac{3600 \times (1 - \gamma)}{C - Q_e} \quad (40)$$

Además, en consideración de probabilidades, otro punto a considerar es la cantidad de vehículos que tomarán parte del tráfico en la cola de tránsito en la rotonda. Siguiendo esto, la expresión que representa tal punto es la siguiente.

$$n_{med} = Q_e \times \frac{1 - \gamma}{C - Q_e} = \frac{Q_e}{3600} \times t_{med} \quad (41)$$

Ahora bien, se ha mostrado el modelo de Harders desde un punto relacionado a una intersección no semaforizada en general, lo cual da una idea en general, pero no puede definir con precisión a una rotonda y el tránsito que se dé en ella. Ante esto, se procedió a una adaptación del modelo para las rotondas y fue CETE d'AIX en Francia, quien se encargó de realizar esta labor.

Principalmente, las diferencias más contundentes son que, para intersecciones en T, los intervalos críticos y complementarios adquieren valores de 5.2 y 2.7 segundos, respectivamente. En cuanto a intersecciones como rotondas, CETE d'AIX, recomienda valores de 4.5 y 2.5 segundos; sin embargo, tales valores se deben tomar según el lugar en el que se encuentre la rotonda, es decir, tener en cuenta factores que solo se presentan en una ubicación en concreto.

CETUR da las siguientes recomendaciones:

- En una rotonda urbana, inicialmente realizar un cálculo antecedente tomando lo dado por el CETE d'AIX y, luego, tras un análisis más contundente de la zona en que se diseña la rotonda, entonces proponer otros valores, principalmente menores que los otros.
- También pueden adoptarse intervalos de aceptación en rotondas ya existentes y que poseen características similares que la que se diseña y/o evalúa su tránsito.

Por otro lado, hay un concepto a tener en consideración, el cual se denomina tráfico molesto. Dicho tráfico molesto proviene de los intervalos que no son aprovechados por los conductores para ingresar a la rotonda, lo cual trae consigo que el vehículo encuentre mayor congestión al tratar de entrar a la calzada anular. Por ello, Harders, en su consideración para intersecciones en general, consideraba un valor de 50% para vehículos que salían de la rotonda como propulsores del tráfico molesto. En cuanto al CETE d'AIX, manejan un valor del 30% para casos de tráfico congestionado (caso desfavorable) y 5% para saturaciones menores a 0.6 (caso favorable).

2.4. Medidas de eficiencia en rotondas

Las medidas de eficiencia son utilizadas, principalmente, para determinar si la aplicación de un modelo es apropiado al momento de realizar el análisis de una rotonda. Tal como se ha mencionado en puntos anteriores, los modelos empíricos están “ajustados” a situaciones del país de origen de planteamiento, por lo que aplicarlos en otro país con distintas condiciones de tráfico y cultura (por

ejemplo, comportamiento de los conductores) requiere una verificación exhaustiva para comprobar la viabilidad del modelo.

Ante lo mencionado, se procede a tomar tres parámetros de eficiencia para la rotonda. Los dos primeros van referidos al tráfico, mientras que el tercero hace referencia a la geometría de la rotonda. Para verificar la confiabilidad de un modelo y su aplicación fuera de su país de origen, los resultados obtenidos por cada modelo serán comparados con los siguientes parámetros: longitudes de cola en rotondas, demoras en rotondas y demoras geométricas en rotondas.

2.4.1. Longitudes de cola en rotondas

Las colas muestran la congestión vehicular en un determinado lugar, debido a que la circulación vehicular no se realiza de manera fluida. Ante esto, analizar las colas y obtener su longitud nos da un mayor panorama del nivel de servicio de la rotonda, el cual es vital para su contribución en la mejora del tráfico en la ciudad. Según FHW (2007), las colas se dan bajo dos escenarios: la demanda supera a la capacidad y la capacidad disminuye por debajo de la demanda. El primer escenario, se aplica para grados de saturación menores a 1 y muestra que la longitud de cola tiende a un valor de equilibrio infinito y para el segundo escenario, la cola tiene un valor igual al observado al inicio del periodo de análisis.

Sin embargo, estas aproximaciones discrepan de las reales ya que las longitudes de colas no pueden ser infinitas ni constantes; por lo que, se corrige dicha discrepancia con la transformada de Whiting mediante las siguientes expresiones:

$$L_t = \frac{1}{2} (\sqrt{U_L^2 + V_L} - U_L) \quad (42)$$

Además:

$$U_L = \frac{(1-x)(Qt)^2 + (1-L_0)Qt - 2(1-c)(L_0 + xQt)}{Qt + (1-c)} \quad (43)$$

$$V_L = \frac{4(L_0 + xQt)[Qt - (1-c)(L_0 + xQt)]}{Qt + (1-c)} \quad (44)$$

Dónde:

L_t : Longitud de cola al final del periodo de análisis (veh)

Q : Capacidad

t : Período en el cual se asumen q y Q constantes

x: Grado de saturación

L_0 : Longitud de cola al inicio del período de análisis

c: Parámetro función del tiempo de servicio

Para tiempo de servicio constante, “c” toma el valor de 0.5 y para tiempo de servicio aleatorio “c” toma el valor de 1. Este último caso es el aplicable en rotondas por lo que las expresiones anteriores se simplificarían, como se muestra a continuación:

$$U_L = (1 - x)Qt + 1 - L_0 \quad (45)$$

$$V_L = 4(L_0 + xQt) \quad (46)$$

2.4.2. Demoras en rotondas

Tal como se mencionó anteriormente, las colas son un punto de referencia para verificar el funcionamiento y eficiencia de las rotondas. Dicho esto, las demoras en rotondas son aquellas provocadas por el conductor debido a las colas generadas para ingresar a la misma.

Para calcular la demora promedio por vehículo, se debe tomar en cuenta las expresiones para intersecciones no semaforizadas (FHW, 2007)

$$d_t = \frac{1}{2}(\sqrt{U_d^2 + V_d} - U_d) \quad (47)$$

$$U_d = \frac{t}{2}(1 - x) - \frac{1}{Q}(L_0 - c + 2) \quad (48)$$

$$V_d = \frac{2}{Q} \left[(1 - x)t + cxt - 2(1 - c) \left(\frac{L_0 + 1}{Q} \right) \right] \quad (49)$$

Dónde:

dt: Demora promedio por vehículo [s] o [h]

Q: Capacidad

t: Período en el cual se asumen q y Q constante

x: Grado de saturación

Lo: Longitud de cola al inicio del período de análisis

c: Parámetro función del tiempo de servicio

2.4.3. Demoras geométricas en rotondas

Como se puede inferir de su nombre, estas demoras son consecuencia de la geometría de la rotonda en análisis; es decir, son generadas únicamente por el diseño geométrico de la rotonda. Esto se asocia a la disminución de velocidad de un vehículo al llegar a la misma sin importar ni vincular esta demora con la hora en la cual se transita por la rotonda.

En referencia a lo planteado por Mc Donald, Kimber y Hounsell (1984), la demora geométrica es la diferencia entre el tiempo de tránsito de un vehículo por una locación sin intersección alguna y el tiempo que demora en transitar la misma locación con la presencia de alguna intersección, tomando puntos en los que se haya empezado el decremento de aceleración y se finalice la aceleración.

A partir de esto, se presentan las expresiones matemáticas que definen a la demora geométrica:

$$Demora\ geométrica = \frac{V_A - JS}{a_{AB}} + \frac{V_D - JS}{a_{CD}} + \frac{d_{BC}}{JS} - \frac{d_1 + d_{AB}}{V_A} - \frac{d_2 + d_{CD}}{V_D} \quad (50)$$

Dónde:

V_A, V_D : Velocidades de entrada y salida, respectivamente, medidas en puntos donde las velocidades no se ven influidas por la glorieta (m/s)

JS: Velocidad dentro de la glorieta (m/s)

a_{AB} : Deceleración a la entrada de la glorieta, y viene dado por:

$$a_{AB} = \frac{1.06(V_A - JS)}{V_A} + 0.23 \quad (51)$$

a_{CD} : Deceleración a la salida de la glorieta, y viene dado por:

$$a_{CD} = \frac{1.11(V_D - JS)}{V_D} + 0.02 \quad (52)$$

d_{BC} : Distancia recorrida dentro de la glorieta (m)

d_1, d_2 : Distancias entre el centro de la glorieta y la entrada y la salida, respectivamente (m)

d_{AB} : Distancia por encima de la cual se produce la deceleración hacia la glorieta, y viene dada por:

$$d_{AB} = \frac{V_A^2 - JS^2}{2a_{AB}} \quad (53)$$

d_{CD} : Distancia por encima de la cual se produce la aceleración desde la glorieta, y viene dada por:

$$d_{CD} = \frac{V_D^2 - JS^2}{2a_{CD}} \quad (54)$$

Para un giro a la izquierda:

$$JS = 0.84(\sqrt{ER} + \sqrt{EXR}) \quad (55)$$

Donde ER, EXR son los radios en la entrada y la salida (m)

Para un movimiento al frente, donde $0.5(ENA + EXA) < 20^\circ$:

$$JS = 0.47Y + 0.035SD - 1.18 \quad (56)$$

Dónde:

ENA: Angulo de entrada ($^\circ$)

EXA: Angulo de salida ($^\circ$)

$$Y = 0.5(V_A + V_D) \quad (57)$$

SD: Distancia de visibilidad

Si no se conoce SD: $JS = 0.40Y + 2.43$

Para un giro a la derecha o movimiento al frente, donde $0.5(ENA + EXA) > 20^\circ$:

$$JS = 0.96\sqrt{D} + 2.03 \quad (58)$$

Dónde D es el diámetro del círculo inscrito de la rotonda (m)

Si el valor calculado de JS es mayor que V_A , entonces $JS = V_A$ y $d_{AB} = 0$.

De forma similar, si JS es mayor que V_D entonces $JS = V_D$ y $d_{CD} = 0$

Si $JS > V_A$ y $JS > V_D$ entonces:

$$JS = 0.5(V_A + V_D) \quad (59)$$

Si la demora calculada es menor que 0, entonces la demora es 0.

2.4.4. Nivel de servicio

El nivel de servicio es un parámetro de eficiencia que se desprende a partir de los mencionados anteriormente como las colas y demoras. Es, precisamente, de estas últimas que se establecen rangos de valores, según las cuales se determina un nivel de servicio para una vía en análisis.

Como punto inicial, es necesario definir a este parámetro de eficiencia. Pues, tomando como referencia lo propuesto por el HCM, “*es el parámetro que precisa cuán bien está funcionando una instalación de transporte o servicio desde la perspectiva de un viajero*”. Un punto a añadir es que, si bien es cierto que, en general, este parámetro depende de las colas y demoras, de una manera directa, tiene relación con el grado de saturación de la intersección (relación volumen – capacidad). Por ello, si el grado de saturación de la vía a analizar es mayor a 1, entonces se puede deducir que el nivel de servicio será malo e, incluso, dispuesto con el nivel más deficiente (valor F).

Según el “Highway capacity manual”, el nivel de servicio depende principalmente de las demoras, por lo que se presenta la siguiente tabla.

Tabla 15. Nivel de servicio según intervalos de demoras

Nivel de servicio	Control de demora promedio (s/veh)
A	0-10
B	> 10-15
C	> 15-25
D	> 25-35
E	> 35-50
F	> 50

Fuente: TRB (2000)

3. CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación tiene naturaleza cuantitativa. Esto se debe a que el planteamiento del problema y sus respectivas preguntas de investigación tratan escenarios específicos, los cuales relacionan la realidad con los modelos empíricos detallados anteriormente. Cabe recalcar que la presente tesis se centra en la obtención de la capacidad de la rotonda Independencia mediante dos de los múltiples modelos descritos en el capítulo anterior; estos modelos empíricos son el alemán y británico. Como se puede apreciar en el capítulo 2, los dos modelos empíricos de análisis consideran dentro de sus ecuaciones de cálculo diferentes parámetros independientes para la obtención de la capacidad de entrada de una rotonda.

Por un lado, el modelo alemán considera dentro sus cálculos exclusivamente el flujo vehicular presente dentro de la rotonda, entiéndase flujo vehicular como la cantidad de vehículos por hora que circulan por la rotonda y por los diferentes ramales que componen la misma. El modelo alemán, se basa, dentro de sus cálculos, de la variable Q_c que hace referencia al tráfico molesto para la obtención de la capacidad de entrada; sin embargo, afecta el cálculo por los parámetros empíricos A y B que dependen únicamente del número de carriles presentes en el anillo de la rotonda y en el ramal de análisis. Estos parámetros se pueden observar en la tabla 5.

Por otro lado, el modelo empírico británico o modelo de Kimber (1980), a diferencia del modelo anterior, incorpora dentro de sus cálculos los parámetros geométricos de la rotonda en análisis. El cálculo de la capacidad de entrada de una rotonda depende de la variable q_c (flujo circundante al ramal) además de los parámetros k , x e y que son, principalmente, reflejo de la geometría de la rotonda. El primer parámetro (k) depende del Angulo de entrada (θ) y el radio de curvatura de entrada (r), el segundo parámetro (x) es función del ancho de la entrada a la rotonda (e), la mitad del ancho de la calzada de aproximación (v) y la longitud efectiva del ensanchamiento de la entrada (l); el tercer parámetro también depende del factor e y del diámetro del círculo inscrito en la rotonda (D).

La forma de cálculo y el significado de todos estos factores geométricos serán explicados con mayor detenimiento más adelante. Cabe mencionar, que las mediciones efectuadas por Kimber otorgan rangos de valores de los parámetros geométricos para rotondas en Inglaterra los cuales se pueden observar en la tabla 6, valores que no se encuentren dentro de estos límites no podrán ser analizados mediante este modelo.

Para determinar si la aplicación de los dos modelos descritos anteriormente es apropiada para el análisis de la rotonda Independencia se utilizan las medidas de eficiencia de la rotonda. Como se ha mencionado en el capítulo 2, dichos modelos empíricos fueron concebidos en el país de origen

de cada uno de ellos, considerando situaciones propias de cada país, por lo que la aplicación de estos en Lima, donde se presenta una cultura vehicular distinta, requiere de una verificación de dichas medidas de eficiencia. Ante lo mencionado, los parámetros de eficiencia a verificar son tres: longitudes de cola en rotondas, demoras en rotondas y demoras geométricas en rotondas. Los dos primeros van referidos al tráfico mientras que el tercero hace referencia a la geometría de la rotonda.

Las longitudes de cola en rotondas y demoras en rotondas, son indicadores claros de una circulación vehicular que no se realiza de manera fluida generando congestión vehicular y retrasos. Dicho esto, el análisis de las colas y su longitud contribuyen al mejoramiento del tráfico en la rotonda. Como se mencionó en el capítulo anterior, Según Cabrera (2018: 5-6), las colas se dan bajo dos posibles escenarios: la demanda supera a la capacidad, aplicado para grados de saturación menores a 1 y con una tendencia del valor de equilibrio de longitud de cola igual a infinito y la capacidad disminuye por debajo de la demanda en el cual la cola tiene un valor igual al observado al inicio del periodo de análisis.

Sin embargo, existe una discrepancia entre lo mencionado anteriormente y la realidad, ya que las longitudes de colas no pueden ser infinitas ni constantes; es por esto, que se realiza una corrección utilizando la transformada de Whiting, la cual depende de los parámetros U_L y V_L y estos, a su vez, son función de las variables capacidad (Q), longitud de cola al inicio del periodo de análisis (L_0), periodo en el cual se asume q y Q constantes (t), grado de saturación (x) y parámetro función del tiempo de servicio (c); siendo este último, para tiempos de servicio aleatorios, como es el caso de rotondas, un valor igual a 1 lo cual simplificará las expresiones U_L y V_L como se puede observar en el capítulo anterior.

En el caso de las demoras en rotondas, estas son provocadas por el conductor debido a las colas que se generan para el ingreso a la misma, el cálculo de la demora promedio por vehículo depende de los parámetros U_d y V_d los cuales a su vez son función de la capacidad (Q), el periodo en el cual se asumen q y Q constantes (t), grado de saturación (x), Longitud de cola al inicio del periodo de análisis (L_0) y parámetro función del tiempo de servicio (c). Con esto se puede observar que dichas variables son las mismas utilizadas para el cálculo de las longitudes de cola en rotondas por lo que, queda claro la relación estrecha que existe entre ambos parámetros de eficiencia como indicador claro de la congestión vehicular presente.

El último parámetro de eficiencia a evaluar son las demoras geométricas en rotondas, las cuales son consecuencia única de la geometría o diseño geométrico de la rotonda en análisis asociado a la disminución de velocidad de un vehículo al llegar a la misma sin importar la hora en la cual se transita por la rotonda. Según Mc Donald, Kimber y Hounsell (1984), esta demora depende de los parámetros velocidad de entrada (V_A), velocidad de salida (V_D), velocidad dentro de la rotonda (J_S)

que depende de hacia donde el vehículo realice el giro (izquierda o derecha), distancia recorrida dentro de la glorieta (d_{BC}), distancia entre el centro de la rotonda y la entrada (d_1), distancia entre el centro de la rotonda y la salida (d_2), deceleración a la entrada de la rotonda (a_{AB}) función de las variables V_A y JS , deceleración a la salida de la rotonda (a_{CD}) dependientes de las variables V_D y JS , distancia por encima de la cual se produce la deceleración hacia la glorieta (d_{AB}) la cual es función de las variables V_A , JS y a_{AB} ; distancia por encima de la cual se produce la aceleración desde la glorieta (d_{CD}) que depende de V_D , JS y a_{CD} .

Una vez entendidas las diferentes variables involucradas en cada uno de los modelos empíricos de análisis, como parte de la investigación, se procede mediante la recolección de datos en campo, específicamente en la rotonda Independencia, los cuales servirán para el cálculo de la capacidad de entrada de la rotonda utilizando los dos modelos, además de las medidas de eficiencia y, con ayuda de estos, se demostrará la veracidad de las hipótesis planteadas.

3.1 Rotonda Independencia

Se realizó un primer acercamiento a la rotonda (zona de estudio) con la finalidad de familiarizarse con la misma y observar el tipo de vehículos presentes en la vía; siendo los vehículos de uso particular los que más transitan dicho óvalo seguido por los de transporte público (combis y buses) y finalmente los vehículos de transporte pesado, generalmente el tránsito de estos son los días sábados y domingos. Además, se observó el sentido de cada uno de los cinco accesos con los que cuenta dicha rotonda, el sentido del flujo vehicular y el número de carriles. Observándose, dos accesos con dos carriles en un sentido y otros dos en el sentido contrario, y tres accesos de dos carriles en un sentido. A continuación, se presentará una imagen tomada de Google Maps en la cual se aprecian los sentidos y número de carriles de los cinco accesos y la respectiva numeración que se tendrá en adelante para referirse a cada uno de estos.



Figura 7. Numeración y sentido de la Rotonda Independencia. Fuente: Adaptado de Google Maps

Como se puede observar en la figura 7, la rotonda está conformada por la Av. José Antonio de Sucre la cual es la avenida principal y cuenta con cuatro carriles, dos de los cuales son de entrada en un sentido y los otros dos de salida en el sentido opuesto en ambos accesos (1 y 4), el Jirón San Martín consta de dos carriles en un solo sentido uno de entrada (3) y otro de salida (5) y el Jirón Arequipa también con dos carriles de salida en un solo sentido (2). Cabe mencionar que la rotonda consta de tres carriles y el sentido de giro de los vehículos es en sentido horario.

Referente a la recolección de datos, es importante entender previamente que tipo de información es la que se va a necesitar y enfocarse en los datos requeridos para reforzar la hipótesis de la investigación. Ante lo mencionado, se creyó conveniente y más práctico realizar un levantamiento topográfico del óvalo mediante la verificación de medidas en campo del plano catastral. Para realizar dicha labor, se tuvo que conseguir el plano catastral de la zona en donde está ubicada la rotonda, luego con ayuda de un medidor laser y una wincha se tomó las medidas correspondientes a anchos de carril, diámetro del óvalo, ancho de veredas, ancho de berma, etc. y toda esta información se contrastó con la otorgada por el plano catastral para actualizar las medidas en el caso que se haya realizado alguna modificación a la fecha. A continuación, se muestran las figuras 8 y 9, en las cuales se toman medidas de la rotonda, tanto de la calzada anular (figura 8, midiendo el ancho del carril) como de la propia rotonda (figura 9, midiendo su diámetro). Asimismo, en la figura 10, con las mediciones realizadas, se muestra el plano de la rotonda en su totalidad dibujado en el programa AutoCAD.



Figura 8. Medición del ancho de carril. Fuente: propia



Figura 9. Medición del diámetro de la pileta. Fuente: propia

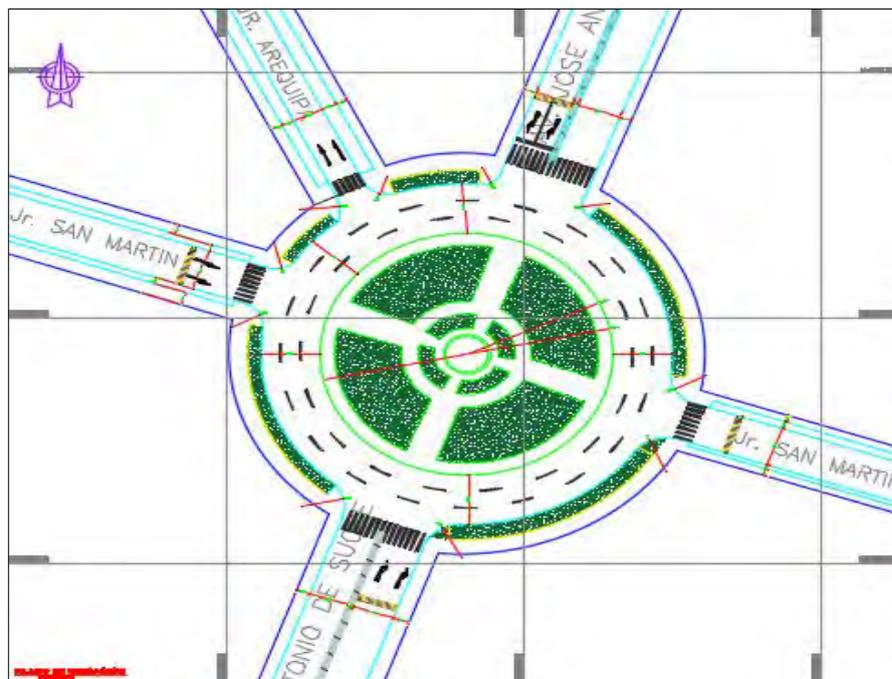


Figura 10. Dibujo en AutoCAD de la Rotonda Independencia. Fuente: propia

3.2 Obtención de parámetros geométricos

Como se pudo observar en el acápite 2.1.2. existen diferentes tipos de rotondas; sin embargo, cada una de estas comparte parámetros geométricos claramente definidos que pueden ser obtenidos haciendo uso de herramientas geométricas. Dicho esto, con ayuda del levantamiento topográfico de la rotonda Independencia y el programa computacional AutoCAD se realizó el dibujo virtual de la rotonda; esto se realizó una vez contrastadas y actualizadas las medidas tomadas en campo, con la finalidad de obtener los parámetros geométricos solicitados para el modelo británico. Cabe mencionar que dichos parámetros deberán ser calculados para cada uno de los accesos que conforman la rotonda. Para esta labor, principalmente, se hará referencia a lo descrito en el documento “Roundabouts: An information Guide” elaborada por la Federal Highway Administration - EUA (2000: 127-170). Los cuales son los siguientes:

3.2.1. Ancho de la entrada a la rotonda (e)

Según la Federal Highway Administration (2000: 147), el ancho de entrada a la rotonda es el mayor determinante de la capacidad de una rotonda, la cual depende del número de carriles que entran a la rotonda y del ancho total de entrada. Lo que genera un crecimiento uniforme de la capacidad de entrada y, por ende, el ancho de entrada. Este parámetro se mide desde el punto donde la línea “ceda el paso” corta el borde izquierdo de la calzada hasta el borde derecho de la misma, a lo largo de una línea perpendicular a la línea de cordón derecho. Dicho de otra manera, es la longitud del segmento perpendicular a la curva de entrada medido a partir del punto de intersección entre la circunferencia

externa que engloba todos los carriles internos presentes en la rotonda con la prolongación interna del carril de acceso a la misma.

Para garantizar la seguridad, los anchos de entrada deben mantenerse en un mínimo, anchos de entrada típicos para entradas de carril simple varían desde 4.3 hasta 4.9 metros; sin embargo, valores más elevados o menores a los mencionados dependerán de la ubicación de la rotonda, vehículo de diseño y requerimientos de velocidad para trayectorias circulares críticas. En la figura 11, se muestra que la cota e es el ancho mencionado, ya que es la distancia perpendicular al giro de los vehículos para la entrada a la rotonda.

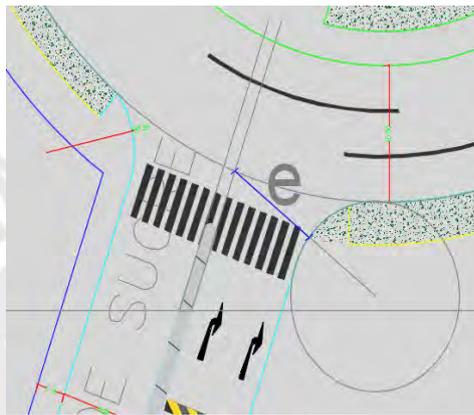


Figura 11. Dibujo en AutoCAD de la obtención del parámetro e . Fuente: propia

3.2.2. Mitad del ancho de la calzada de aproximación (v)

Este parámetro se calcula en metros y corresponde a la longitud del carril de entrada a la rotonda. Tal como se muestra en la figura 12, la distancia v viene a ser la medida de los dos carriles que conforman esta entrada.

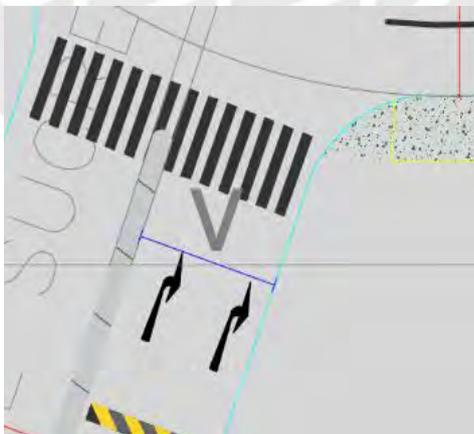


Figura 12. Dibujo en AutoCAD de la obtención del parámetro v . Fuente: propia.

3.2.3. Longitud efectiva del ensanchamiento de la entrada (l)

De acuerdo con la Federal Highway Administration (2000: 147-149), el ensanchamiento es un medio efectivo de incrementar la capacidad. Este parámetro está estrechamente ligado al ancho de entrada de una rotonda (e), cuando los requerimientos solo pueden satisfacerse con el ensanchamiento del ancho de entrada existen dos formas para hacerse. La primera, como se muestra en la figura 13, es agregar un carril corriente arriba de la rotonda, y mantener carriles paralelos a través de la geometría de entrada. La segunda forma, mostrada en la figura 14, es por medio de un ensanchamiento gradual (abocinamiento) a través de la geometría de la entrada.

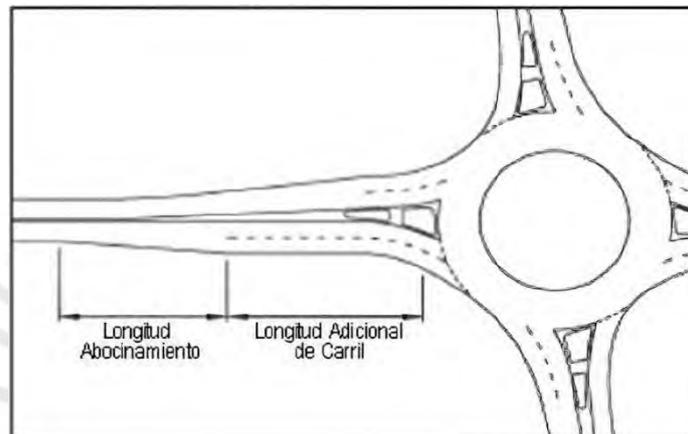


Figura 13. Ensanchamiento mediante la adición de un carril. Fuente: Adaptado de FHWA (2000)

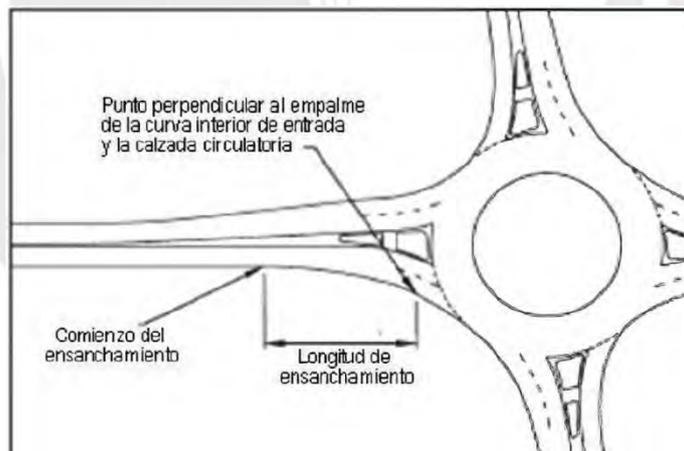


Figura 14. Ensanchamiento mediante el abocinamiento de entrada. Fuente: Adaptado de FHWA (2000)

La forma número dos es la que se estudiará en el presente acápite y el cálculo de esta longitud efectiva de ensanchamiento (abocinamiento) se calcula trazando una paralela de la prolongación interna del carril una distancia igual a v (3.2.2) la cual debe intersecar al ancho de entrada a la rotonda (e) en un punto, luego se calcula el punto medio entre dicho punto y la continuación del carril externo de ingreso a la rotonda, finalmente la longitud efectiva "l" es el valor de la perpendicular trazada desde el punto medio hasta intersecar la paralela trazada inicialmente.

3.2.4. Diámetro del círculo inscrito en la rotonda (D)

El diámetro del círculo inscrito en la rotonda, según la Federal Highway Administration (2000: 149-150), es la distancia a través del círculo inscrito por el borde exterior de la calzada circulatoria. Este diámetro es la suma del diámetro de la isleta central y el doble de la calzada circulatoria, lo cual se puede verificar en la figura 15, tomando en cuenta la cota D mostrada. En otras palabras, se calcula como el diámetro externo de la rotonda, el que engloba todos los carriles. Este debe ser el máximo valor del diámetro que puede ser inscrita en la misma. Dicho parámetro suele calcularse por el método prueba – error es decir el proyectista tiene que experimentar con varios valores de diámetro antes de determinar el óptimo para la rotonda. Los valores mínimos de diámetros dependerán del vehículo de diseño de la rotonda, así como de la categoría de la rotonda. Para rotondas de carril simple, el diámetro mínimo del círculo inscrito debe ser de 30 m para un vehículo WB-15 el cual se detallará más adelante y; para rotondas de carril doble, el valor mínimo es de 45 m. En general, diámetros inscritos mayores serán sinónimo de altas velocidades de circulación mientras que menores diámetros son mejores para la seguridad en general.

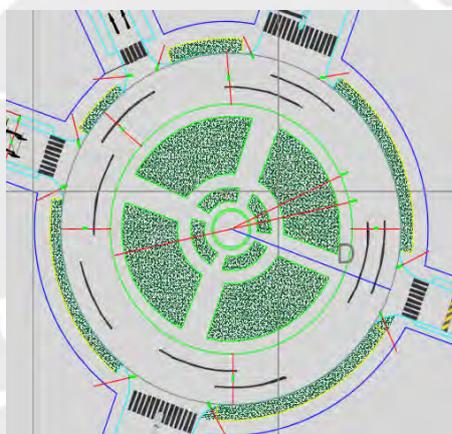


Figura 15. Dibujo en AutoCAD de la obtención del parámetro D. Fuente: propia.

A continuación, se presentará una tabla donde se muestra los rangos recomendados de diámetros de círculo inscrito para varias ubicaciones.

Tabla 16. Rangos recomendados de diámetro de círculo inscrito

Categoría Lugar	Vehículo de diseño Típico	Rango del Diámetro del Círculo Inscrito *
Minirrotonda	Camión Unidad-Simple	13 – 25 m
Urbana Compacta	Camión/Bus Unidad-Simple	25 – 30 m
Urbana Carril-Simple	WB-15	30 – 40 m
Urbana Carril-Doble	WB-15	45 – 55 m
Rural Carril-Simple	WB-20	35 – 40 m
Rural Carril-Doble	WB-20	55 – 60 m

* Supone ángulos de 90 grados entre entradas

Fuente: FHWA (2000)

Se puede observar en la tabla 16 que se utiliza vehículos de diseño típicos, los cuales según Green Book (2001) recopilado por la National Cooperative Highway Research Program por sus siglas en inglés NCHRP (2003) en el Report 505: Review of trucks characteristics as factors in roadway design especifica como vehículos de diseño los siguientes:

Tabla 17. Vehículos de diseño Green Book 2001.

• Single – Unit Truck, SU. (Camión de una sola unidad)
• Intermediate Semitrailer, WB-12 [WB-40] (Semirremolque intermedio)
• Intermediate Semitrailer, WB-15 [WB-50] (Semirremolque intermedio)
• Interstate Semitrailer, WB-19 [WB-62] (Semirremolque estatal)
• Interstate Semitrailer, WB-20 [WB-65 o WB-67] (Semirremolque estatal)
• “Double-Bottom”-Semitrailer/Trailer, WB-20D [WB-67D] (Semirremolque de doble fondo/Remolque)
• Turnpike Double-Semitrailer/Trailer, WB-33D [WB-109D] (Doble Semirremolque de autopista/Remolque)
• Triple-Semitrailer/Trailer, WB-30T [WB-100T] (Triple Semirremolque/Remolque)

Fuente: Adaptado de NCHRP (2003)

Siendo el WB-15 (Semitrailer intermedio) y el WB-20 (Semitrailer Interestatal) los usados en la tabla 9.

3.2.5. Radio de la curva de entrada (r)

Este parámetro se calcula como la longitud del radio de la curva de entrada del acceso a la rotonda. En la figura 16, se muestra el círculo que describe la curva de entrada de los vehículos desde el ramal hasta la rotonda y, por tanto, se identifica la distancia r como la medida de este parámetro.

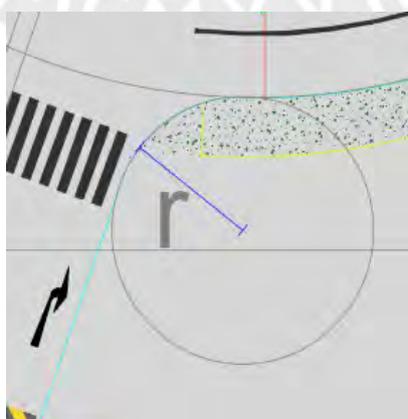


Figura 16. Dibujo en AutoCAD de la obtención del parámetro r. Fuente: propia.

3.2.6. Angulo de entrada (\emptyset)

Según Kimber (1980), para determinar este parámetro se pueden utilizar tres procedimientos diferentes que dependen de la configuración de los elementos que componen a la rotonda. Dos de los cuales son aplicables para rotondas convencionales regulares y el tercer aplicable a rotondas con formas más irregulares; sin embargo, este último procedimiento es el que se aplica en la rotonda en estudio debido a que es más sencillo y entendible. Para el primer y segundo método el ángulo de entrada se calcula hallando el valor del Angulo que forman dos rectas tal como se presenta en la figura 17. La primera corresponde a una línea paralela al borde de la rotonda y la segunda la tangente de la curva paralela a la mediana del carril de entrada equidistante a la curva de entrada a la rotonda y a la mediana. Este parámetro debe ser calculado en grados sexagesimales.

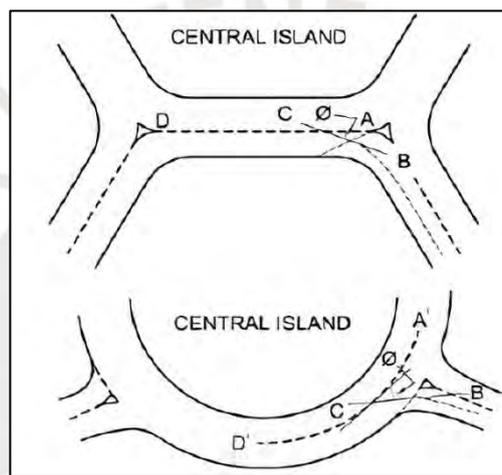


Figura 17. Obtención del parámetro \emptyset procedimientos 1 y 2. Fuente: Kimber (1980)

El tercer método, consiste en hallar el ángulo que forman las líneas tangentes a dos curvas en los puntos de intersección de estas con el borde exterior de la rotonda, las cuales son equidistantes a las medianas y a los bordes exteriores del carril de entrada y el carril contiguo de salida. Una vez se tiene dicho ángulo se lo divide entre dos y se resta de 90° para hallar, finalmente, el ángulo de entrada requerido tal como se puede apreciar en la figura 16 el ángulo $\emptyset = 90^\circ - GLB/2$.

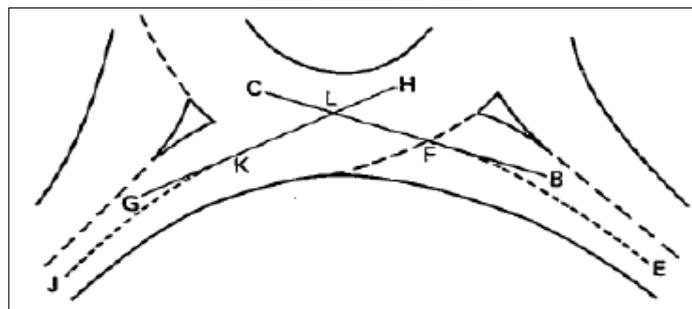


Figura 18. Obtención del parámetro \emptyset procedimiento 3. Fuente: Kimber (1980)

Finalmente, para la visualización de todos los parámetros descritos anteriormente se presenta, en la figura 19, en forma de síntesis.

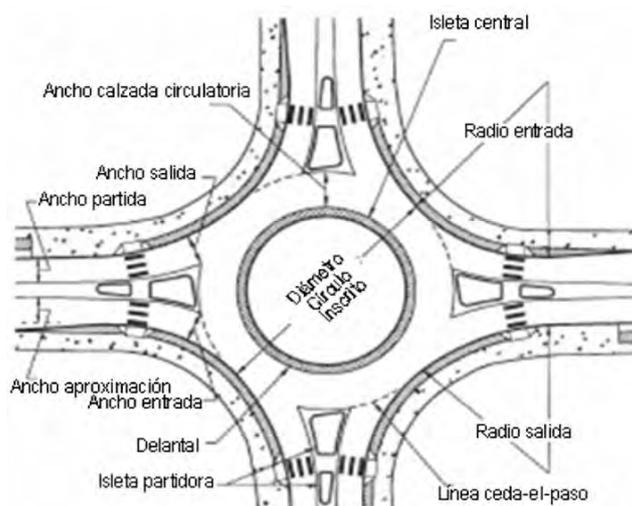


Figura 19. Elementos geométricos de una rotonda. Fuente: Adaptado de FHWA (2000)

Una vez obtenidos todos los parámetros geométricos de la rotonda se procede a hallar los valores de k , x e y detallados en el acápite 2.2.5 para, posteriormente, calcular el valor de la capacidad para el modelo británico con la expresión también descrita en el mismo apartado.

Cabe recalcar que las mediciones efectuadas por Kimber otorgan rangos de valores de los parámetros geométricos para rotondas en Inglaterra. Valores que no se encuentren dentro de estos límites no podrán ser analizados mediante este modelo. La tabla 6 indica dichos rangos.

3.3 Parámetros geométricos de la Rotonda Independencia

Tabla 18. Parámetros geométricos de la Rotonda Independencia

<u>Parámetro</u>	<u>Símbolo</u>	<u>Unidad</u>	<u>Entrada 1</u>	<u>Entrada 3</u>	<u>Entrada 4</u>
Ancho de la entrada a la rotonda	e	m	6.55	8.16	7.80
Mitad del ancho de la calzada de aproximación	v	m	6.51	8.12	7.04
Longitud efectiva del ensanchamiento de la entrada	l	m	7.68	2.49	4.95
Diámetro del círculo inscrito	D	m	34.61	34.61	34.61
Radio de la curva de entrada	r	m	3.40	5.28	6.98
Angulo de entrada	\emptyset	$^{\circ}$	67.5	45	45

Fuente: Propia

Como se indicó en el capítulo anterior, en el acápite 2.2.5 que corresponde al modelo británico, los valores de los parámetros geométricos de una rotonda deben estar dentro de un rango establecido, presente en la tabla 6, para que puedan ser usados por el modelo británico. Al hacer una comparación entre los valores obtenidos en la tabla 18 con los rangos de valores antes mencionados podemos ver que todos los parámetros geométricos están dentro del rango esperado por lo que pueden ser usados para la determinación de la capacidad de la rotonda usando el modelo británico.

3.4 Obtención del flujo vehicular

Se plantearon tres alternativas para la recolección de datos del flujo vehicular presente en el óvalo. La primera, es el conteo de vehículos de manera manual utilizando un contador operado mecánicamente, la segunda opción es obtener los videos de grabación de las cámaras de seguridad ubicadas en la zona y que puedan mostrar de manera clara la tendencia del tráfico en la rotonda y la tercera, es el uso de un dron que sobrevuele la rotonda con el fin de captar imágenes y videos. Siendo la segunda alternativa la opción elegida para la recolección de datos. Se solicitó los videos a la Municipalidad de Magdalena del Mar de una cámara ubicada en una esquina del acceso a la rotonda, esta se encuentra montada a una altura de tres metros aproximadamente lo cual nos permite observar el panorama completo de la rotonda en análisis y facilita la recolección de los datos.

Realizada la elección de la alternativa, es necesario determinar las horas en las que se ejecutará la recolección de datos, por ello, las horas propicias son las llamadas “hora punta”; sin embargo, también es necesario tener la información de una hora en la que la condición de tráfico sea fluida (Cabrera, 2018: 9). Por lo tanto, se solicitó, en total, tres grabaciones de la cámara de video. Con el fin de obtener los datos en hora crítica durante la semana, se tomó una hora durante la mañana del lunes de 7:00 a 8:00 horas y otra hora durante la noche del viernes de 18:00 a 19:00 horas y la última hora de recolección se realizó el miércoles por la tarde de 15:00 a 16:00 horas.

Tales videos nos proporcionan el material suficiente para poder aplicar los modelos empíricos para la determinación de la capacidad de la rotonda Independencia, debido a que nos brinda inputs de los flujos que intervienen en los métodos. Sin embargo, para el modelo británico se requiere obtener parámetros relacionados a la geometría de la rotonda. Para ello, se realizó el levantamiento topográfico de la rotonda antes mencionado y con ayuda de este se obtuvo los parámetros necesarios a partir del plano de la rotonda. A continuación, se muestra una imagen de la rotonda Independencia donde se muestra el flujo vehicular presente.



Figura 20. Foto del flujo vehicular en la rotonda Independencia. Fuente: Propia.

Luego del trabajo de campo realizado, es importante elaborar el análisis de los videos obtenidos por la cámara de seguridad con la finalidad de realizar el conteo de vehículos que conlleve a la obtención de los flujos necesarios para la ejecución de los modelos empíricos. Para luego, realizar los cálculos correspondientes haciendo uso de los modelos planteados en la investigación.

En referencia al modelo alemán, siguiendo las ecuaciones presentadas en el acápite 2.2.4. se requiere los inputs aportados por la cámara de video y el conteo realizado posteriormente. Por otro lado, para el modelo británico, se requiere tanto los inputs del video como los parámetros geométricos brindados por el levantamiento topográfico de la rotonda para utilizar la expresión dada en el acápite 2.2.5. Finalmente, los parámetros de eficiencia se determinaron con los cálculos realizados para cada modelo y las expresiones dadas en los acápites 2.4.1. , 2.4.2. y 2.4.3.

3.5 Cálculo de la capacidad

Se calculará la capacidad de cada uno de los accesos de entrada de la rotonda Independencia haciendo uso de las fórmulas descritas en el capítulo 2 para los modelos empíricos de análisis alemán y británico. Como se mencionó al inicio del presente capítulo, el modelo alemán utiliza parámetros propios del flujo vehicular mientras que el modelo británico aparte de utilizar dichos parámetros considera también, dentro de sus cálculos, los parámetros geométricos. Es por esto, que para la obtención de la capacidad se hará uso del flujo vehicular y los parámetros geométricos obtenidos en campo.

3.5.1 Modelo alemán

Para la obtención de la capacidad de entrada de cada ramal que compone la rotonda Independencia mediante el modelo alemán se utilizará la expresión del apartado 2.2.4.

Dónde Q_e es la capacidad de entrada de cada ramal en veh/h, Q_c proviene del flujo vehicular obtenido en campo en veh/h. Los parámetros A y B serán determinados de acuerdo al número de carriles del anillo y número de carriles de la entrada a evaluar de la tabla 5. Para el caso de los accesos 1 y 4 el parámetro A será 1408.8 y el parámetro B toma el valor de 0.422, para el acceso 3 el valor de A es 1100 y el valor de B es 0.443.

3.5.2 Modelo británico

Para la obtención de la capacidad de entrada de cada ramal que compone la rotonda Independencia mediante el modelo británico se utilizará la expresión presente en el inciso 2.2.5.

Donde Q_e es la capacidad de entrada de cada ramal veh/h, q_c proviene del análisis del flujo vehicular y se nombra flujo circundante a un ramal en veh/hora. Las variables k, x e y se calculan utilizando las expresiones presentes en el mismo apartado.

El valor del Ancho de la entrada a la rotonda (e), mitad del ancho de la calzada de aproximación (v), longitud efectiva del ensanchamiento de la entrada (l), diámetro del círculo inscrito en la rotonda (D) y Angulo de entrada (\emptyset) para cada acceso de entrada a la rotonda se pueden observar en la tabla 18.

3.6 Cálculo de los parámetros de eficiencia

Los parámetros de eficiencia cumplen la función de validar si la aplicación de los modelos alemán y británico son apropiados para el análisis de la rotonda Independencia. Los parámetros que se verifican son tres: longitudes de cola en rotondas, demoras en rotondas y demoras geométricas en rotondas. Para el cálculo de longitudes de cola se emplean las expresiones presentes en el acápite 2.4.1 y se debe tener siempre presente el grado de saturación del ramal de acceso, para la obtención de las demoras se utilizan las expresiones del inciso 2.4.2, tanto las demoras como las longitudes de cola hacen referencia a la verificación del funcionamiento y la eficiencia de la rotonda en estudio. Finalmente, para el cálculo de las demoras geométricas se utilizarán las formulas descritas en el acápite 2.4.3 las cuales hacen referencia a la geometría, propiamente dicha, de la rotonda Independencia.

3.7 Análisis Estadístico

La naturaleza académica del presente trabajo implica tener un respaldo estadístico que indique la confiabilidad de los valores obtenidos en los incisos anteriores. Es por esto, que se utiliza las pruebas estadísticas de “Randomization Test” para determinar la similitud entre las colas medidas en campo y las colas calculadas con cada uno de los modelos; además, se realiza la prueba de coeficiente de determinación (R^2) para determinar la exactitud del ajuste de la regresión lineal obtenida de la gráfica de comparación de los grados de saturación de cada uno de los modelos empíricos de análisis.



4. CAPÍTULO 4: RESULTADOS

Los valores obtenidos a partir de la aplicación de los modelos británico y alemán se ejecutaron conforme a lo indicado en los incisos 3.5.1 y 3.5.2. Tales modelos, en conjunto con el aforo obtenido del conteo vehicular de los videos otorgados por la Municipalidad, dan como resultado la capacidad y demanda de cada ramal de entrada a la rotonda. A la par, se hace uso de las fórmulas 10 y 11, para el modelo alemán, y las fórmulas 12, 13, 14 y 15, para el modelo británico.

4.1. Características del tráfico de la rotonda Independencia

Siguiendo la metodología propuesta en el anterior capítulo, se presentan los resultados obtenidos en la rotonda Independencia bajo la aplicación de los dos modelos. A continuación se muestran los resultados para el modelo alemán.

Tabla 19. Resultados del modelo alemán en rotonda Independencia

Día	Periodo	Ramal de entrada	Demanda (veh/h)	Flujo circulante (veh/h)	Capacidad de entrada (veh/h)	Grado de saturación
LUNES 19/08/2019	8:30 - 8:45	1	1108	124	1356.472	0.82
		3	248	1076	954.728	0.26
		4	608	220	1315.96	0.46
	8:45 - 9:00	1	1320	188	1329.464	0.99
		3	352	1288	865.264	0.41
		4	952	340	1265.32	0.75
	9:00 - 9:15	1	1160	172	1336.216	0.87
		3	356	1120	936.16	0.38
		4	688	316	1275.448	0.54
	9:15 - 9:30	1	904	104	1364.912	0.66
		3	260	868	1042.504	0.25
		4	564	220	1315.96	0.43
MIÉRCOLES 21/08/2019	15:00 - 15:15	1	632	260	1299.08	0.49
		3	208	596	1157.288	0.18
		4	684	212	1319.336	0.52
	15:15 - 15:30	1	664	252	1302.456	0.51
		3	212	632	1142.096	0.19
		4	708	212	1319.336	0.54
	15:30 - 15:45	1	608	312	1277.136	0.48
		3	248	576	1165.728	0.21
		4	748	228	1312.584	0.57
	15:45 - 16:00	1	660	248	1304.144	0.51
		3	252	636	1140.408	0.22
		4	680	224	1314.272	0.52

Continuación de la tabla 19:

VIERNES 23/08/2019	18:30 - 18:45	1	600	316	1275.45	0.47
		3	224	568	1169.1	0.19
		4	788	220	1315.96	0.6
	18:45 - 19:00	1	856	300	1282.2	0.67
		3	300	828	1059.38	0.28
		4	764	328	1270.38	0.6
	19:00 - 19:15	1	884	344	1263.632	0.7
		3	420	852	1049.256	0.4
		4	844	316	1275.448	0.66
	19:15 - 19:30	1	820	272	1294.016	0.63
		3	312	780	1079.64	0.29
		4	692	312	1277.136	0.54

Fuente: Propia

Tal como se observa, los grados de saturación que se obtienen en los ramales varían según el día y el horario. En cuanto al ramal 1, se obtiene un intervalo entre 0.47 a 0.99, lo cual nos muestra que, según el modelo alemán, posee un intervalo de valores que lo clasifican como una vía de buena transitabilidad por algunos periodos de tiempo y, por otros momentos, es un ramal cercano a la saturación hasta llegar al punto de la saturación total; sin embargo, es necesario tener en cuenta los parámetros de eficiencia para poder contrastar los resultados con lo observado en campo.

El ramal 4 tiene valores de menor grado de saturación en comparación con el ramal 1, pese a que los dos ramales pertenecen a la Av. José Antonio de Sucre, por lo que una explicación a ello es que el ramal 1 es alimentado por una avenida principal como lo es la Av. La Marina. Además, las mayores diferencias se pueden observar los lunes por la mañana, debido a que la congestión de vehículos a tal hora se da por el inicio de la semana laboral y el ramal 1, a diferencia del ramal 4, dirige el tránsito hacia distritos con mayor afluencia comercial y empresarial tal como San Isidro y Miraflores, mientras que el ramal 4 dirige el tránsito a distritos como Pueblo Libre y San Miguel que no son caracterizados por ser puntos empresariales.

Por último, el ramal 3 posee los valores más bajos de saturación, ya que es un jirón anexo a la rotonda y no pertenece a la vía principal que compone a la misma. Este ramal cuenta con valores de saturación entre 0.18 y 0.41 dando muestras que posee un transitabilidad bastante buena. Pese a esto, los parámetros de eficiencia (colas, en este caso) son los puntos que determinan la aplicabilidad del modelo en la realidad peruana y, por tanto, su cercanía a lo observado.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por el modelo británico. Cabe resaltar que, en este modelo, se consideran los parámetros geométricos de la rotonda lo que da una idea de mayor exactitud con la realidad a comparación del modelo anterior.

Tabla 20. Resultados del modelo británico en rotonda Independencia

Día	Periodo	Ramal de entrada	Demanda (veh/h)	Flujo circulante (veh/h)	Capacidad de entrada (veh/h)	Grado de saturación
LUNES 19/08/2019	8:30 - 8:45	1	1108	124	1195	0.93
		3	248	1076	1299.38	0.19
		4	608	220	1821.78	0.33
	8:45 - 9:00	1	1320	188	1203.47	1.1
		3	352	1288	1209.21	0.29
		4	952	340	1535.9	0.62
	9:00 - 9:15	1	1160	172	1210.84	0.96
		3	356	1120	1320.55	0.27
		4	688	316	1550.15	0.44
	9:15 - 9:30	1	904	104	1242.15	0.73
		3	260	868	1487.56	0.17
		4	564	220	1607.17	0.35
MIÉRCOLES 21/08/2019	15:00 - 15:15	1	632	260	1134.32	0.56
		3	208	596	1613.14	0.13
		4	684	212	1827.07	0.37
	15:15 - 15:30	1	664	252	1174.01	0.57
		3	212	632	1643.97	0.13
		4	708	212	1611.92	0.44
	15:30 - 15:45	1	608	312	1146.39	0.53
		3	248	576	1681.08	0.15
		4	748	228	1602.42	0.47
	15:45 - 16:00	1	660	248	1175.85	0.56
		3	252	636	1641.32	0.15
		4	680	224	1604.79	0.42
VIERNES 23/08/2019	18:30 - 18:45	1	600	316	1109.33	0.54
		3	224	568	1631.44	0.14
		4	788	220	1821.78	0.43
	18:45 - 19:00	1	856	300	1151.91	0.74
		3	300	828	1514.07	0.2
		4	764	328	1543.02	0.5
	19:00 - 19:15	1	884	344	1131.66	0.78
		3	420	852	1498.16	0.28
		4	844	316	1550.15	0.54
	19:15 - 19:30	1	820	272	1164.8	0.7
		3	312	780	1545.88	0.2
		4	692	312	1552.53	0.45

Fuente: Propia

En este caso, los resultados son semejantes a los obtenidos por el modelo alemán; sin embargo, podemos observar grados de saturación mayores. Esto, se puede resaltar en el caso del ramal 1 ya que posee valores de hasta 1.10 de grado de saturación. Este resultado, al igual que el caso del modelo alemán, presenta a un ramal con problemas de saturación de tránsito. En tal sentido, es necesario mencionar que, para el caso del ramal 4, los valores disminuyen, lo cual se puede interpretar que la geometría de tal ramal permite una mayor y mejor circulación. En referencia al ramal 3, se mantienen valores bastante parecidos a los obtenidos con el modelo alemán.

Como se mencionó en párrafos anteriores, los parámetros de eficiencia son los puntos más importantes para definir a la rotonda bajo los dos modelos propuestos. Dichos parámetros son calculados a partir de los resultados obtenidos por cada modelo en cada uno de los ramales de acceso a la rotonda, es decir, para definir cada uno de ellos, se requiere de la capacidad y grado de saturación. Cabe mencionar, que al analizar las colas en rotondas se debe tener en cuenta algunas consideraciones ya que se trata de una intersección no semaforizada con características particulares.

Estas consideraciones se reflejan en las ecuaciones 45 y 46 las cuales son derivadas de las ecuaciones principales 43 y 44; sin embargo, se tomó en cuenta que la longitud de la cola inicial (L_o) sea igual a 0, ya que, al iniciar cada medición en los tres casos analizados, las condiciones de tráfico eran menores, por lo que se llegó a tal consideración. A partir de ello, la ecuación 42 nos indica el valor final de este parámetro de eficiencia.

Con respecto a las demoras, se mantienen las mismas consideraciones que para colas, por lo que se utilizan las ecuaciones 47, 48 y 49 teniendo valores de c igual a 1 y L_o igual a 0. Por lo mencionado, se determinaron los siguientes resultados de parámetros de eficiencia. A continuación, se muestra lo obtenido en referencia a colas calculadas, teniendo en cuenta las colas medidas en campo.

Tabla 21. Resultados de colas

Día	Periodo	Ramal de entrada	Cola calculada Modelo Alemán (veh)	Cola calculada Modelo Británico (veh)	Cola medida en campo (veh)
LUNES 19/08/2019	8:30 - 8:45	1	4	9	32
		3	0	0	0
		4	1	0	2
	8:45 - 9:00	1	16	38	52
		3	1	0	0
		4	3	2	5
	9:00 - 9:15	1	6	12	25
		3	1	0	0
		4	1	1	3
	9:15 9:30	1	2	3	15
		3	0	0	0
		4	1	1	3
MIÉRCOLES 21/08/2019	15:00 - 15:15	1	1	1	2
		3	0	0	0
		4	1	1	1
	15:15 - 15:30	1	1	1	2
		3	0	0	0
		4	1	1	2
	15:30 - 15:45	1	1	1	2
		3	0	0	0
		4	1	1	1
	15:45 - 16:00	1	1	1	1
		3	0	0	0
		4	1	1	1
VIERNES 23/08/2019	18:30 - 18:45	1	1	1	4
		3	0	0	0
		4	1	1	3
	18:45 - 19:00	1	2	3	15
		3	0	0	0
		4	1	1	3
	19:00 - 19:15	1	2	3	8
		3	1	0	0
		4	2	1	5
	19:15 - 19:30	1	2	2	8
		3	0	0	0
		4	1	1	3

Fuente: Propia

En la tabla 21, se muestra el parámetro de eficiencia de mayor consideración para el análisis de tráfico de cada ramal de la rotonda, las colas. Tal como se pueden observar, gran parte de las colas se encuentran en el rango de valores entre cero y tres, lo cual se interpreta como valores aceptables para el tráfico de la rotonda; sin embargo, como era de esperarse, a partir de lo mostrado en los resultados de grados de saturación, hay ciertos resultados de colas que reflejan una condición de tráfico deficiente.

En referencia al ramal 1, es donde se generan los mayores valores tanto de colas calculadas como de colas medidas en campo ya sea para el modelo alemán como para el británico. No obstante, en este ramal, se presentan mayores deficiencias en la relación entre la cola calculada con la cola medida generando resultados de una cola medida por ocho veces el valor de la cola obtenida a través del modelo alemán y cinco veces para el modelo británico.

En referencia al ramal 4, el mayor valor de cola medida que se obtiene es de cinco, mientras que el mayor valor de cola calculada para el modelo alemán y británico es tres. A partir de ello, se verifica que la paridad entre cola medida y calculada tiene mayor correspondencia. Lo descrito se fundamenta en que el presente ramal presenta un grado de saturación no tan alto en todos los periodos analizados, por lo que los modelos empíricos y las fórmulas obtenidas a partir de una regresión lineal son más precisos en estos casos, sin embargo, esto será explicado con mayor detalle en líneas posteriores.

Siguiendo la tendencia del ramal anterior, el ramal 3 muestra una correspondencia que roza la exactitud total entre las colas calculadas y las colas medidas. Esto se debe a que este ramal presenta los menores grados de saturación de la rotonda, por lo que los valores de las colas rondan entre 0 y 1 en todos los periodos de análisis.

Ante lo mencionado, se verifican las relaciones, de manera gráfica, entre las colas calculadas por los dos modelos y las colas medidas en campo para determinar si hay una correspondencia y, por tanto, una relación lineal (o cercana) entre los tres resultados por cada periodo de 15 minutos para cada día analizado.

A continuación, se muestran tres gráficos por día de análisis. El primero muestra una comparación entre las colas obtenidas a través del modelo alemán y las colas medidas. El segundo, presenta el contraste entre las colas calculadas por medio del modelo británico y las colas medidas. Finalmente, se procede a mostrar la relación entre las colas obtenidas por ambos modelos. Se muestra el día lunes 19 de agosto del 2019.

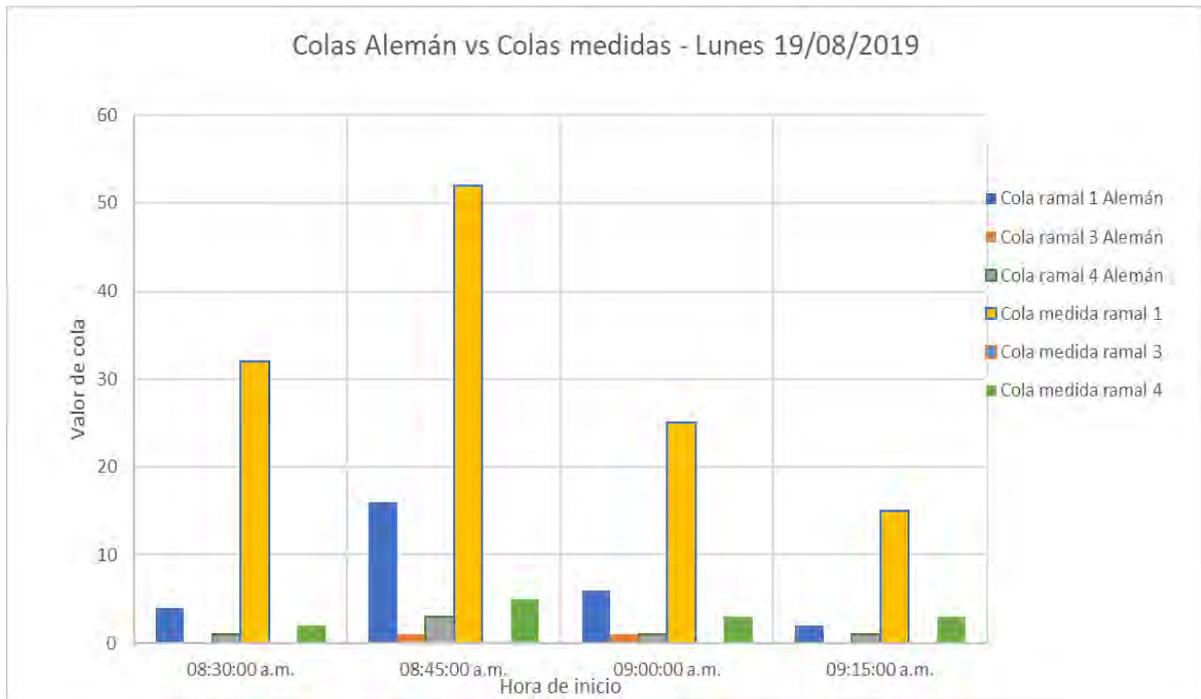


Figura 21. Colas británico - Colas medidas – Lunes 19/08/2019. Fuente: propia.

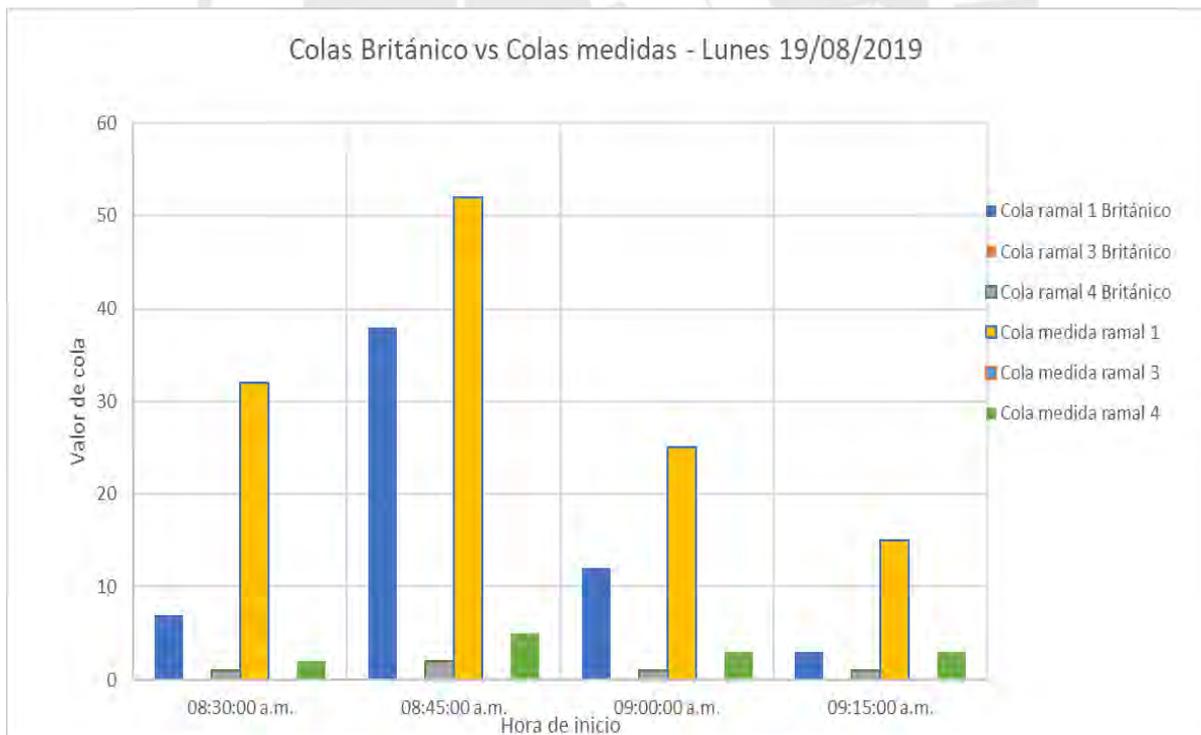


Figura 22. Colas alemán - Colas medidas – Lunes 19/08/2019. Fuente: propia.

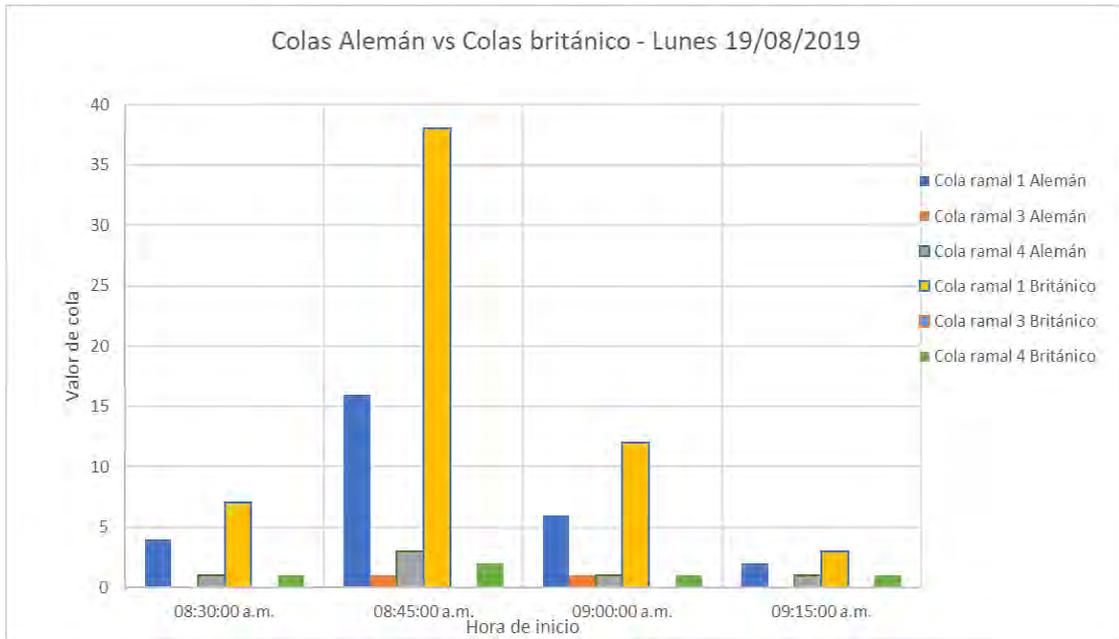


Figura 23. Colas alemán – Colas británico – Lunes 19/08/2019. Fuente: propia.

Tal como se observa en las figuras 21, 22 y 23, las colas presentan tendencias parecidas para cada ramal según el ramal que se analice; sin embargo, el modelo británico es el que presenta valores mayores colas para el ramal 1, mientras que, para los ramales 3 y 4, el modelo alemán es el que presenta mayores valores de cola. Se puede añadir que las colas medidas, en sus mayores valores, tiene mayor dispersión de las colas calculadas por ambos modelos, mientras que, para valores pequeños, presenta mayor cercanía a lo hallado por los modelos. Ahora, se analiza el día miércoles 21 de Agosto del 2019.

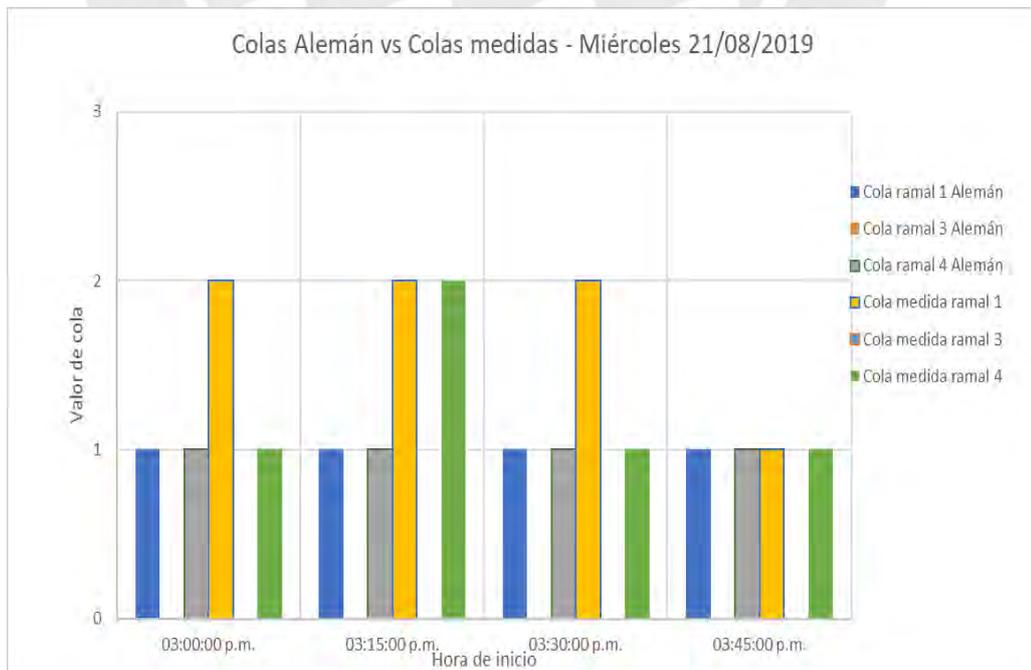


Figura 24. Colas alemán – Colas medida – Miércoles 21/08/2019. Fuente: propia.

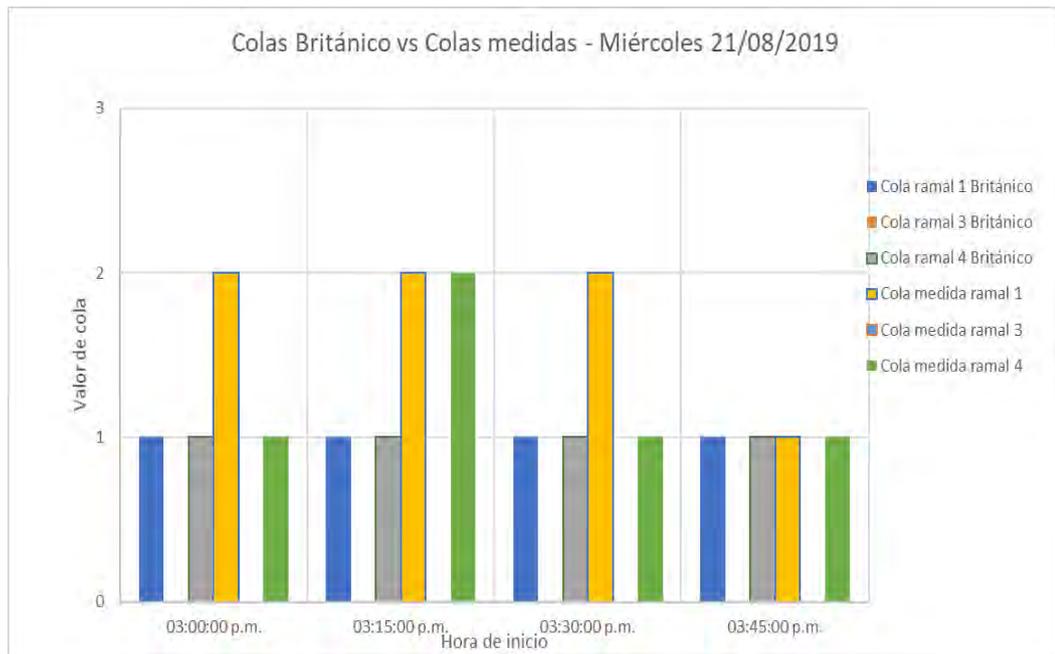


Figura 25. Colas británico – Colas medida – Miércoles 21/08/2019. Fuente: propia.

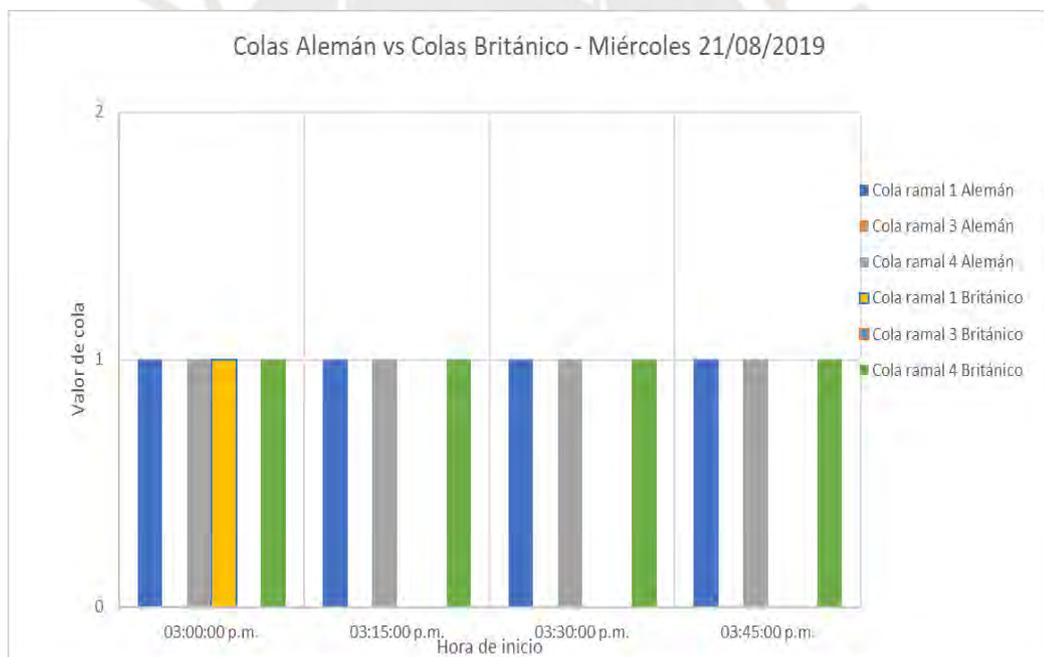


Figura 26. Colas alemán – Colas británico – Miércoles 21/08/2019. Fuente: propia.

Observando las figuras 24, 25 y 26, se verifica que, en este día, no se presenta mayor congestión vehicular a la hora estudiada, por lo cual los valores de colas que se obtienen a través de ambos modelos son pequeños y bastante cercanos a los valores medidos. Esto se debe a que este día sirve de hora valle en análisis, lo cual nos da una idea más amplia de la rotonda en situaciones de baja demanda y esto se puede verificar en las colas que se observan en este punto. Finalmente, se analiza el día viernes 23 de Agosto del 2019.

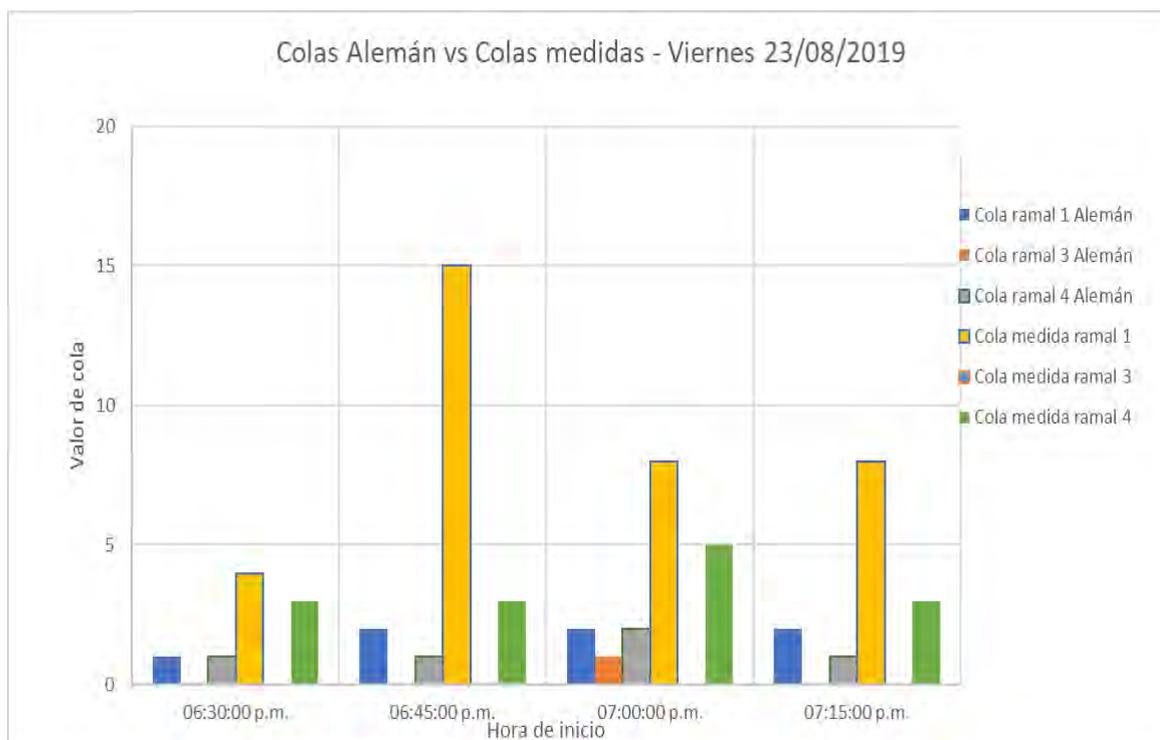


Figura 27. Colas alemán – Colas medidas – Viernes 23/08/2019. Fuente: propia.

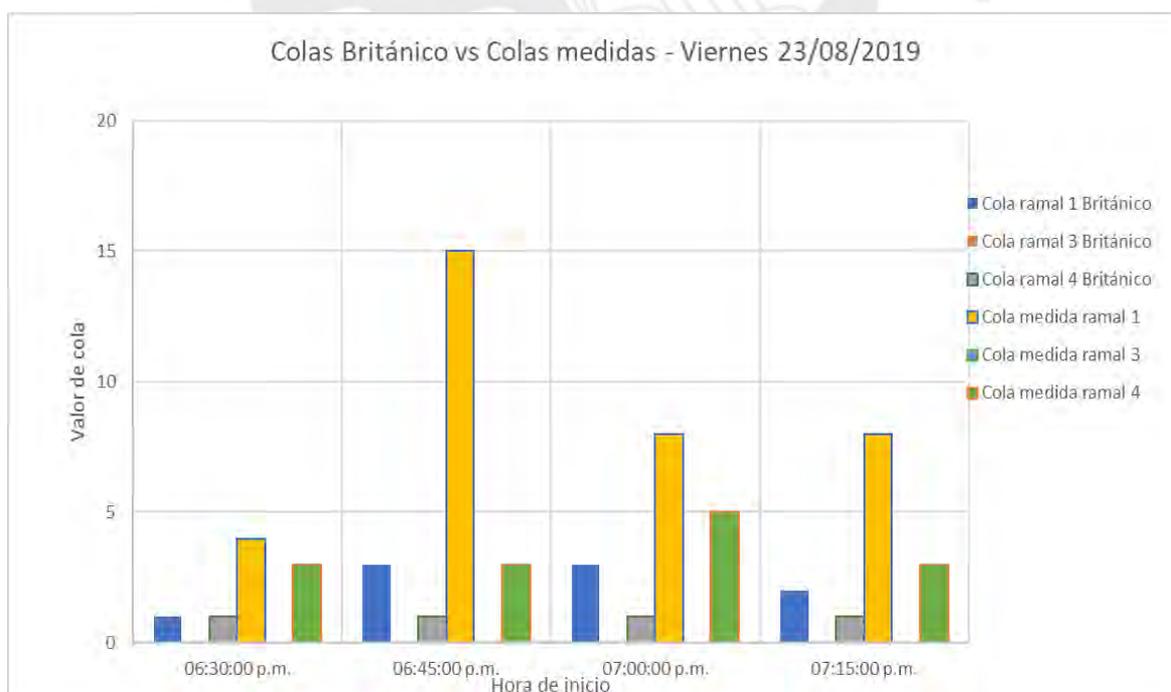


Figura 28. Colas británico – Colas medidas – Viernes 23/08/2019. Fuente: propia.

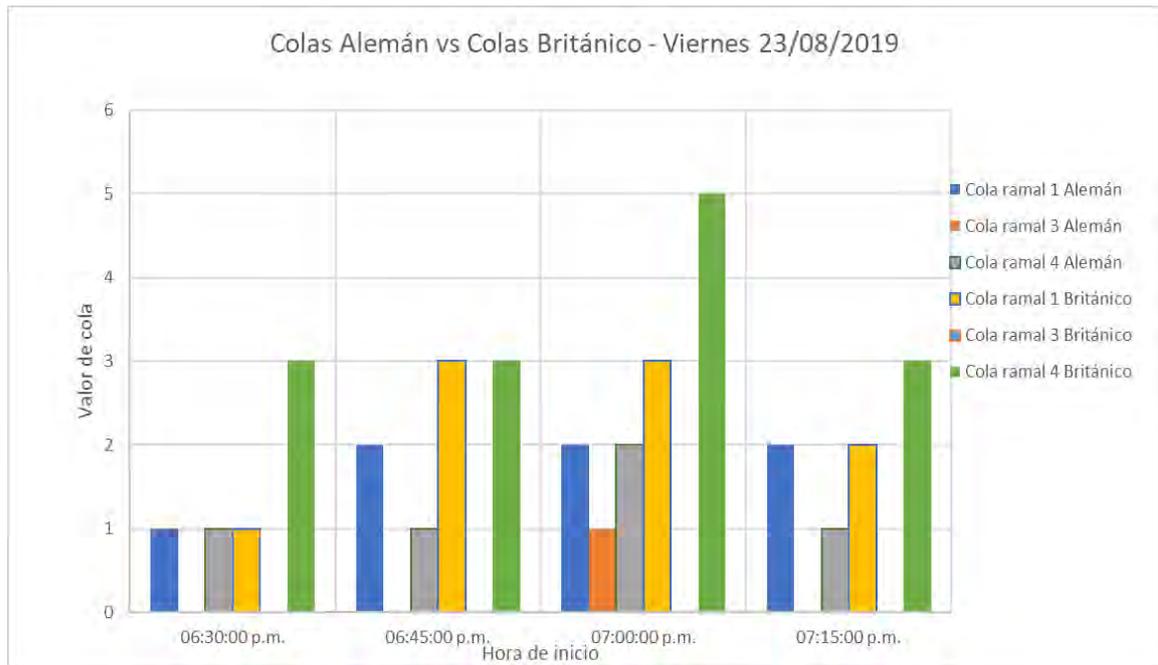


Figura 29. Colas alemán - Colas británico – Viernes 23/08/2019. Fuente: propia.

En las figuras 27, 28 y 29, se llega a determinar que, al igual que se analizó para el día lunes, los mayores valores en general se obtienen mediante el modelo británico; sin embargo, para ramales que presentan colas pequeñas, el modelo alemán muestra valores mayores que el modelo británico. Entonces, se procede a verificar las relaciones que se presentan de los valores de cola, según el grado de saturación, y los valores de cola obtenida por cada modelo relacionado directamente con las colas medidas en campo.

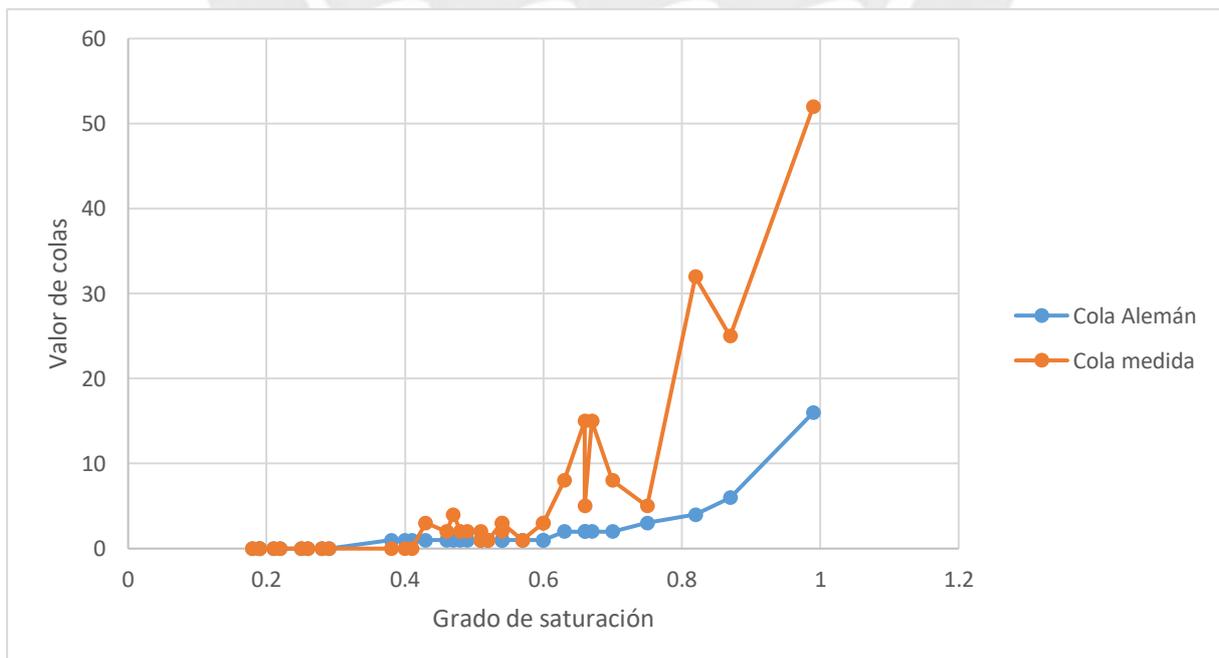


Figura 30. Colas vs Grado de saturación para el modelo alemán. Fuente: propia.

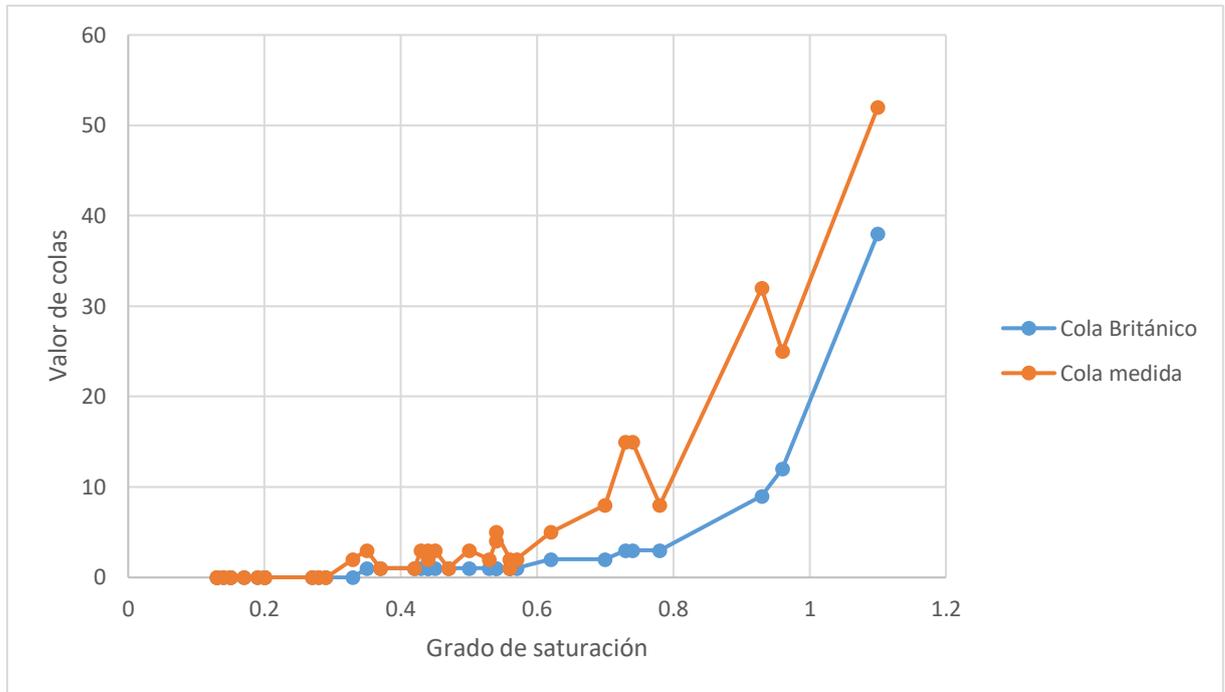


Figura 31. Colas vs Grado de saturación para el modelo británico. Fuente: propia.

De las figuras 30 y 31, se corrobora que, para valores de grado de saturación bajos, el modelo Alemán se asemeja con mayor precisión a los valores medidos en campo. No obstante, el modelo Británico tiene mayor precisión en una escala bastante considerable que el otro modelo para grados de saturación mayores a 0.6. Esto se traduce en que el modelo británico, al considerar parámetros de geometría de la rotonda, muestra un modelo más cercano a la realidad, ya que se le añade factores de análisis en comparación al modelo alemán. Adicionalmente, la diferencia se genera en grados de saturación altos, debido a que en estos casos la geometría de la rotonda presenta mayor injerencia en el análisis de tráfico en contraste a grados de saturación bajos.

Es importante mencionar que se debe tener en cuenta que las colas medidas son determinadas por medio de herramientas confiables (grabaciones) que permiten una medición precisa y con un intervalo de tiempo bastante amplio para la observación.

Las colas son parámetros de eficiencia, tal como se ha ido mencionando a lo largo del presente trabajo, que determinan una relación entre lo que propone cada modelo y lo que sucede en realidad. No obstante, no son los únicos indicadores de la calidad de los modelos y de la transitabilidad de la rotonda, también se presentan las demoras y niveles de servicio. Dichos parámetros, pese a ser una consecuencia de las colas, entregan una visión más amplia, incluso clasificando a la rotonda ante las situaciones de tráfico que se presenten en ella en los días y horarios en análisis. Se debe tener en cuenta, que tales parámetros se determinan para cada ramal según los resultados de cálculo de capacidad que se determinaron con los modelos británico y alemán, respectivamente.

Tabla 22. Resultados de demoras y niveles de servicio

Día	Periodo	Ramal de entrada	Demoras Modelo Alemán (s/veh)	Nivel de servicio Modelo Alemán	Demoras Modelo Británico (s/veh)	Nivel de servicio Modelo Británico
LUNES 19/08/2019	8:30 - 8:45	1	13.065	B	25.235	D
		3	5.076	A	3.414	A
		4	5.019	A	2.940	A
	8:45 - 9:00	1	34.023	D	67.835	F
		3	6.978	A	4.177	A
		4	10.643	B	6.038	A
	9:00 - 9:15	1	16.717	C	29.828	D
		3	6.152	A	3.723	A
		4	6.042	A	4.118	A
	9:15 9:30	1	7.518	A	10.131	B
		3	4.589	A	2.912	A
		4	4.762	A	3.432	A
MIÉRCOLES 21/08/2019	15:00 - 15:15	1	5.373	A	7.074	A
		3	3.787	A	2.563	A
		4	5.610	A	3.115	A
	15:15 - 15:30	1	5.570	A	6.989	A
		3	3.884	A	2.515	A
		4	5.844	A	3.961	A
	15:30 - 15:45	1	5.362	A	6.575	A
		3	3.900	A	2.517	A
		4	6.264	A	4.204	A
	15:45 - 16:00	1	5.563	A	6.828	A
		3	4.037	A	2.578	A
		4	5.631	A	3.844	A
VIERNES 23/08/2019	18:30 - 18:45	1	5.271	A	6.931	A
		3	3.794	A	2.563	A
		4	6.692	A	3.447	A
	18:45 - 19:00	1	8.209	A	11.241	B
		3	4.701	A	2.967	A
		4	6.927	A	4.619	A
	19:00 - 19:15	1	9.078	A	13.138	B
		3	5.671	A	3.328	A
		4	8.028	A	4.984	A
	19:15 - 19:30	1	7.320	A	9.813	A
		3	4.677	A	2.906	A
		4	6.034	A	4.184	A

Fuente: Propia

Finalmente, en la tabla 22, se plasman los valores de demoras y nivel de servicio que se obtiene para cada periodo estudiado de cada día escogido en cada ramal que compone la rotonda. Tal como se iba postulando desde el cálculo de las colas, el ramal 1 el día lunes presenta niveles de servicio bastante bajos como D y F por un periodo cada uno. Pese a ello, la rotonda presenta, en sus ramales, niveles de servicio buenos y adecuados (A y B) para la transitabilidad en ella.

En cuanto a las demoras, precisamente, cuando se presentan bajos niveles de servicio y valores de colas altos, es donde se presentan sus valores más altos, ya que, al ser un parámetro de eficiencia, va de la mano del resto de parámetros tales como las colas. Por tanto, el rango de demoras que se presentan son 2.5 y 25.2 segundos, lo cual se traduce en un amplio intervalo, pero que, principalmente, se compone de valores entre 2.5 y 6 segundos.

4. 2. Coeficiente de Determinación (R^2)

Resulta importante realizar una comparación estadística entre los modelos que se han estudiado a lo largo del presente trabajo. Por ello, resulta necesario recordar que el cálculo de la capacidad de la rotonda en estudio se obtuvo de la aplicación de ambos modelos para los ramales de entrada en los horarios escogidos.

Se procede a realizar un análisis comparativo del parámetro que se obtiene a partir de la capacidad determinada por cada modelo. Dicho parámetro referido es el grado de saturación de los ramales. Por lo tanto, se genera una relación gráfica entre los grados obtenidos por los modelos ajustando a una línea de tendencia para su relación, con el fin de tener una visión más cercana al campo estadístico.

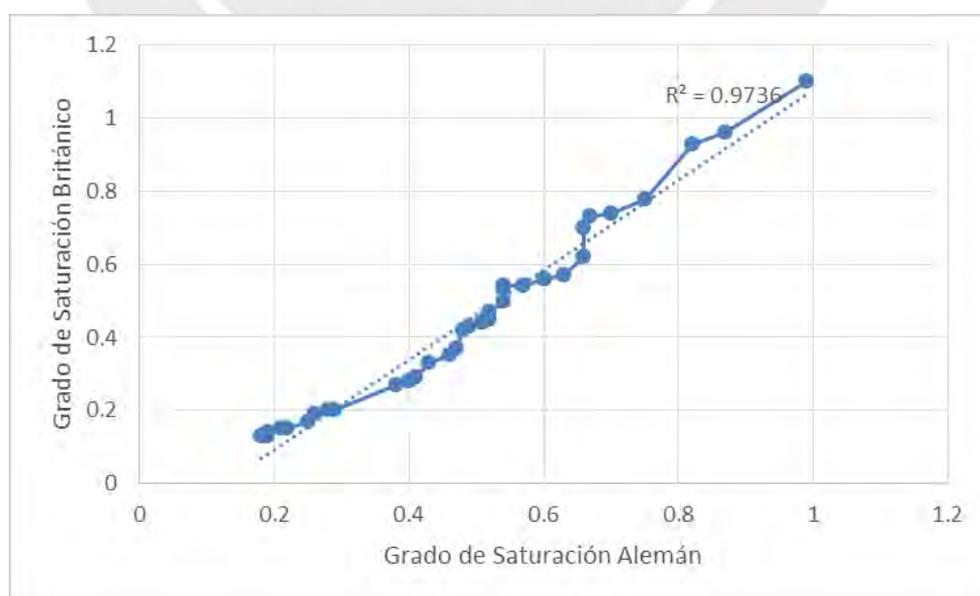


Figura 32. Grado de saturación alemán vs británico. Fuente: propia.

De la figura 32, se verifican tres puntos en preciso. El primero refiere a que, ya mencionado en puntos anteriores, los grados de saturación obtenida por medio del modelo alemán son mayores al británico para grados menores a 0.6, es decir, considerados de bajo tránsito. El segundo es complemento del primero, sin embargo, distinto, ya que, en cuanto a grados de saturación mayores y, por tanto, de tránsito alto son mayores para los obtenidos a partir del modelo británico en comparación al alemán. El tercer punto refiere precisamente a la relación entre ambos modelos, lo cual podemos constatar a partir de la línea de tendencia generada y el valor del R cuadrado, el cual es bastante cercano a 1, lo cual nos da, como consecuencia, que los valores obtenidos por los modelos son bastante similares y difieren en cantidades cercanas a lo despreciable, por lo que, siguiendo el parámetro de grado de saturación, se considera que usando el modelo alemán y el modelo británico, se pueden desprender resultados iguales o cerca de ello.

4. 3. Randomization Test

La determinación de la similitud entre las colas medidas en campo y las colas calculadas nos ayuda a apreciar el comportamiento estadístico de las variables inmersas en el estudio. Las pruebas de aleatorización pueden ser consideradas como una forma de examinar los datos, cabe mencionar que las pruebas de aleatorización son muy diferentes a las pruebas paramétricas debido a que en estas no se estiman parámetros y no hay requisitos de que se tengan muestras aleatorias de una o más poblaciones.

Para determinar la similitud de las colas se utiliza la prueba de variables no paramétricas denominada “Randomization Test” realizada con la ayuda de la página web Statkey, en la cual se simulan los diferentes eventos estadísticos y se comprueba su rareza estadística. Para ello, se plantea una hipótesis nula y una hipótesis alternativa; la primera se define como la igualdad de medias de colas y la segunda como la diferencia de las mismas.

$$H_n \rightarrow \mu_1 = \mu_2$$

$$H_a \rightarrow \mu_1 \neq \mu_2$$

Donde:

H_n : Hipótesis Nula

H_a : Hipótesis Alternativa

μ_1 : Media de colas medidas en campo

μ_2 : Media de colas calculadas

Este procedimiento nos indica con un 95% de nivel de confianza la igualdad de las medias. La prueba de “Randomization Test” otorga un intervalo de confianza, mediante el cual podemos confirmar la igualdad o no de dichos valores; es decir, si la diferencia de medias de las muestras originales está dentro del intervalo de confianza podemos confirmar que la igualdad es correcta; si no lo está, dicha igualdad no se cumple. Se debe tener en cuenta que se realizan dos pruebas por separado, una para el modelo alemán y otra para el modelo británico debido a que ambos modelos tienen diferentes valores de colas calculadas y esta es una variable que modifica los valores del test.

4.3.1 Test para modelo alemán

Se muestran los resultados de la prueba “Randomization Test” para el caso del modelo empírico alemán.

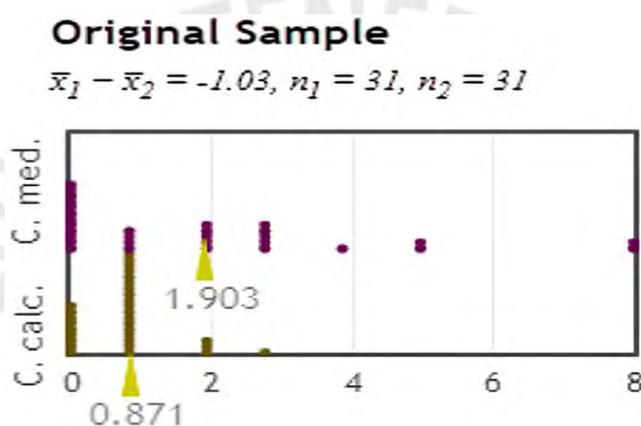


Figura 33. Muestra original de datos para el modelo alemán. Fuente: Adaptado de Statkey.

De la figura 33 podemos observar que la diferencia de medias para el modelo alemán es -1.03, esta diferencia se logra de la resta del promedio de los 31 valores de colas medidas en campo con el promedio de los 31 valores de colas calculadas. Ahora, veamos si esta diferencia se encuentra dentro del intervalo de confianza generado por la prueba, dicho intervalo se genera realizando 10,000 pares de muestras aleatorias partiendo de los valores de las muestras originales.

Randomization Dotplot of $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$, Null hypothesis: $\mu_1 = \mu_2$

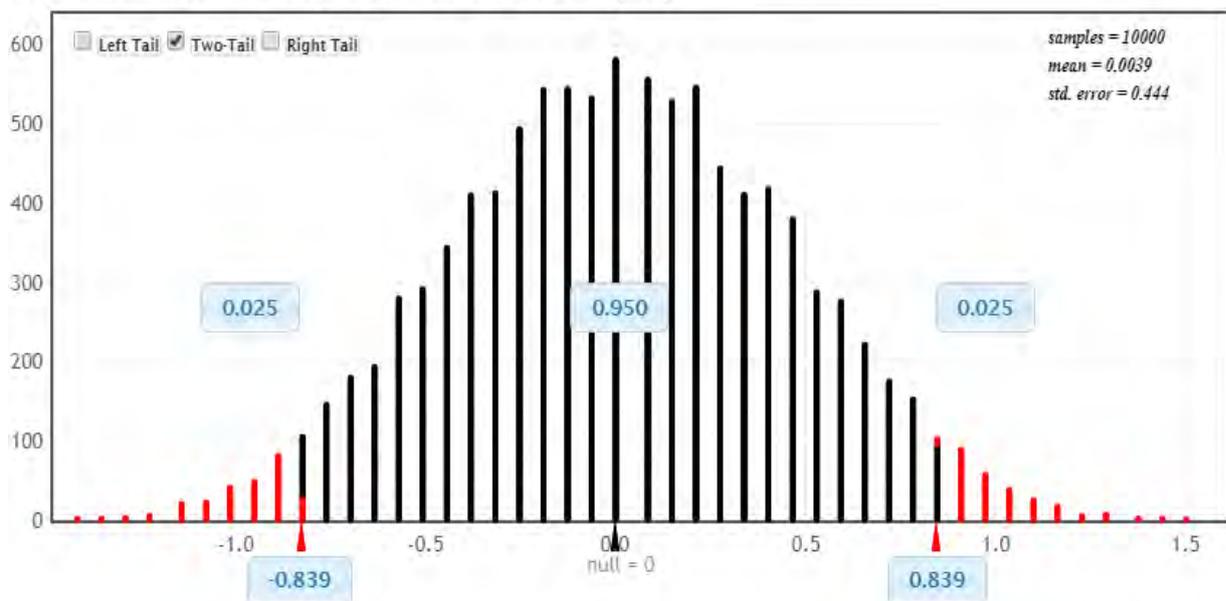


Figura 34. Grupo de 10,000 pares de muestras aleatorias para el modelo alemán. Fuente: Adaptado de Statkey.

Randomization Dotplot of $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$, Null hypothesis: $\mu_1 = \mu_2$

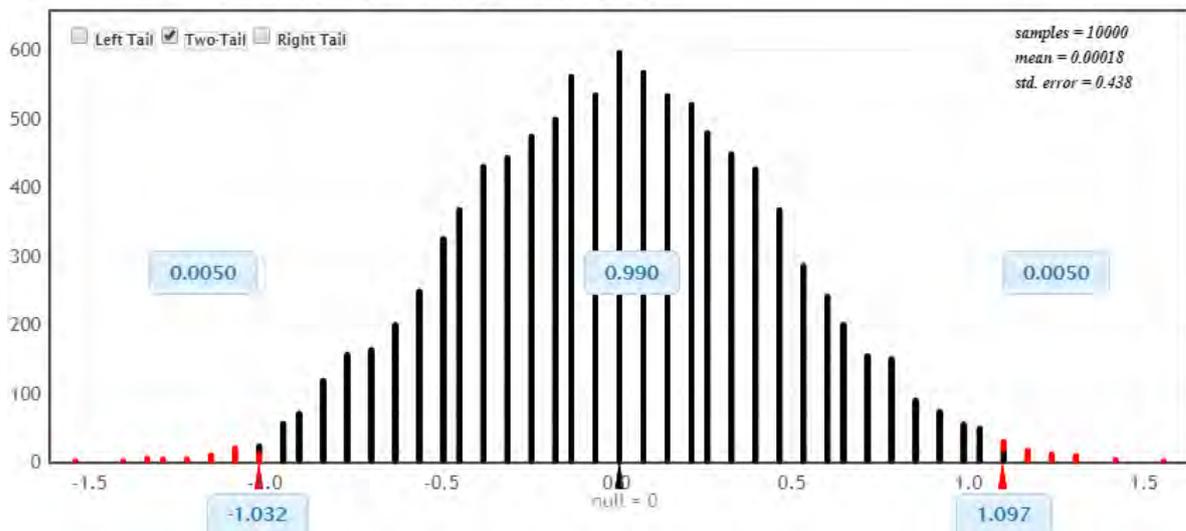


Figura 35. Porcentaje de datos menores que la diferencia de medias para el modelo alemán. Fuente: Adaptado de Statkey.

De la figura 34 podemos observar que el intervalo de confianza muestra como límite inferior el valor -0.839 y como límite superior se tiene el valor 0.839. Como se mencionó anteriormente, la diferencia de medias para el modelo alemán es de -1.03 por lo que podemos concluir que el intervalo de confianza no contiene dicho valor y muestra un comportamiento estadístico raro de las muestras originales. Además, como se puede apreciar en la figura 35 solo el 0.5% de datos son menores que la diferencia de medias para este modelo. En conclusión, se puede afirmar con un 95% de nivel de confianza que las medias de colas medidas en campo y las calculadas son diferentes y,

por ende, se puede realizar la afirmación que las colas medidas en campo con las colas calculadas son estadísticamente diferentes.

4.3.1 Test para modelo británico

Análogamente, se muestran los resultados de la prueba “Randomization Test” para el caso del modelo empírico británico.

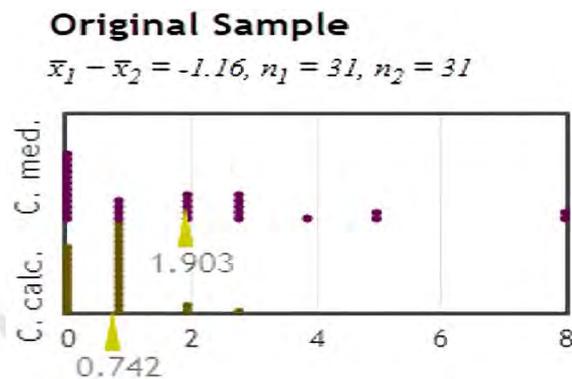


Figura 36. Muestra original de datos para el modelo británico. Fuente: Adaptado de Statkey.

De la figura 36 podemos observar que la diferencia de medias para el modelo británico es -1.16, esta diferencia se logra de la resta del promedio de los 31 valores de colas medidas en campo con el promedio de los 31 valores de colas calculadas. Ahora, veamos si esta diferencia se encuentra dentro del intervalo de confianza generado por la prueba, dicho intervalo se genera realizando 10,000 pares de muestras aleatorias partiendo de los valores de las muestras originales.

Randomization Dotplot of $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$, Null hypothesis: $\mu_1 = \mu_2$

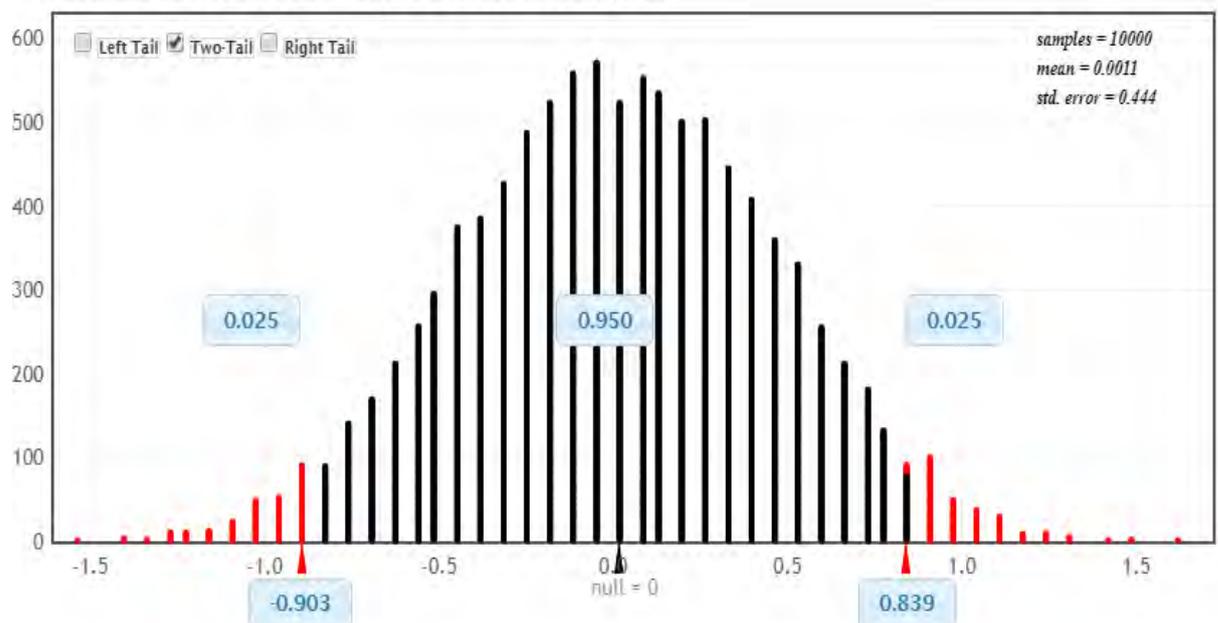


Figura 37. Grupo de 10,000 pares de muestras aleatorias para el modelo británico. Fuente: Adaptado de Statkey.

Randomization Dotplot of $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$, Null hypothesis: $\mu_1 = \mu_2$

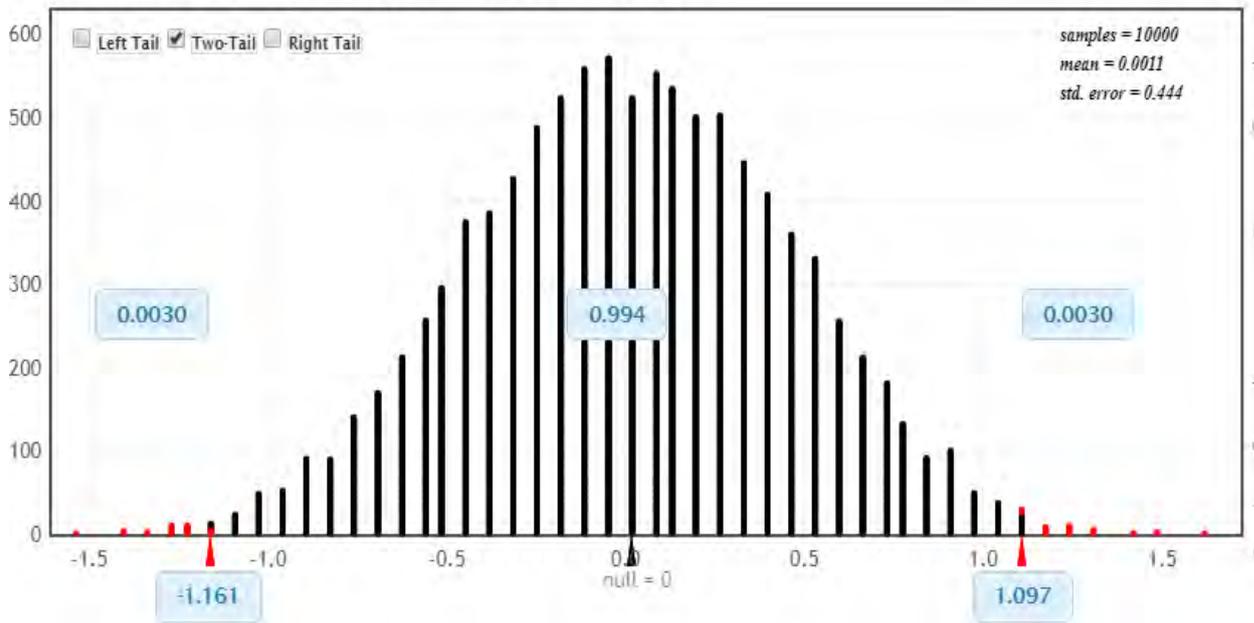


Figura 38. Porcentaje de datos menores que la diferencia de medias para el modelo británico. Fuente: Adaptado de Statkey.

De la figura 37 podemos observar que el intervalo de confianza muestra como límite inferior el valor -0.903 y como límite superior se tiene el valor 0.839. Como se mencionó anteriormente, la diferencia de medias para el modelo británico es de -1.16 por lo que podemos concluir que el intervalo de confianza no contiene dicho valor y muestra un comportamiento estadístico raro de las muestras originales. Además, como se puede apreciar en la figura 38 solo el 0.3% de datos son menores que la diferencia de medias para este modelo. En conclusión, se puede afirmar con un 95% de nivel de confianza que las medias de colas medidas en campo y las calculadas son diferentes y, por ende, se puede realizar la afirmación que las colas medidas en campo con las colas calculadas son estadísticamente diferentes.

5. CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. 1. Conclusiones

Como se mencionó a lo largo de la tesis, los métodos empíricos de análisis fueron concebidos y aplicados en cada uno de sus países de origen; influenciando en ellos la cultura de tránsito vehicular presente en el país así como la geometría de diseño de la rotonda en estudio, particularmente, para el método británico. Para el caso de la rotonda Independencia se pudo observar, con la ayuda de los videos otorgados por la Municipalidad de Magdalena del Mar, que algunos conductores no cumplen con la prioridad de pase en rotondas; es decir, no se cumple la preferencia de tránsito de los vehículos circulando por la rotonda de los vehículos a punto de ingresar a ella; incluso existen conductores que van en contra del sentido de circulación para “ganar” un poco de tiempo poniendo en peligro su propia vida como la de los otros conductores. Todo esto, interfiere indirectamente en el cálculo de la capacidad de la rotonda en estudio y la formación de colas en los accesos de entrada.

El cálculo de la capacidad de la rotonda y los parametros de su geometría, fueron determinados con la ayuda de los videos otorgados por la municipalidad y por el levantamiento topográfico que se realizó en la rotonda Independencia; utilizar estos recursos facilita la obtención de los datos requeridos. Sin embargo, existen otras formas de hallar la data deseada como puede ser registro del aforo vehicular de manera manual y la obtención de los parametros geométricos por medio de mediciones directas en la rotonda; dichos métodos resultan ser más trabajosos y complicados al momento de aplicarlos. No obstante, como se ha descrito en el capítulo 2 de revisión de literatura, existen innumerables métodos de análisis de capacidad de una rotonda siendo muchos de ellos más sencillos que los trabajados en el presente trabajo, incluso algunos solo requieren el número de carriles presentes; la elección de la conveniencia de cada uno de ellos dependerá del tipo de trabajo que se realice.

En respuesta al primer objetivo planteado en el inciso 1.1.2, es necesario evaluar la confiabilidad de los modelos, para esto se procede a verificar el valor del coeficiente de determinación (R^2) cuyo valor se obtiene de comparar los grados de saturación calculados para cada uno de los modelos empíricos. Este valor refleja la exactitud del ajuste en una regresión lineal, para ambos modelos el cual se mantiene cercano a 0.97 lo que nos indica una excelente confiabilidad de 97% para cada uno de los modelos empíricos de análisis. Por lo tanto, se puede afirmar que los grados de saturación calculados con cada uno de los dos modelos son semejantes entre sí con un 97% de confiabilidad lo que confirma la veracidad de la primera hipótesis planteada.

Con respecto al segundo objetivo, el parámetro de eficiencia de colas, es el principal indicador de la aceptación del modelo; es decir, con la ayuda de las colas calculadas tanto para el modelo alemán como para el británico y las colas calculadas en campo se pueden determinar qué tan bien reflejan

dichos modelos la realidad de la rotonda en estudio. Entendido esto, podemos concluir que para grados de saturación bajos las colas del modelo alemán se asemejan mucho más a las colas medidas en campo, en comparación con las colas calculadas para el modelo británico en grados de saturación bajos. Por lo tanto, se puede afirmar que el modelo alemán nos indica una mejor cercanía a la realidad de la rotonda Independencia para grados de saturaciones bajos que son menores a 0.6. En contraste, se puede observar que para grados de saturación altos los resultados son completamente diferentes y es el modelo británico el que refleja una mejor cercanía de la realidad en la rotonda en estudio.

La naturaleza estadística del trabajo se refleja en las pruebas de “Randomization test” para los dos modelos empíricos. Como se mencionó anteriormente, el análisis del valor de las colas calculadas y medidas en campo indicaran la aceptación de los modelos. Por lo que, se puede asegurar con un 95% de confianza que las colas medidas en campo con las colas calculadas tanto para el modelo alemán como para el modelo británico son estadísticamente diferentes lo que confirma la falsedad de la segunda hipótesis planteada. Todo esto, nos permite responder el objetivo principal de la tesis que tanto el modelo empírico alemán como el modelo empírico británico no son adecuados para determinar la capacidad de la rotonda Independencia.

5. 2. Recomendaciones

Sin embargo, si se debe elegir el análisis, para esta rotonda, por alguno de los dos modelos se recomienda elegir el modelo británico ya que muestra mayor semejanza de la realidad para grados de saturación altos y en estos es donde se generan las mayores colas y son los momentos críticos para la rotonda. Es mejor realizar el diseño para grados de saturación altos que para grados de saturaciones bajos.

Si bien, los resultados de ambos modelos muestran que no son aplicables para el caso de la rotonda Independencia, no se puede descartar la utilización de ambos modelos en otras rotondas presentes en la ciudad de Lima. Hoy en día, se cuenta con programas computacionales, como la microsimulación vehicular, que determinan las características del tránsito, capacidad de una rotonda y parámetros de eficiencia teniendo en cuenta muchos más factores que los modelos empíricos no tienen en consideración como lo son el flujo de los peatones, la separación de todos los tipos de vehículos como combis, Custers, motos lineales, moto taxis, etc. Esto ayuda a tener un reflejo de la realidad mucho más cercano y poder lograr un análisis y diseño de la rotonda en estudio semejante a la realidad. A diferencia, de los modelos empíricos que requieren de condiciones determinadas similares a las que fueron concebidas en los países de origen y la modificación de estas repercute directamente en los resultados obtenidos para la rotonda en análisis.

6. REFERENCIAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS
2011 *A policy on Geometric Design of Highway and Streets*. Washington DC. Consulta: 19 de Junio de 2019
- CABRERA VEGA, Félix Israel.
2018 *“Apuntes de clase del curso Ingeniería de Tráfico”*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Lima. Consulta 12 de Abril de 2019
- CHUNG, E., YOUNG, W. and AKÇELIK, R.
1992. *“Comparison of roundabout capacity and delay estimates from analytical and simulation models.”* Proc. 16th ARRB Conf. 16 (5). Consulta 12 de abril de 2019
- DARDER GALLARDO, Víctor.
2005 *“Funciones de las rotondas urbanas y requerimiento urbanístico de organización”*. Unversitat Politècnica de Catalunya. España. Consulta 23 de Abril de 2019
<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3375>
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION
2000 *Roundabout: An informational guide*. Portland. Consulta: 7 de junio de 2019.
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/00067/00067.pdf>
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION
2007 *“Traffic analysis toolbox volume VI: definition, interpretation and calculation of traffic analysis tools measures of effectiveness”*. Portland. Consulta: 24 de noviembre de 2019.
<https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08054/index.htm>
- FLORES, Gotoniel, Violeta DEPIANTE y Jorge GALARRAGA
2013 *Calibración del modelo de capacidad de rotondas del HCM2010*. Córdoba. Consulta 7 de Junio de 2019
<http://redpgv.coppe.ufrj.br/index.php/es/produccion/articulos-cientificos/2013-1/758-calibracion-del-modelo-de-capacidad-de-rotondas-del-hcm2010-a-condiciones-locales-caso-cordoba-arg/file>
- GUILLEN BORRAGÁN, Alberto.
2006 *“Auditorias de seguridad vial. Problema de velocidad: Transiciones y accesos a Rotondas”*. Unversitat Politècnica de Catalunya. España. Consulta 15 de Abril de 2019
<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3293>
- JACQUEMART, Georges.
1998 *Synthesis of Highway Practice 264: Modern Roundabout Practice in the United States*. TRB, National Research Council, Washington, D.C. Consulta 7 de Junio de 2019.
- KIMBER, R. M.
1980 *“The traffic capacity of roundabouts”*. Transport and Road Research Laboratory. Crowthorne. Consulta 24 de Junio de 2019.

MARTIN GASULLA, Mariló Dolores.

- 2011 “Estudio y mejora de la capacidad y funcionalidad de glorietas con flujos de tráfico descompensados mediante microsimulación de tráfico. Aplicación a la intersección de la CV-500 con la CV-401, en El Saler (T.M. Valencia)”. Universidad Politécnica de Valencia. España. Consulta 8 de junio de 2019.
<http://www.catedrasabertis.com/red-abertis/upc-barcelonatech/trabajos-galardonados/>

MAURO, Raffaele

- 2010 *Calculation of Roundabouts: Capacity, Waiting Phenomena and Reliability* [Libro Electrónico]. Trento: Springer Science & Business Media. Consulta 8 de junio de 2019.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (NCHRP)

- 2003 *Report 505: Review of Truck Characteristics as Factors in Roadway Design. United States of America*. Consulta 22 de Junio de 2019.
<https://www.nap.edu/read/23379/chapter/2>

PARDILLO, J., SANCHEZ, V.

2006. “Apuntes de ingeniería de tráfico”. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. España. Consulta: 24 de noviembre de 2019.

RIVERA, Saúl

- 2012 *Aceptabilidad de intervalos (brechas) para maniobras en intersecciones de prelación vial*. Tesis de licenciatura en Vías y Transporte. Medellín: Universidad de Medellín. Consulta: 10 de junio de 2019.
[https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/196/Aceptabilidad%20de%20intervalos%20\(brechas\)%20para%20maniobras%20en%20intersecciones%20de%20prelacion%20vial.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/196/Aceptabilidad%20de%20intervalos%20(brechas)%20para%20maniobras%20en%20intersecciones%20de%20prelacion%20vial.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

STANDARDS FOR HIGHWAYS

- 2007 “*Geometric Design for Roundabout*”. *Design manual for roads and bridges*. Londres. Consulta 7 de junio de 2019
<http://www.standardsforhighways.co.uk/ha/standards/dmrb/vol6/section2/td1607.pdf>

TRB

2000. “*Highway Capacity Manual*”. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A. Consulta 15 de junio de 2019.

VÁSQUEZ, Alberto y Bendezú, Luis

- 2008 “*Ensayo sobre el rol de la infraestructura en el crecimiento económico del Perú*”. Consorcio de Investigación Económica y Social. Lima, Perú. Consulta 15 de junio de 2019.
<http://www.cies.org.pe/sites/default/files/files/diagnosticoypropuesta/archivos/dyp-39.pdf>

VERA PACHECO, Danilo Yosimar.

2014 “*Estudio y mejora de la fluidez del tránsito mediante el diseño de una rotonda en la intersección Los Robles – Los Laureles, Valdivia*”. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. Consulta 17 de junio de 2019.

<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/bmfciv473e/doc/bmfciv473e.pdf>

