

# Modelación de una rotonda: Configuración de semáforos

Edwin Alexander Acero Cuesta  
José Eduardo Díaz Moreno  
Andrés Eduardo Rubiano Martínez  
Daniela Gil Navarro

Julio 2019

## Resumen

En el presente trabajo estudiamos el flujo vehicular en las rotondas a un nivel macroscópico, por medio de un modelo de teoría de grafos. Buscamos optimizar este flujo con distintas configuraciones de semáforos. En particular, buscamos crear un modelo que se ajuste a una gran cantidad de tráfico, como el presente en las horas "pico" de ciudades principales de todo el mundo, en particular de Bogotá; y a una baja cantidad de vehículos como en las horas "valle". Esto se realiza con un método de programación lineal llamado Simplex, el cual busca una solución inicial, luego se mueve a otras soluciones básicas que tengan el potencial de mejorar la función objetivo. Por último, identifica la solución básica correspondiente a la óptima. Se toman supuestos que buscan promover la cultura al volante y estandarizar la abstracción del modelo de la rotonda en cualquier parte. Luego se da un paso a paso de todo lo realizado como simulaciones; cálculos de tiempos de luz roja, ámbar y verde en los semáforos a implementar; y si es necesario o no tener estas luces de tráfico a todas horas. Se culmina mostrando los resultados obtenidos al correr el algoritmo propuesto en el programa Octave, junto con sus gráficas correspondientes que nos brindarán una ayuda visual sobre el comportamiento del tráfico, implementando estas configuraciones de semáforos a una rotonda en específico. Esto nos sirve de base para buscar implementar este algoritmo en cualquier rotonda básica.

*Palabras clave: Rotonda, semáforos, hora pico, hora valle, programación lineal, método Simplex*

## Abstract

In the present work we study the vehicular flow in roundabouts in a macroscopic level, with a graph based model. We look forward to optimize this flow with different traffic light configurations. In particular, we look forward to create a model which adjusts to a big amount of traffic, like the one present in the rush hour of the principle cities in the world, in particular, in Bogotá; and also to a small amount of cars like in the not rush hour (horas valle). This is made with a linear programming method called Simplex. This method searches for an initial solution, then moves to other basic solutions that may have the potential to improve the objective function. For last instance, it identifies the optimal basic solution. We take assumptions that look forward to promote the culture at driving and to standardize the model's abstraction of the roundabout at any place. Then it is performed a step by step of everything done like: simulations, calculations of red, amber and green light in the traffic lights to be implemented, and if it is necessary or not to have this traffic lights at anytime. At the end, the obtained results will be shown from the proposed algorithm in the software Octave, along with its corresponding diagrams, that will give us a visual aid of the traffic behaviour, implementing this traffic lights configuration to an specific roundabout, that serves us as a base to seek for implementing this algorithm to any basic roundabout.

*Keywords: Roundabout, Traffic Lights, rush hour, linear programming, Simplex method*

# Índice

<b>1. Planteamiento del problema</b>	<b>2</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>2</b>
2.1. Objetivo General . . . . .	2
2.2. Objetivos Especificos . . . . .	2
<b>3. Herramientas matemáticas</b>	<b>3</b>
3.1. Teoría de grafos . . . . .	3
3.2. Problema del flujo máximo . . . . .	3
3.3. Modelo Simplex de la red de capacidad . . . . .	4
3.4. Teoria de Flujo Vehicular . . . . .	4
3.4.1. Capacidad . . . . .	5
<b>4. Modelo Matemático</b>	<b>7</b>
4.1. Supuestos . . . . .	7
4.2. Pasos del modelo . . . . .	11
4.2.1. Paso 1: . . . . .	11
4.2.2. Paso 2: . . . . .	12
4.2.3. Paso 3: . . . . .	15
4.2.4. Paso 4: . . . . .	15
4.2.5. Paso 5: . . . . .	17
<b>5. Resultados</b>	<b>17</b>
5.1. Sin el uso de semáforos . . . . .	18
5.2. Uso de semáforos . . . . .	21
<b>6. Aplicación</b>	<b>24</b>
<b>7. Solución</b>	<b>26</b>
<b>8. Conclusión</b>	<b>27</b>
8.1. Ventajas . . . . .	27
8.2. Desventajas . . . . .	28

## 1. Planteamiento del problema

Las rotondas que venían siendo una de las mejores maneras de disminuir la congestión vehicular en las intersecciones se ven afectadas por el alto flujo vehicular lo cuál es un problema para la ciudadanía.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo General

Determinar la mejor configuración de semáforos para maximizar el flujo vehicular dentro y fuera de una rotonda.

### 2.2. Objetivos Especificos

- Caracterizar los datos del tránsito de rotondas existentes para implementarles el modelo.
- Compilar la información y resultados obtenidos del modelo con el fin de establecer el mejor tiempo de los semaforos.

### 3. Herramientas matemáticas

#### 3.1. Teoría de grafos

En matemáticas o ciencias de la computación, una red es un conjunto de objetos llamados vértices o nodos unidos por enlaces llamados aristas o arcos, que permiten que a cada rama se le asocie un flujo de algún tipo. En general el flujo en una rama está limitado por su capacidad que puede ser finita o infinita. Se dice que una rama está dirigida u orientada si permite un flujo positivo en una dirección, y cero flujo en dirección opuesta. Una red dirigida es una red con todas sus ramas dirigidas. La notación estándar para describir una red  $G$  es  $G=(N,A)$ , donde  $N$  es el conjunto de nodos y  $A$  el conjunto de ramas.

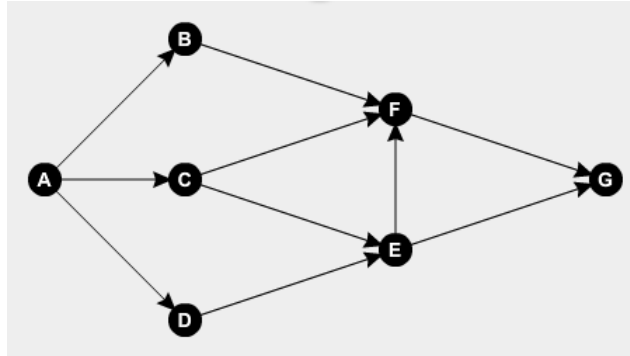


Figura 1: Grafo dirigido

Una trayectoria es una secuencia de ramas distintas que conectan dos nodos sin considerar la orientación de las ramas individuales. Una red conectada es una red donde dos nodos distintos están conectados por una trayectoria.

#### 3.2. Problema del flujo máximo

Se considera la situación cuando se enlaza un nodo fuente y un nodo destino, a través de una red de ramas o arcos de capacidad finita. La red unidireccional, en el sentido de que comienza en un nodo fuente y termina en un nodo destino. Sin embargo, una rama  $(i, j)$  puede tener dos capacidades distintas, dependiendo si el flujo es de  $i$  a  $j$  o bien de  $j$  a  $i$ . Por ejemplo, si la red trata con el flujo de tránsito en las calles de una ciudad, una calle de un solo sentido tendrá una cantidad positiva en una dirección y una cantidad de cero en el otro sentido.

El problema del flujo máximo se puede resumir en lo siguiente: ¿cuál es la mayor tasa a la cual el material puede ser transportado de la fuente al sumidero sin violar ninguna restricción de capacidad? En otras palabras, el problema consiste en determinar la máxima capacidad de flujo que puede ingresar a través de la fuente y salir por el nodo de destino. El procedimiento para obtener el flujo máximo de una red, consiste en seleccionar repetidas veces cualquier trayectoria de la fuente al destino y asignar el flujo máximo posible en esa trayectoria.

Una red de flujo es un grafo dirigido  $G = (V, E)$  donde cada arco  $(u, v) \in E$  tiene una capacidad no negativa  $c(u, v) \geq 0$ .

Se distinguen dos vértices: la fuente  $s$  y el destino  $t$ .

Se supone que cada vértice se encuentra en alguna ruta de  $s$  a  $t$ .

Un flujo en  $G$  es una función  $f : V \times V \mapsto \mathbb{R}$  tal que:

- Restricción de capacidad:  $\forall u, v \in V, f(u, v) \leq c(u, v)$
- Simetría:  $f(u, v) = -f(v, u)$
- Conservación:  $\forall u \in V - \{s, t\} \sum_{v \in V} f(u, v) = 0$

El valor del flujo es  $|f| = \sum_{v \in V} f(s, v)$

El objetivo del problema del flujo máximo trata de maximizar este flujo.

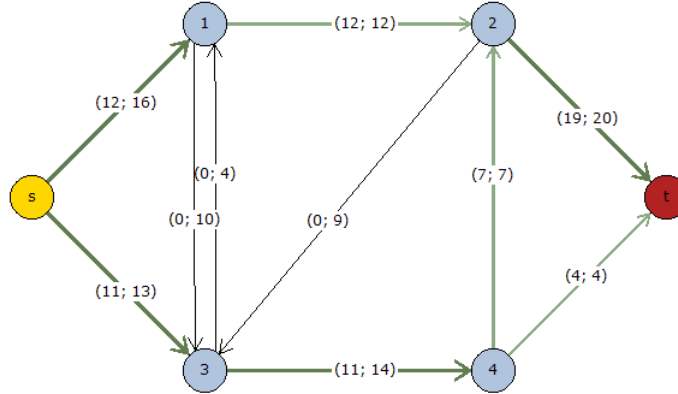


Figura 2: Red de flujo

### 3.3. Modelo Simplex de la red de capacidad

En optimización matemática, el término algoritmo Simplex habitualmente se refiere a un conjunto de métodos muy usados para resolver problemas de programación lineal, en los cuales se busca el máximo de una función lineal sobre un conjunto de variables que satisfaga un conjunto de inecuaciones lineales. El método Simplex es un procedimiento iterativo que permite mejorar la solución de la función objetivo en cada paso. El proceso concluye cuando no es posible continuar mejorando dicho valor, es decir, se ha alcanzado la solución óptima (el mayor o menor valor posible, según el caso, para el que se satisfacen todas las restricciones). Partiendo del valor de la función objetivo en un punto cualquiera, el procedimiento consiste en buscar otro punto que mejore el valor anterior. El método Simplex se basa en la siguiente propiedad: si la función objetivo  $Z$  no toma su valor máximo en el vértice  $A$ , entonces existe una arista que parte de  $A$  y a lo largo de la cual el valor de  $Z$  aumenta.

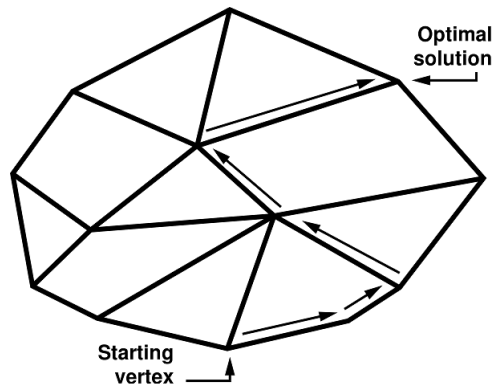


Figura 3: Algoritmo de Simplex

### 3.4. Teoría de Flujo Vehicular

Mediante el análisis de los elementos del flujo vehicular se pueden entender las características y el comportamiento del tránsito; requisitos básicos para el planteamiento; proyecto y operación de carreteras; calles y sus obras complementarias dentro del sistema de transporte. Con aplicación de leyes de la física y las matemáticas, el análisis del flujo vehicular describe la forma como circulan los vehículos en cualquier tipo

de vialidad, lo cual permite determinar el nivel de eficiencia de la operación. Uno de los resultados mas útiles del análisis del flujo vehicular, es el desarrollo de modelos microscópicos y macroscópicos que relacionan sus diferentes variables como el volumen, la velocidad, la densidad, el intervalo y el espaciamiento. Estos modelos han sido la base del desarrollo del concepto de capacidad y nivel de servicio aplicado a diferentes tipos de elementos viales.

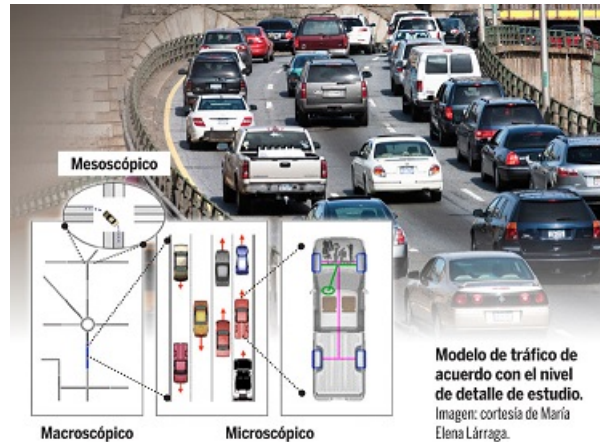


Figura 4: Flujo Vehicular(microscópico-macroscópico)

### 3.4.1. Capacidad

La cantidad ( $Q$ ) de una sección de vía para una cierta corriente vehicular, es el máximo número de vehículos de dicha corriente que puede atravesarla por unidad de tiempo, en las condiciones prevalecientes de circulación. Las condiciones a las que hace referencia esto son, entre otras: -Tipo de conflicto existencial. -Regulación de ellos. -Características de las corrientes vehiculares involucradas. -Características del tramo de vía y factores ambientales.

#### 4.4.1.1. Capacidad de intersecciones semaforizadas

En este tipo de intersecciones existe un dispositivo, el semáforo, que alterna cíclicamente la prioridad en el uso del área en común. Dentro de un ciclo del semáforo se distinguen fases donde se autoriza el paso de ciertas corrientes dándoles luz verde. Al completarse el ciclo, todas las corrientes que llegan a la intersección habrán recibido un periodo de verde. Cuando una fase termina aparece la luz roja que impide el paso de las corrientes respectivas. Si la regulación del semáforo se respeta, cada corriente atraviesa por una etapa en la que goza de prioridad absoluta sobre otras corrientes (periodo en verde); y otro en que no puede pasar(periodo en rojo). Por motivos de seguridad, existe una transición entre ambos, que es el periodo amarillo o ámbar. La tasa de descarga durante el periodo de verde se denomina *flujo de saturación*,  $S$ .

Sea:

- $\lambda_1$  : pérdida de verde
- $\lambda_2$  : ganancia de amarillo
- $V_i$  : tiempo de verde de la fase  $i$
- $R_i$  : tiempo de rojo de la fase  $i$
- $A_i$  : tiempo de amarillo de la fase  $i$
- $C$  : tiempo de ciclo del semáforo

Por construcción  $C = V_i + R_i + A_i$ . Estas variables representan la programación del semáforo.

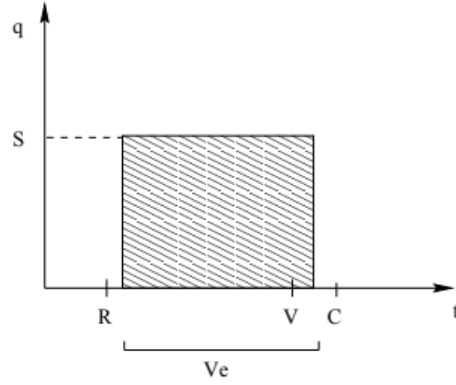


Figura 5: Ciclo del semáforo

Podemos definir entonces las variables auxiliares para cada fase: verde efectivo  $V_e$  y rojo efectivo  $R_e$  :

$$\begin{aligned} V_e &= V + \lambda_2 - \lambda_1 \\ R_e &= C - V_e \end{aligned}$$

Con estas definiciones, la descarga de la cola se transforma en un proceso binario como se muestra en figura 5.

Luego la capacidad ( $Q$ ) de una corriente.  $Q = \frac{SV_e + 0R_e}{C} = \frac{SV_e}{C}$

#### 5.4.1.2. Capacidad de la rotonda

Este método empírico TRRL (de: Transport Road and Research Laboratory) tiene como hipótesis que tanto el tráfico de entrada, como el tráfico del anillo, tienen una relación lineal como se aprecia en la siguiente ecuación:

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

En donde:

- $Q_e$  : Flujo de entrada en  $V_{eq}$  (Vehículos equivalentes: 1 vehículo pesado = 2 vehículos livianos)
- $Q_c$  : Flujo en el anillo que cruza la ( $V_{eq}$ )
- $k = 1 - 0,00347(\phi - 30) - 0,978(\frac{1}{r} - 0,05)$
- $F = 303x_2$ ,
- $f_c = 0,21.t_D(1 + 0,2x_2)$
- $t_D = 1 + \frac{0,5}{1+M}$
- $M = e^{\frac{D-60}{10}}$
- $x_2 = V + \frac{e-V}{1+2S}$
- $S = \frac{1,6(e-V)}{L'}$

$e, v, L', S, D, \phi, r$  se definen como:

- $3,6m \leq 16,5m$  : Ancho de entrada
  - $1,9 \leq v \leq 12,5m$  : Semiancho de la rama del casco
  - $1,9 \leq L' \leq \infty m$  : Largo promedio de ensanche efectivo
  - $0 \leq S \leq 2,9$  : Agudeza del ensanche
  - $13,5 \leq D \leq 171,6$  : Diámetro del círculo más grande que puede inscribirse dentro de la rotonda
  - $0^\circ \leq \phi \leq 77^\circ$  : Ángulo de entrada
- $3,4m \leq r \leq \infty m$  : Radio de entrada

Para comprender el cálculo de la capacidad de una rotonda, se puede ver la figura 7 donde se ilustran gráficamente los parámetros geométricos mencionados anteriormente.

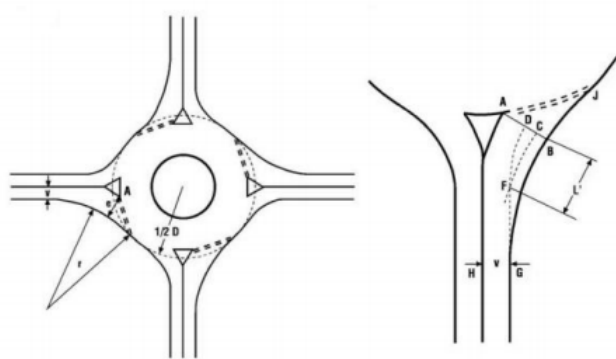


Figura 6: Parámetros geométricos de la rotonda

## 4. Modelo Matemático

### 4.1. Supuestos

#### ■ Rotonda circular normal:

Hay tres tipos principales de glorieta: **normal, miniglorieta y doble**. Las demás son variantes de estos tipos básicos: intersección anular, glorieta a distinto nivel y glorieta con semáforos. La glorieta partida no se puede considerar glorieta en el sentido funcional.

#### **Rotonda normal:**

Una rotonda normal tiene una isleta central dotada de bordillos de  $4m$  o más de diámetro, y generalmente, entradas abocinadas que permiten una entrada múltiple de vehículos.

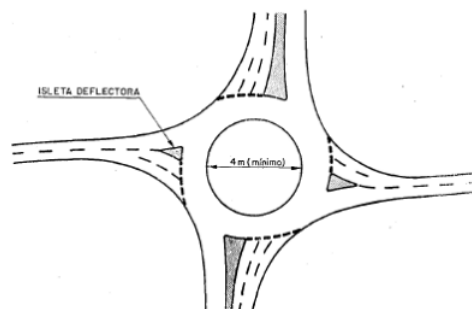


Figura 7: Rotonda Normal

**Miniglorietas:** Una miniglorieta tiene una isleta circular -a nivel o ligeramente abombada- de menos de 4m de diámetro, y entradas abocinadas o sin abocinar

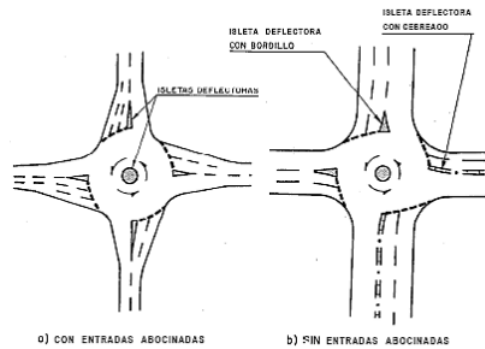
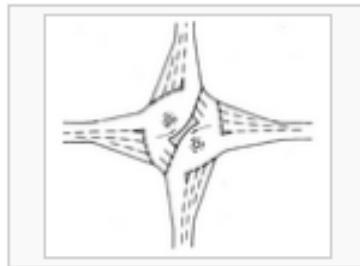


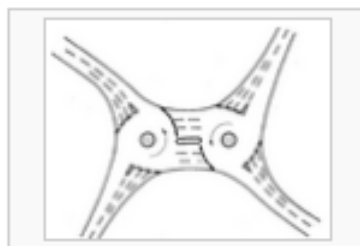
Figura 8: Miniglorieta

### Rotondas Dobles:

Una rotonda doble es una intersección compuesta por dos glorietas normales o miniglorietas, contiguas o conectadas por un tramo de unión o por una isleta alargada, materializada por un bordillo.



Glorieta doble contigua



Glorieta doble con tramo de unión

Figura 9: Rotonda doble

Por lo anterior, se eligió la glorieta normal ya que es la más adecuada para relacionarla con nuestro modelo matemático

- **4 entradas y 4 salidas:** El modelo puede ser modificado para tener en cuenta la cantidad de entradas que se quieran, pero ya que las rotondas más comunes son de cuatro entradas y cuatro salidas, se



decidio usar este.

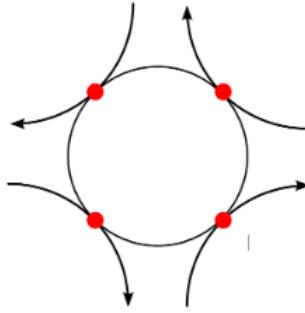


Figura 10: Forma de rotonda

- **Excelentes conductores:** Este supuesto se toma teniendo en cuenta las noticias nacionales e internacionales concernientes a las rotondas. En las intersecciones regulares ocurren menos accidentes que en las glorietas, pero estos tienden a ser más graves por la fuerza de impacto, que generalmente es de lado. Sin embargo, en las glorietas se tienden a registrar más accidentes leves, porque el choque es propenso a ser de lado.

- **Dimensiones promedio del vehículo:**

Largo= 6,10m

Ancho= 2m

Marca	Unidades	Partición en el mercado
Chevrolet	179.686	32 %
Renault	88.080	15,7 %
Mazda	45.387	8,1 %
Hiundai	34.646	6,2 %
Toyota	29.801	5,3 %
Kia	29.565	5,3 %
Nissan	24.944	4,4 %
Ford	23.173	4,1 %
Volkswagen	13.974	2,5 %
Mitsubishi	11.288	2 %

Tabla 1: Porcentaje de ventas de carros en Colombia

Gracias a datos relevados por el ANDEMOS (Asociación Nacional de Movilidad Sostenible) se obtuvieron cifras de las marcas de vehículos más vendidos y utilizados en Colombia en los últimos años, y con esto se logran conocer las dimensiones promedio de los vehículos que se tienen en cuenta para hallar las capacidades de la rotonda en el modelo matemático .

- **Velocidad promedio:**  $30 \frac{km}{h}$

Las autoridades reguladoras de la vía fijarán, mediante el empleo de la señalización correspondiente (en nuestro caso en una rotonda), las limitaciones de velocidad específicas que correspondan con respecto a las características del tramo de la vía. En defecto de señalización específica, se cumplirá la genérica establecida para cada vía. Una rotonda “urbana” puede encontrarse en diferentes situaciones y contextos: centro de población, en zona residencial (dispersa o compacta), en zonas industriales, a la entrada de una ciudad o pueblo, entre otros. Por lo cual, la velocidad máxima que no deberán rebasar los vehículos en vías urbanas se establece, con carácter general, en 50 kilómetros por hora, salvo para

los vehículos que transporten mercancías peligrosas, que circularán como máximo a 40 kilómetros por hora; y por ley, la velocidad para cruzar por las glorietas y cruces de vías de las ciudades colombianas es de 30 kilómetros por hora.



Figura 11: Señal de velocidad máxima

■ **Semáforos:**

Los semáforos son dispositivos de señalización mediante los cuales se regula la circulación de vehículos. En la rotonda van a desempeñar las siguientes funciones:

- Interrumpir periódicamente el tránsito de una corriente vehicular o peatonal para permitir el paso de otra corriente vehicular.
- Regular la velocidad de los vehículos para mantener la circulación continua a una velocidad constante.
- Proporcionar ordenamiento del tránsito.

Que mejore el flujo de vehiculos en horas de mayor circulación en la rotonda y evitando así una saturación en la misma.

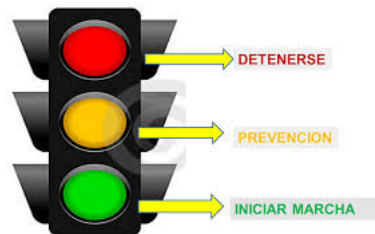
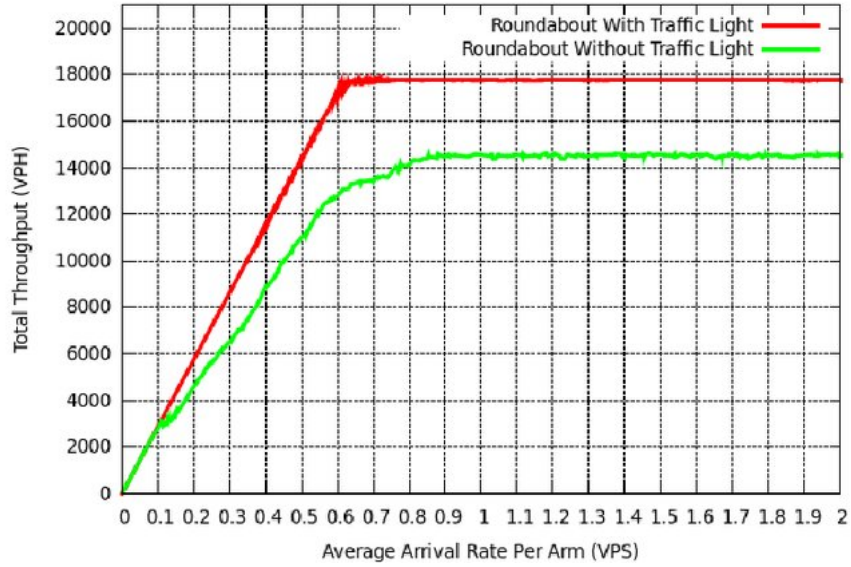


Figura 12: Semaforo

Una de las principales razones por la que se toma este supuesto es por un estudio de Momona Ethiopian Journal of Science del año 2013, en el que realizan simulaciones con semáforos instalados. El resultado es un tanto contraintuitivo, pero tiene una razón: cuando el tráfico es denso (horas pico), es más maleable toda una corriente de tráfico por ciertos tiempos, que dando la libertad a los conductores cuando hacen su llegada. En este estudio se hace referencia a que hay sistemas en el cual se apagan los semáforos en las hora de menor tráfico. El resumen de una de sus simulaciones se puede ver a continuación:



Gráfica 1: Simulación de la rotonda con semáforos (gráfica roja) y sin semáforos (gráfica verde). Aquí los tiempo son: rojo 40 segundos, verde 20 segundos, ámbar 2 segundos. VPS es el número de vehículos por carril, por diez segundos. (0.1 es un vehículo cada 10 segundos); VPH es el número de vehículos por hora que circulan.

- **Número de carriles en las entradas:** 1 a 3 en cada entrada

El diseño de la entrada es muy importante para la seguridad ya que controla la movilidad de los vehículos que acceden a la glorieta ,y por lo tanto la velocidad de entrada. Para definir su geometría es clave la anchura para calcular la capacidad. Debe ajustarse al mínimo estricto que permita acomodar el paso del vehículo ya que una anchura moderada favorecerá la adecuada deflexión de velocidad, y por lo tanto, la seguridad.

- **Número de carriles de la rotonda:** es 2 o 3

## 4.2. Pasos del modelo

### 4.2.1. Paso 1:

Se define una red  $N = (G, A, B, C)$ :

- $G := (V, E)$ .
- $V :=$  Entrada de vehículos concentrada en un punto, intersecciones de la rotonda, Salida de vehículos concentrada en un punto.
- $E := \{(u, v) \in V : \text{Carretera que va de } u \text{ hacia } v\}$ .
- $G$  es un grafo dirigido.
- $A :=$  Entrada de vehículos concentrada en un punto.
- $B :=$  Salida de vehículos concentrada en un punto.
- $C(u, v) :=$  Número de vehículos que pueden pasar por  $(u, v)$  en una unidad de tiempo.

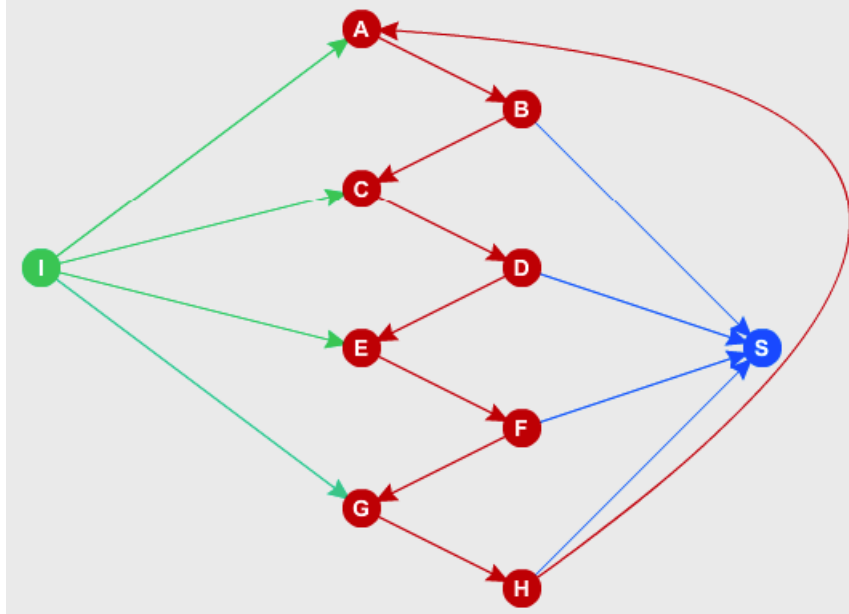


Figura 13: Grafo asociado a la rotonda

#### 4.2.2. Paso 2:

Se plantea el problema de optimización con el cual vamos a obtener el flujo máximo que pasa por el grafo:

$$\begin{aligned} \text{Maximizar: } & \mathbf{c}^t \mathbf{x} \\ \text{Sujeto a: } & A\mathbf{x} = 0 \\ & \mathbf{F}_1 \preceq \mathbf{x} \preceq \mathbf{F}_2 \end{aligned}$$

Con:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_{01} \\ x_{03} \\ x_{05} \\ x_{07} \\ x_{12} \\ x_{23} \\ x_{34} \\ x_{45} \\ x_{56} \\ x_{67} \\ x_{78} \\ x_{81} \\ x_{29} \\ x_{49} \\ x_{69} \\ x_{89} \end{pmatrix} \quad \mathbf{F}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{c} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

La matriz A está representada por las siguientes ecuaciones las cuales representan la conservación del flujo en el grafo, y son tomadas como restricciones en el problema del flujo máximo.

- $X_{81} = X_{78} - X_{89}$
- $X_{78} = X_{67} + X_{69}$
- $X_{67} = X_{56} - X_{69}$
- $X_{56} = X_{05} + X_{45}$
- $X_{45} = X_{34} - X_{49}$
- $X_{34} = X_{03} + X_{23}$
- $X_{23} = X_{12} - X_{29}$
- $X_{12} = X_{01} + X_{81}$

Haciendo una reemplazo en reversa de las ecuaciones anteriores se obtiene una ecuación general la cual depende unicamente del flujo de los arcos de entrada y los flujos de los arcos de salida del grafo, lo cual hace referencia a que la cantidad de flujo vehicular que entra en la rotonda debe ser igual a lo que sale de ella (conservación del flujo vehicular).

$$X_{01} + X_{07} + X_{05} + X_{03} - X_{29} - X_{49} - X_{69} - X_{89} = 0$$

**F<sub>2</sub>** : varia dependiendo de la situación en que nos encontremos, este parámetro nos indica como se moveran los autos por la rotonda, siendo las 4 primeras componentes el maximo de vehículos que dejaremos entrar a la rotonda por iteración de nuestro algoritmo, las 8 siguientes componentes nos diran como se moveran los vehículos dentro de la rotonda, tenemos dos casos:

- En el caso sin semáforos estas tienen una restricción de almacenar la capacidad maxima que tiene la rotonda en cada sección.
- En el caso con semáforos estas no tienen una restricción fija ya que la restricción se encuentra en las ultimas 4 componentes, por eso se le asigna en este caso un número mucho mayor a lo que va a entrar a la rotonda.

Por último en las últimas 4 componentes se asigna valores de la siguiente manera:

- En el caso sin semáforos estas tienen una restricción dada por un número aleatorio que nos indica la probabilidad de que un vehículo que entro por alguna de las entradas de la rotonda salga por esa salida.

- En el caso con semáforos estas tienen una restricción dada por el tamaño de la vía que se encuentra fuera de la rotonda, es decir, por donde salen los vehículos, como no consideramos que pasa fuera de la rotonda asignamos esta capacidad como la capacidad mayor de las secciones de la rotonda.

Ahora bien, para hablar de semáforos en nuestro problema y capacidad de elección o no de los vehículos debemos definir unas restricciones adicionales como sigue:

**Caso semáforos norte-sur:**

Para este caso agregamos las restricciones  $\mathbf{e}_1^t \mathbf{x} = 0$  y  $\mathbf{e}_3^t \mathbf{x} = 0$ , con:  $(1 \leq i \leq 16)$

$$\mathbf{e}_k = \begin{cases} 1 & \text{si } i = k \\ 0 & \text{si } i \neq k \end{cases}$$

Para la parte de elección de los autos se toman 4 números aleatorios  $p_1, p_2, p_3, p_4$  tales que su suma sea igual a 1; multiplicando cada número aleatorio dado anteriormente por el número de vehículos que puede ingresar por cada entrada activa obtenemos los valores que van en las últimas 4 componentes de  $\mathbf{F}_2$ .

**Caso semáforos oeste-este:**

Para este caso agregamos las restricciones  $\mathbf{e}_2^t \mathbf{x} = 0$  y  $\mathbf{e}_4^t \mathbf{x} = 0$ , con  $\mathbf{e}_k$  definido igual que anteriormente y analogamente como en el caso anterior se definen las últimas 4 componente de  $\mathbf{F}_2$  de la misma manera que antes.

**Caso sin semáforos:**

Para este caso se hizo nuevamente un plantamiento de las ecuaciones centrales del grafo con la diferencia de que cada arco se representa en términos de sus siguientes dos arcos, de tal forma que los arcos que salen de un nodo son un porcentaje del arco que entra a mismo nodo. Estas ecuaciones se presentan a continuación:

$\begin{aligned} X_{12} &= X_{23} + X_{29} \\ X_{12} &= l_1 X_{12} + l_2 X_{12} \end{aligned}$	$\begin{aligned} X_{34} &= X_{45} + X_{49} \\ X_{34} &= l_3 X_{34} + l_4 X_{34} \\ X_{34} &= X_{03} + X_{23} \\ X_{34} &= X_{03} + l_1 X_{12} \end{aligned}$
$\begin{aligned} X_{56} &= X_{67} + X_{69} \\ X_{56} &= l_5 X_{56} + l_6 X_{56} \\ X_{56} &= X_{05} + X_{45} \\ X_{56} &= X_{05} + l_3 X_{34} \end{aligned}$	$\begin{aligned} X_{78} &= X_{89} + X_{81} \\ X_{78} &= l_7 X_{78} + l_8 X_{78} \\ X_{78} &= X_{07} + X_{67} \\ X_{78} &= X_{07} + l_5 X_{56} \end{aligned}$

Para las ecuaciones anteriores, hay que tener en cuenta que los porcentajes de cada arco están determinados de tal forma que:

$$l_1 + l_2 = 1$$

$$l_3 + l_4 = 1$$

$$l_5 + l_6 = 1$$

$$l_7 + l_8 = 1$$

Esto para garantizar que el flujo siempre sea el mismo.

Ahora haciendo un reemplazo de las ecuaciones con sus respectivos porcentajes se obtiene la ecuación general del grafo que garantiza la conservación del flujo.

$$x_{01} + x_{03}(1 - l_4 - l_6 \cdot l_3 - l_7 \cdot l_5 \cdot l_3) + x_{05}(1 - l_6 - l_7 \cdot l_5) + x_{07}(1 - l_7) - x_{12}(l_2 + l_1 \cdot l_4 + l_6 \cdot l_1 + l_5 \cdot l_3 \cdot l_1) = 0$$

Esta ecuación es tomada como otra restricción del problema de optimización.

De esta manera agregamos la siguiente restricción:

$$\mathbf{d}^t \mathbf{x} = 0, \mathbf{d} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 - l_4 - (l_6 \cdot l_3) - (l_7 \cdot l_5 \cdot l_3) \\ 1 - l_6 - (l_7 \cdot l_5) \\ 1 - l_7 \\ -(l_2 + (l_4 \cdot l_1) + (l_6 \cdot l_1) + (l_5 \cdot l_3 \cdot l_1)) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

#### 4.2.3. Paso 3:

Calcular la capacidad de cada arco del grafo mediante las formulas utilizadas en la teoria de flujo vehicular.

Esta capacidad es calculada por medio del método TRRL con las dimensiones geométricas de las rotondas para determinar los flujos de entradas y salidas de los arcos. Para los arcos dentro de la rotonda se determinaron las áreas de la rotonda y de cada sector de ella (separadores de carril y arcos mayores) ya que cada uno es representado por un arco en el grafo y debe tener una capacidad específica.

A continuación se muestra la capacidad de autos de los arcos dentro de las rotondas:

- Área mayor de separación de carriles:

Área del sector mayor - Área del sector menor

- Área menor de separación de carriles:

Área del sector mayor - Área del sector menor

- Área de los arcos mayores de la rotonda:

$$\frac{\text{Área de la rotonda} - 2(\text{Área mayor de separación de carriles}) - 2(\text{Área menor de separación de carriles})}{4}$$

- Número de autos en área mayor de separación de carriles:

$$\frac{\text{Área mayor de separación de carriles}}{\text{Área promedio de un auto}}$$

- Número de autos en área menor de separación de carriles:

$$\frac{\text{Área menor de separación de carriles}}{\text{Área promedio de un auto}}$$

- Número de autos en los arcos mayores de la rotonda:

$$\frac{\text{Área de los arcos mayores de la rotonda}}{\text{Área promedio de un auto}}$$

- Número total de autos en la rotonda:

$$2(\text{Número de autos en área mayor de separación de carriles}) + 2(\text{Número de autos en área menor de separación de carriles}) + 4(\text{Número de autos en los arcos mayores de la rotonda})$$

#### 4.2.4. Paso 4:

Calcular los tiempos óptimos para los ciclos de los semáforos a utilizar.

**Intervalo de cambio ámbar y todo rojo:** es el tiempo en que cambian los semáforos a rojo y se quedan así por un tiempo corto, esto para que los vehículos que circulan en el interior tengan tiempo de salir, o por lo menos se forme la menor cantidad posible de trancón.

$$y = \left(t + \frac{v}{2a}\right) + \left(\frac{w+l}{v}\right)$$

- $y$  = intervalo de cambio de fase, ámba más todo rojo ( $s$ )
- $t$  = tiempo de percepción-reacción del conductor ( $1s$ )
- $v$  = rapidez de aproximación de los vehículos ( $\frac{m}{s}$ )
- $a$  = tasa de desaceleración ( $3,05\frac{m}{s^2}$ )
- $w$  = ancho de la intersección ( $m$ )
- $L$  = longitud del vehículo ( $6,1m$ )

### Longitud del ciclo

$$C_o = \frac{1,5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^{\varphi} y_i}$$

- $C_0$  = Tiempo óptimo del ciclo ( $s$ ).
- $L$  = Tiempo total perdido por ciclo ( $s$ ).
- $y_i$  = Máximo valor de la relación entre el flujo actual y el flujo de saturación para el acceso o movimiento o carril crítico de la fase  $i$ .
- $\varphi$  = Número de fases.

Cálculo del intervalo de cambio ámba más rojo:

Para hora valle:

$$y = \left(1s + \frac{12,5\frac{m}{s}}{2(3,05\frac{m}{s^2})}\right) + \left(\frac{9m + 6,1m}{12,5\frac{m}{s}}\right)$$

$$y = 3,049s + 0,993s = 4,042s$$

Tomamos  $20\frac{km}{h}$  como la rapidez de aproximación de los vehículos a la rotonda en hora valle.

Para hora pico:

$$y = \left(1s + \frac{5,55\frac{m}{s}}{2(3,05\frac{m}{s^2})} + \frac{9m + 6,1m}{5,55\frac{m}{s}}\right)$$

$$1s + 0,9107s + 2,718s = 4,6287s$$

Cálculo de la longitud del ciclo en hora valle:

$$C_0 = \left(\frac{1,5(8,718) + 5}{1 - \frac{1}{3} - \frac{1}{3}}\right) = \frac{18,077}{\frac{1}{3}} \approx 55s$$



Ciclo total en hora valle (verde más ámbar más rojo):  $55s + 4,1s \approx 60s$

Cálculo de la longitud del ciclo en hora pico:

$$C_0 = \left( \frac{1,5(6,993) + 5}{1 - \frac{1}{3} - \frac{1}{3}} \right) = \frac{15,4895}{\frac{1}{3}} \approx 47s$$

Ciclo total en hora pico (verde más ámbar más rojo):  $47s + 5s = 52s$

- Para el primer cálculo, el de intervalo de cambio rojo más ámbar, los valores a tomar son:  $t=1$  ya que la percepción-reacción por parte del conductor se toma en ese valor por algunos estudios realizados al respecto.
- Tomamos los valores de rapidez de aproximación ( $v$ ) en hora valle y hora pico como  $55 \frac{km}{h}$  y  $20 \frac{km}{h}$  respectivamente. Esto debido a que en hora valle se intenta ir, en promedio, a la rapidez más alta posible, y dado el tráfico bajo, pero existente, esta configuración parece ser apropiada como elección de este ítem. Para hora pico se toma este valor dado que la rapidez de acercamiento es menor por la congestión.
- La tasa de desaceleración es tomada directamente del libro y se acepta como promedio para los vehículos que se acercan a la rotonda.
- El ancho de la intersección es tomado de nuestro caso particular medido en un mapa.
- Por último en esta ecuación, la longitud promedio del vehículo se toma de los datos proporcionados mencionados anteriormente.
- En la segunda ecuación, con la que se encuentra la longitud del ciclo, el tiempo total perdido lo tomamos como sugerencia del libro para horas de mayor o menor tráfico.
- El máximo valor de la relación entre flujo actual y el de saturación, lo tomamos como  $\frac{600}{1800}$  por ser 1800 la cantidad mínima de vehículos necesaria para poner un sistema de semáforos; y 600 un número promedio de entrada de vehículos sugerida por el texto.

#### 4.2.5. Paso 5:

Realizar las iteraciones en el algoritmo Simplex con las diferentes configuraciones para obtener los primeros resultados

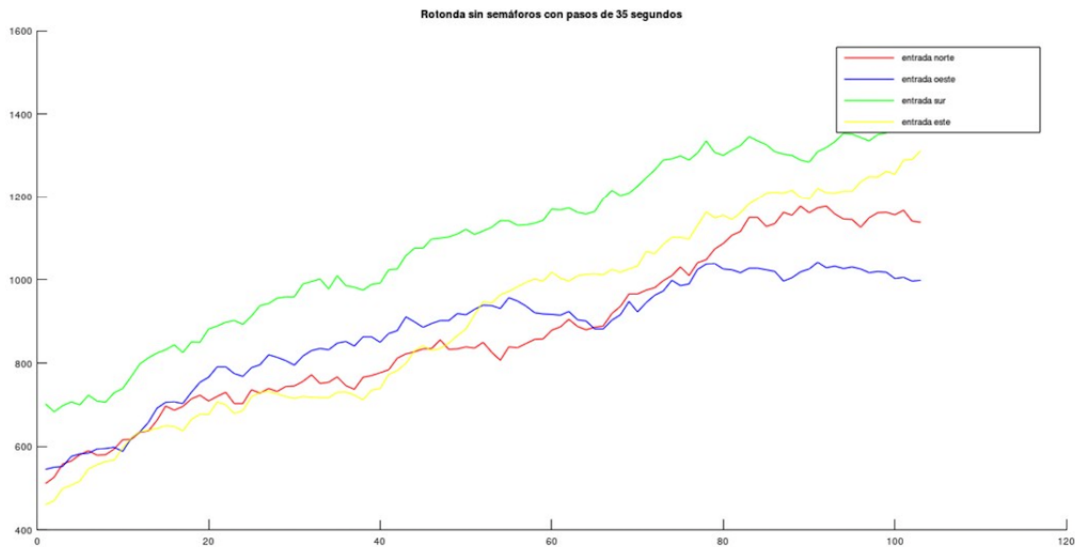
## 5. Resultados

Para obtener los resultados que se van a ver a continuación, el problema de optimización se resolvió iterativamente tantas veces como los cambios de semáforos que hay durante una hora de flujo vehicular en la rotonda.

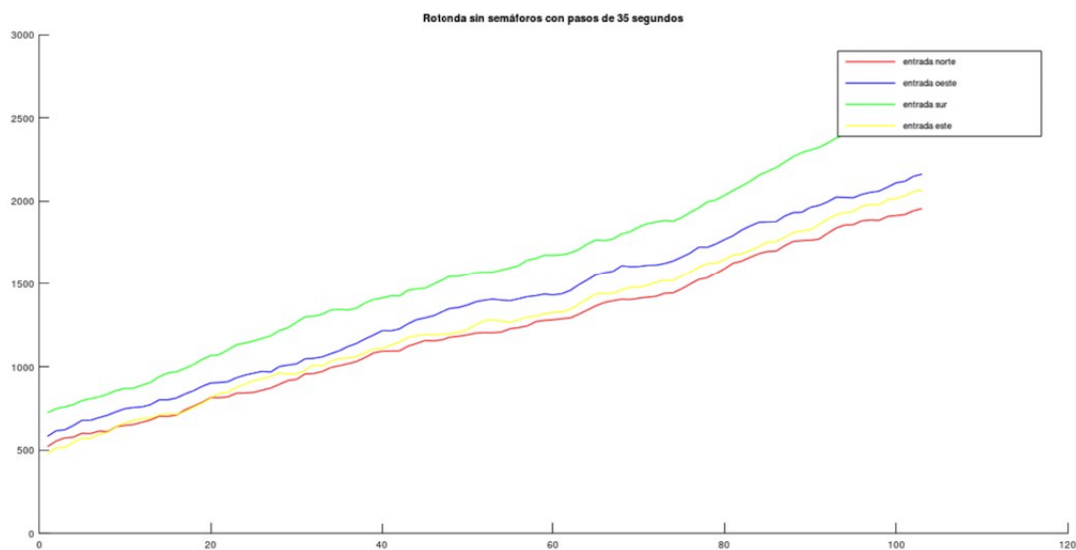
En las gráficas se evidencian los resultados de la iteración versus el número de carros que hay en las entradas, y así podemos ver cuántos carros quedan fuera de la rotonda después de cada iteración.

Debemos tener en cuenta que si la pendiente es positiva, significa que el semáforo está en rojo y hay una acumulación de vehículos en ese punto. Cuando la pendiente es positiva, el semáforo cambió a verde y la cantidad de vehículos descende en esa entrada. Y adicionalmente que en los análisis que se hicieron sin semáforos, el tiempo de cada iteración van igual que con cada tiempo del semáforo para poder hacer una comparación directa con los datos encontrados cuando hay semáforos. Otro punto a tener en cuenta es que cuando la gráfica pasa a números negativos en el eje de las ordenadas, esos valores no aportan nada al flujo, se toman como valores nulos.

### 5.1. Sin el uso de semáforos

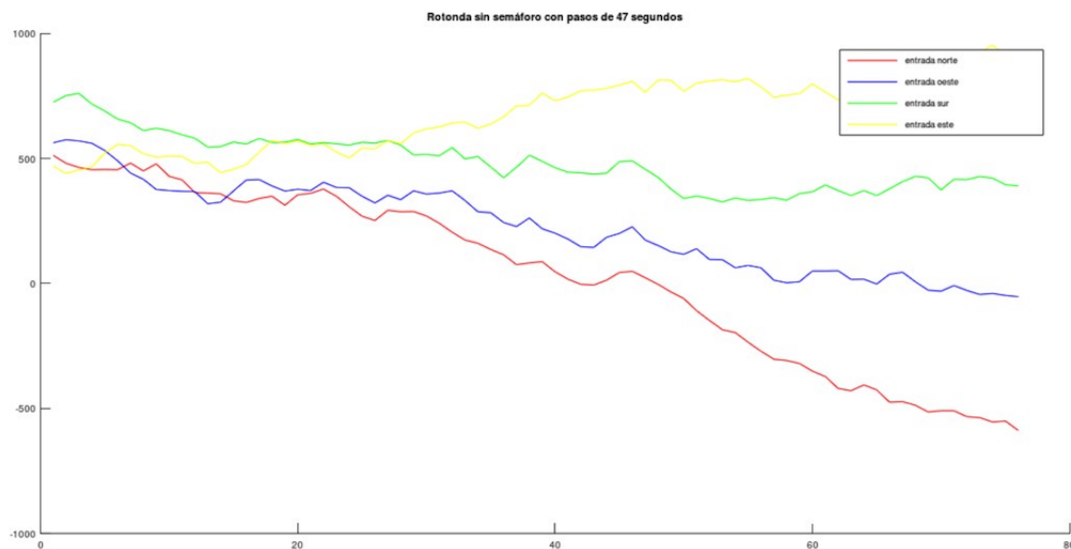


Gráfica 2: Iteración VS flujo en las entradas de la rotonda (Sin uso de semáforo en hora valle )

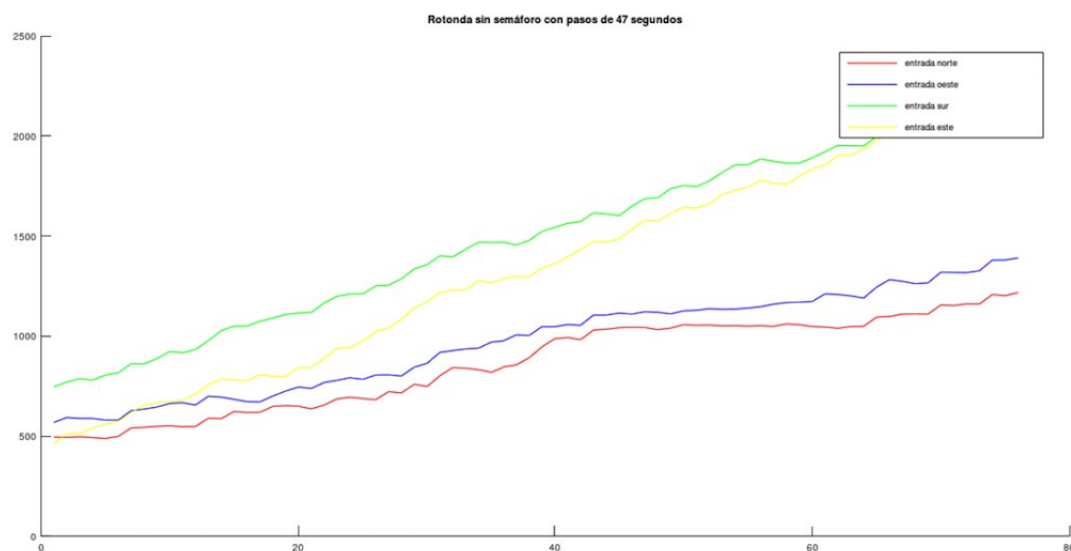


Gráfica 3: Iteración VS flujo en las entradas de la rotonda (Sin uso de semáforo en hora pico )

Sin el uso de semáforos, tanto en hora valle como en hora pico, se evidencia un aumento del flujo vehicular en la rotonda. Específicamente, en hora valle, hay un aumentos de flujo vehicular locales con una tendencia al alza global. Mientras que en horas pico la tendencia es al alza globalmente y no hay bajas locales. Como hay aumento en el flujo vehicular en los dos posibles tipos de configuraciones, esta opción no va a ser considerada.

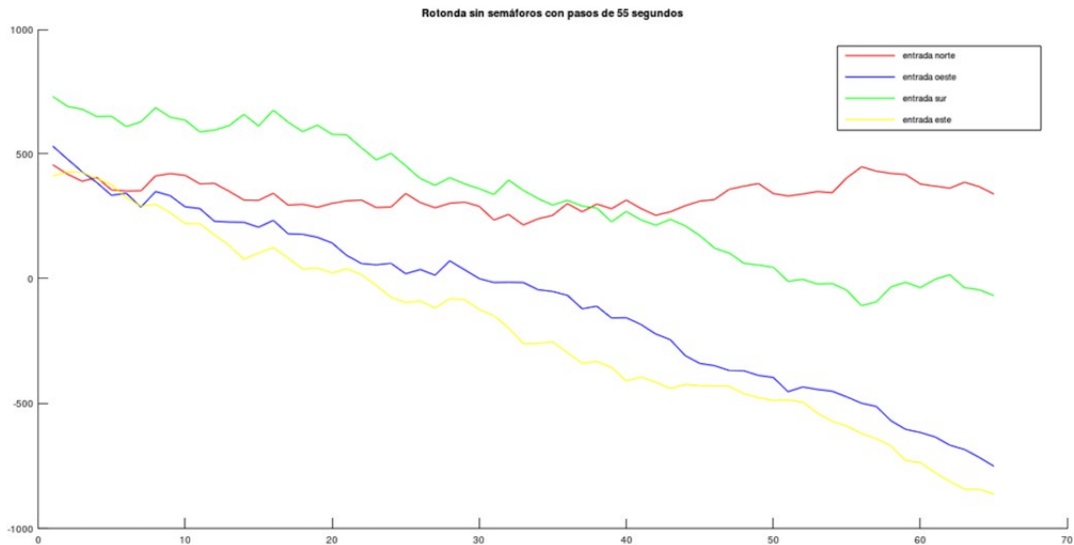


Gráfica 4: Iteración VS flujo en las entradas de la rotonda (Sin uso de semáforo en hora valle )

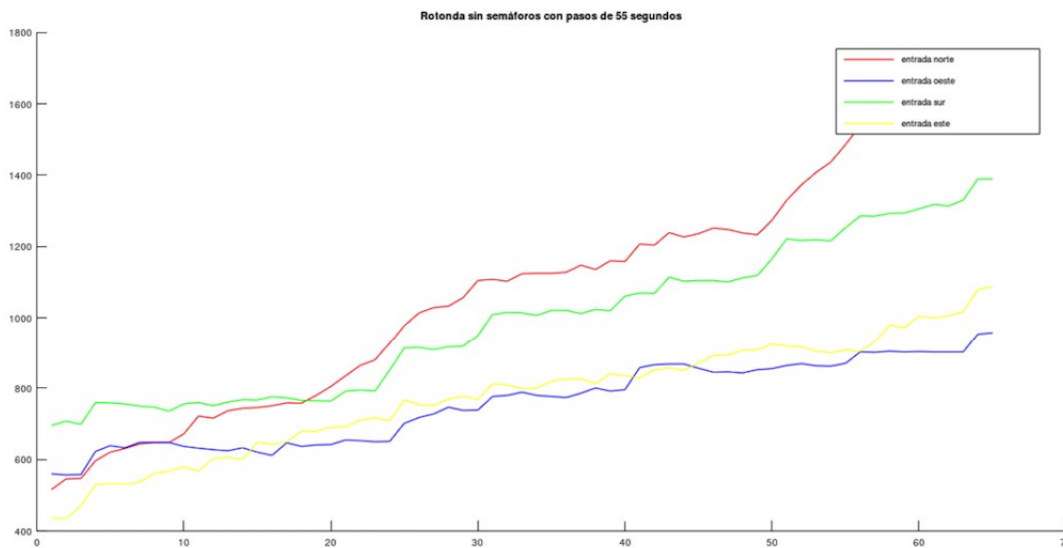


Gráfica 5: Iteración VS flujo en las entradas de la rotonda (Sin uso de semáforo en hora pico )

En la gráfica superior se evidencia una disminución de flujo en las cuatro entradas, con valores nulos en las entradas norte y oeste. Sin embargo, las entradas sur y este siguen presentando congestión vehicular, por lo cual esta configuración es rechazada. En hora pico notamos la tendencia al alza en las cuatro entradas. Con uso aumentado de las entradas sur y este, en comparación de norte y oeste. Por lo tanto, el flujo del modelo no mejora y esta opción se descarta.



Gráfica 6: Iteración VS flujo en las entradas de la rotonda (Sin uso de semáforo en hora valle)

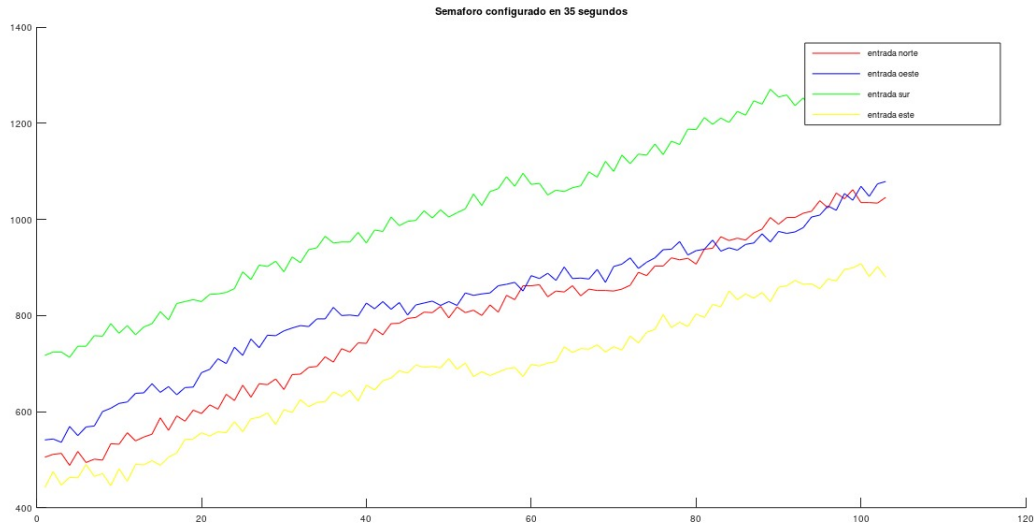


Gráfica 7: Iteración VS flujo en las entradas de la rotonda (Sin uso de semáforo en hora pico)

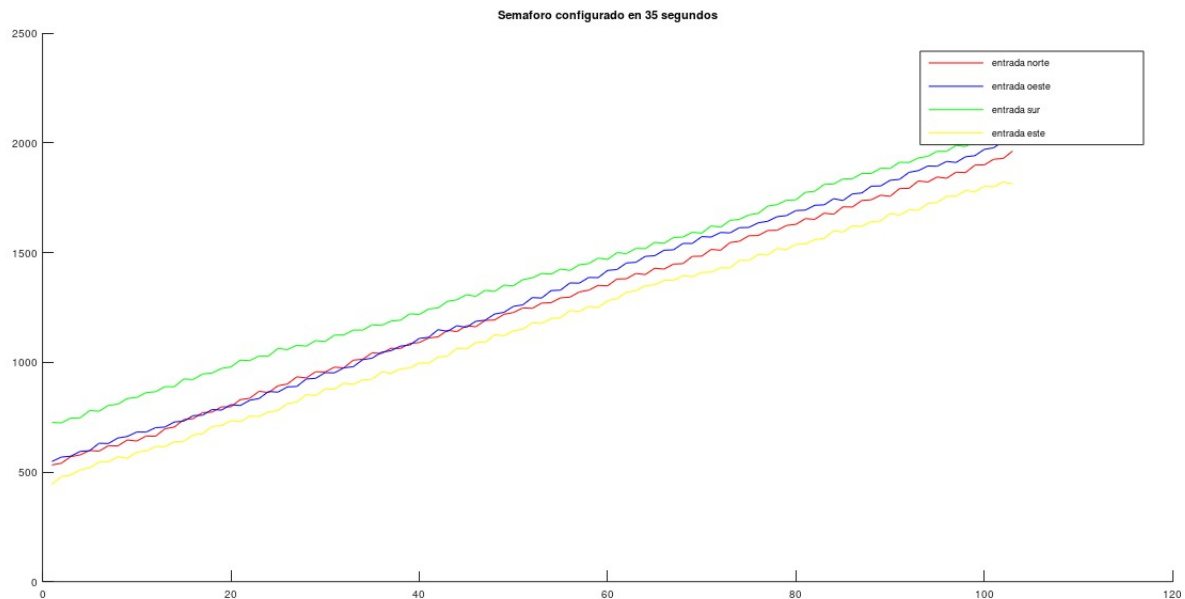
En la gráfica superior notamos la rápida caída de tres de las cuatro entradas que apoyan la idea de no implementar semáforos en las horas valle, ya que los carriles se desocupan rápidamente. Sin embargo, solo una de ellas no se desocupa del todo. Pero de las tres configuraciones es la que mejor flujo presenta. En la hora pico podemos evidenciar un gran aumento de flujo de vehículos en cada entrada, sin esperanzas de vaciarse en un tiempo cercano, una gran tendencia al alza.

Una primera elección de las vistas anteriormente, es la configuración de 55 segundos por iteración, en hora valle. Ya que de las cuatro entradas, tres de ellas logran optimizar su flujo al máximo. Y en la hora pico la mejor configuración a elegir es la de 55 segundos por iteración, dado que la tendencia al alza no es tan marcada en las entradas este y oeste.

## 5.2. Uso de semáforos

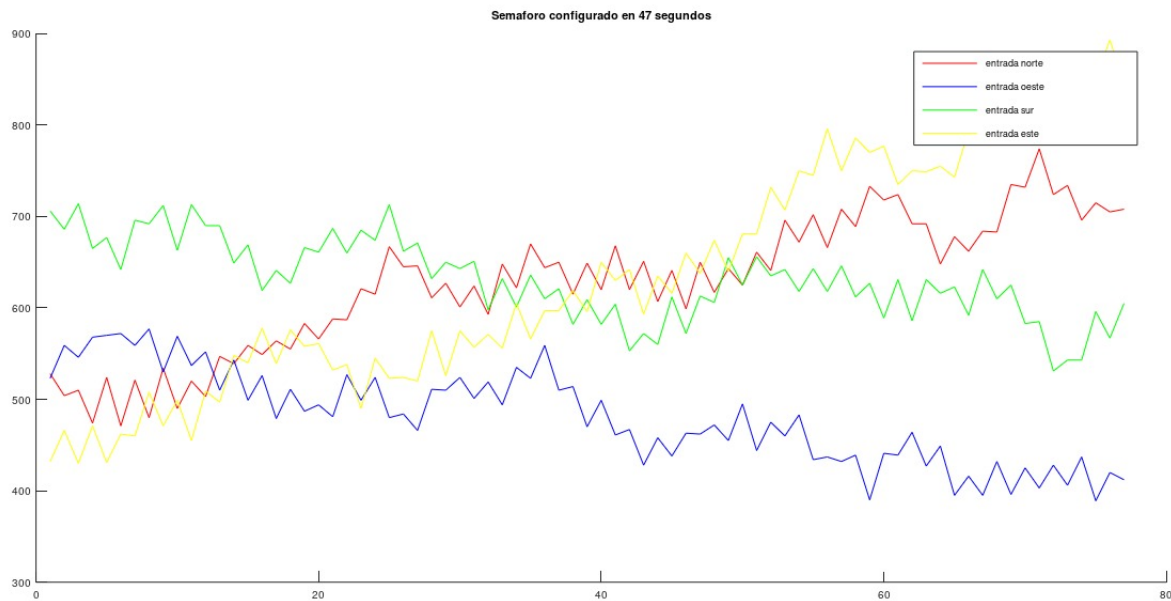


Gráfica 8: **Iteración VS flujo en las entradas de la rotonda** (uso de semáforo con un tiempo de 35s en hora valle)

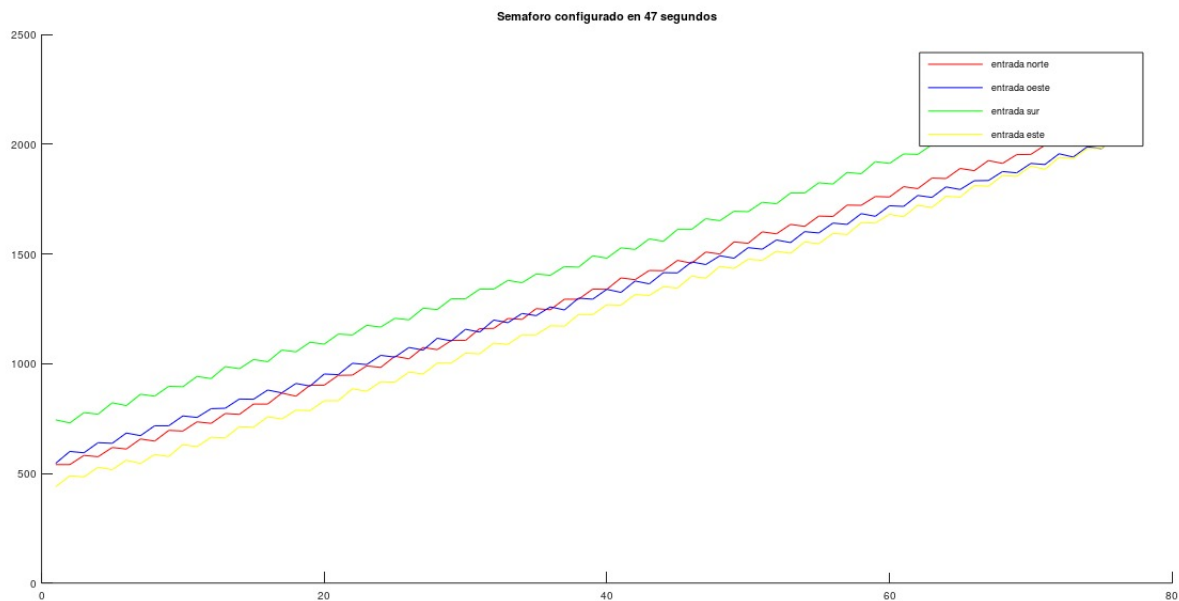


Gráfica 9: **Iteración VS flujo en las entradas de la rotonda** (uso de semáforo con un tiempo de 35s en hora pico)

En ambos casos notamos un aumento de flujo vehicular el cual es proporcional al tiempo, que como se esperaba, incrementa más significativamente en hora pico que en hora valle. Como esta configuración genera congestión vehicular, es rechazada ya que se evidencia un mayor número de picos y, por lo tanto, más congestiones vehiculares en las entradas de forma repetida.

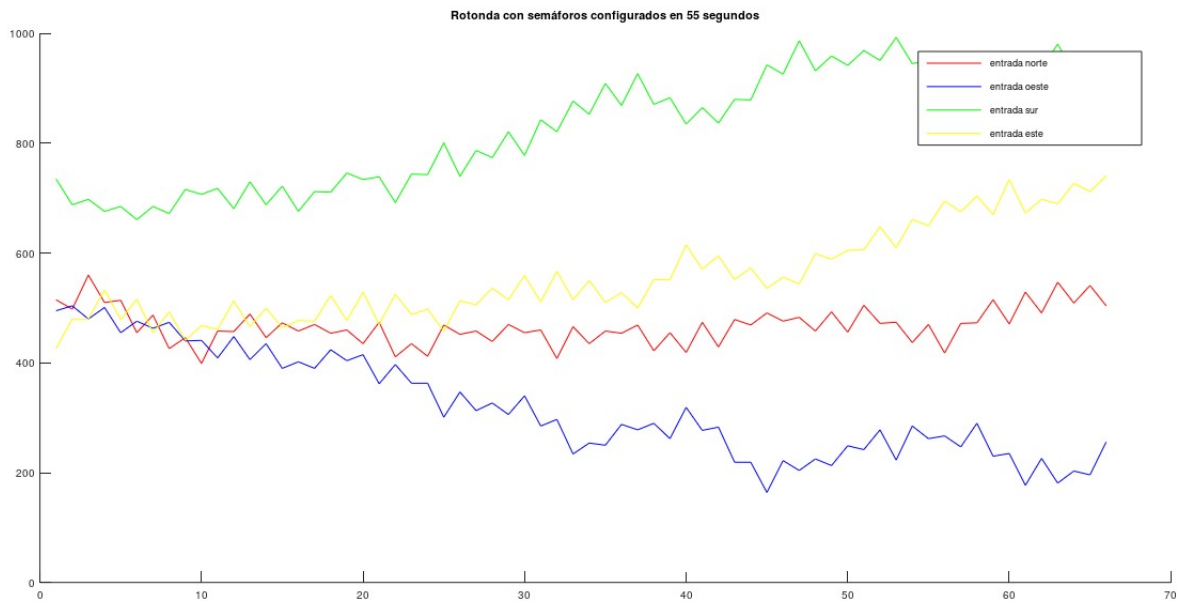


Gráfica 10: **Iteración VS flujo en las entradas de la rotonda** (uso de semáforo con un tiempo de 47s en hora valle)

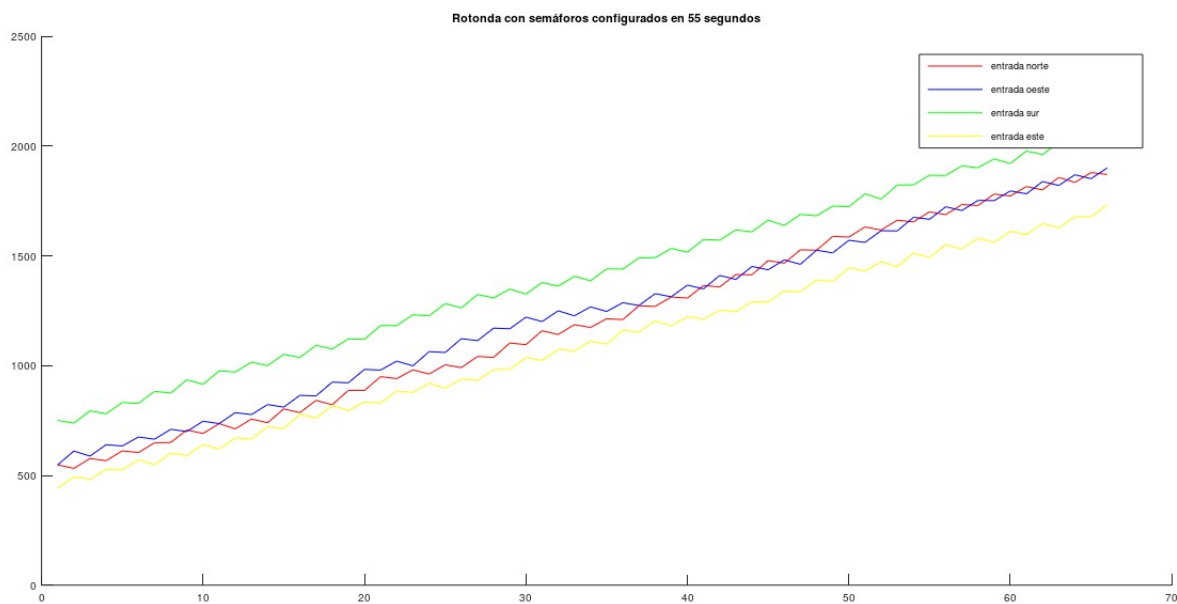


Gráfica 11: **Iteración VS flujo en las entradas de la rotonda** (uso de semáforo con un tiempo de 47s en hora pico)

En la hora valle se evidencia que las entradas norte y este tienen un aumento en el flujo vehicular. En hora pico el flujo vehicular de todas las entradas tiene una tendencia de aumento lineal. Esta configuración es rechazada ya que dos entradas de la rotonda en hora valle tienen un aumento de congestión vehicular, lo cual no cumple con los objetivos del modelo.



Gráfica 12: **Iteración VS flujo en las entradas de la rotonda** (uso de semáforo con un tiempo de 55s en hora valle)



Gráfica 13: **Iteración VS flujo en las entradas de la rotonda** (uso de semáforo con un tiempo de 55s en hora pico)

En la hora valle el flujo de entrada de cada punto cardinal es muy distanciado, en especial en las entradas oeste y sur. Esto nos informa que en la entrada sur se van a presentar una gran cantidad de vehículos, mientras que en la entrada oeste la cantidad es mucho menor. Sin embargo, la rotonda va a llenarse por cuenta de esa entrada que recibe la mayor cantidad de vehículos y se va a congestionar en su interior. En hora pico la tendencia, aunque al alza, se mantiene muy estable respecto a las cuatro entradas. Por eso, el número de vehículos no aumenta de forma abrupta en alguna de las cuatro entradas, pero aumenta de forma casi lineal en cualquiera de las entradas. Por ello no habrá colapso en el interior.

## 6. Aplicación

Nuestro modelo fue aplicado a la rotonda de la calle 63 con carrera 60 de la ciudad de Bogotá, con el fin de evidenciar la diferencia del flujo vehicular con y sin semáforos en esta zona de la ciudad. Para esto se utilizaron datos empíricos obtenidos de un estudio realizado por la facultad de ingeniería de la universidad Santo Tomas de Aquino, los cuales proporcionan información geométrica de la rotonda utilizados para calcular la capacidad de vehiculos en las entradas y dentro de la rotonda.

Caracterización Geométrica									
		Cuadrante Norte - Este	Observaciones	Cuadrante Norte - Oeste	Observaciones	Cuadrante Sur - Este	Observaciones	Cuadrante Sur - Oeste	Observaciones
Ángulo de entrada	$\alpha$ (°)	32		60		55		30	
Radio de entrada	$r$ (m)	101,26	Calzada anular	35,34	Calzada anular	32,28	Calzada anular	103,33	Calzada anular
Ancho de entrada	$e$ (m)	10,07	Calle 63	11,15	Carrera 60	10,93	Calle 63	9,95	Calle 63
Semi ancho de la rama	$v$ (m)	7,19		6,98		7,325		6,93	
Longitud de entrecruzamiento	(m)	92,83	Entre Calle 63 Este y carrera 60 Norte	37,56	Entre Carrera 60 Norte y Calle 63 Este	39,93	Entre Carrera 60 Sur Y Calle 63 Este	92,1	Entre Calle 63 Oeste y Carrera 60 Sur
Ángulo de salida	$\alpha'$ (°)	30		58		62		31	
Radio de salida	$r'$ (m)	84,02		35,34		32,28		125,95	
Ancho de salida	$e'$ (m)	10,07		11,15		32,28		9,95	
Semi ancho de la rama	$v$ (m)	7,19		6,98		7,325		6,93	
Longitud de entrecruzamiento	$L$ (m)	92,83		37,56		7,325		92,1	

Tabla 2: Medidas geométricas de la rotonda de la calle 63 con carrera 60, Bogotá

Posteriormente se modeló la rotonda con sus respectivas medidas para obtener información sobre la capacidad máxima de vehículos que pueden estar dentro de ella.

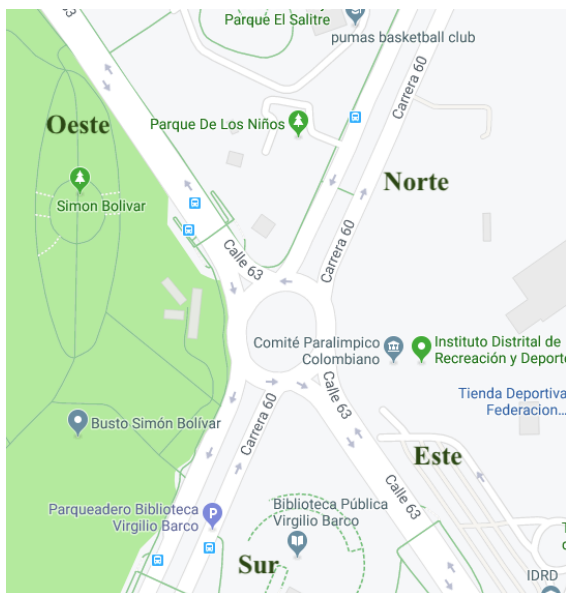


Figura 1: Vista GPS de la rotonda de la calle 63 con carrera 60, Bogotá

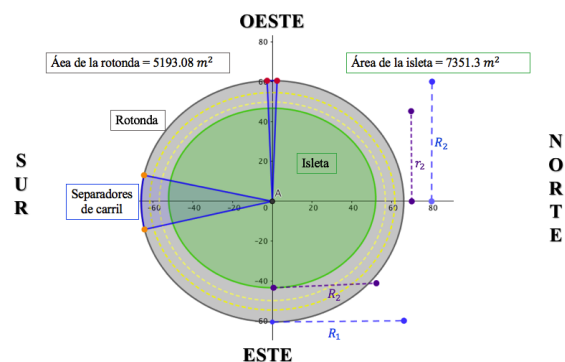


Figura 2: Modelación y geometría de la rotonda de la calle 63 con carrera 60, Bogotá (realizados con geogebra)

Después de haber modelado la rotonda y de utilizar los datos geométricos de la misma, se utilizó el método TRRL (explicado anteriormente) para encontrar los flujos de entrada y salida de la rotonda.



	Variables	Cuadrante Norte - Este	Cuadrante Norte - Oeste	Cuadrante Sur - Este	Cuadrante Sur - Oeste
Entrada	k	1,03230169	0,917125976	0,931852602	1,039435179
	s	0,04963913	0,177635783	0,144452792	0,052464712
	X2	9,80990083	10,05687412	10,12194653	9,663206242
	F	2972,39995	3047,232857	3066,949798	2927,951491
Flujo de entrada de las ramas		KF (Carros)	3068,41351	2794,696409	2857,94515
Salida	k	0,84981051	0,924065976	0,907562602	1,037665014
	s	0,04963913	0,177635783	5,450921502	0,052464712
	X2	9,80990083	10,05687412	9,421734093	9,663206242
	F	2972,39995	3047,232857	2854,78543	2927,951491
Flujo de Salida de las ramas		KF (Carros)	2525,97673	2815,844205	2590,896494

Tabla 3: Flujos de entrada y salida de la rotonda de la calle 63 con carrera 60, Bogotá

En seguida se hizo un modelamiento de las secciones de la rotonda que equivalen a los separadores de carril de las entradas y salidas para determinar su capacidad de automoviles, la cual es indispensable para nuestro modelo ya que cada sección de la rotonda es representado como un arco que tiene su propia capacidad.

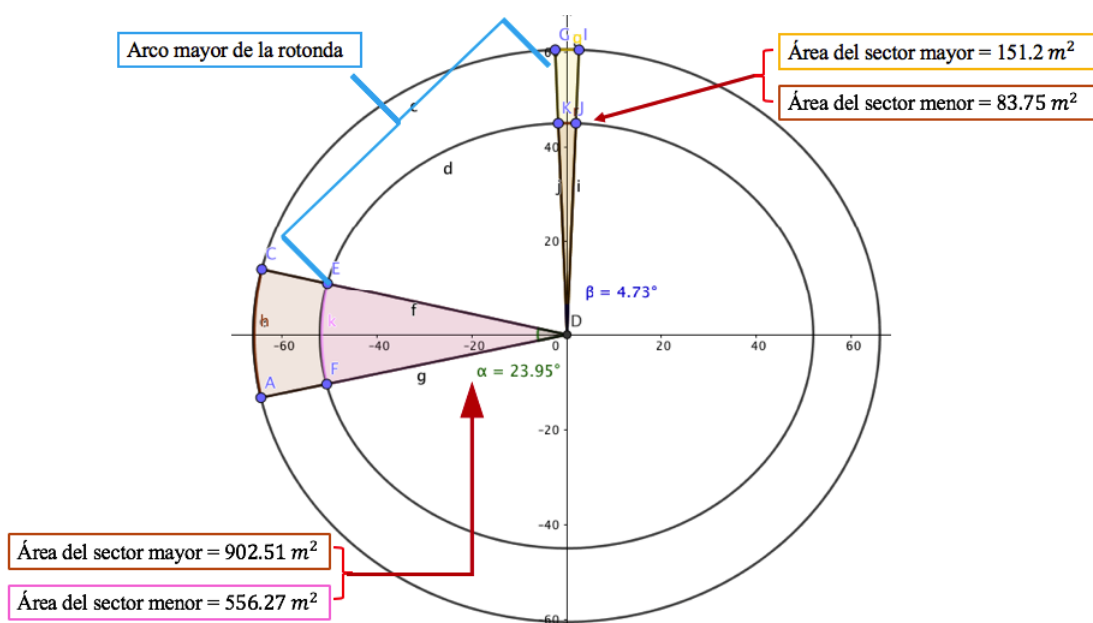


Figura 16: Análisis gráfico del área de los separadores de carril de la rotonda de la calle 63 con carrera 60 en Bogotá

Los resultados de las áreas y capacidades de la rotonda obtenidas fueron:

- Área mayor de separación de carriles:  
 $\text{Área del sector mayor} - \text{Área del sector menor} = 902,51m^2 - 556,27m^2$  Área mayor de separación de carriles =  $346,24m^2$
- Área menor de separación de carriles:  
 $\text{Área del sector mayor} - \text{Área del sector menor} = 151,2m^2 - 83,75m^2$  Área mayor de separación de carriles =  $67,45m^2$
- Área de los arcos mayores de la rotonda:  

$$\frac{\text{Área de la rotonda} - 2(\text{Área mayor de separación de carriles}) - 2(\text{Área menor de separación de carriles})}{4}$$

$$= \frac{5193,08m^2 - 2(346,24m^2) - 2(67,45m^2)}{4} = 1091,425m^2$$

- Número de autos en área mayor de separación de carriles:  

$$\frac{\text{Área mayor de separación de carriles}}{\text{Área promedio de un auto}} = \frac{346,24m^2}{12m^2} = 29\text{Autos}$$
- Número de autos en área menor de separación de carriles:  

$$\frac{\text{Área menor de separación de carriles}}{\text{Área promedio de un auto}} = \frac{67,45m^2}{12m^2} = 6\text{Autos}$$
- Número de autos en los arcos mayores de la rotonda:  

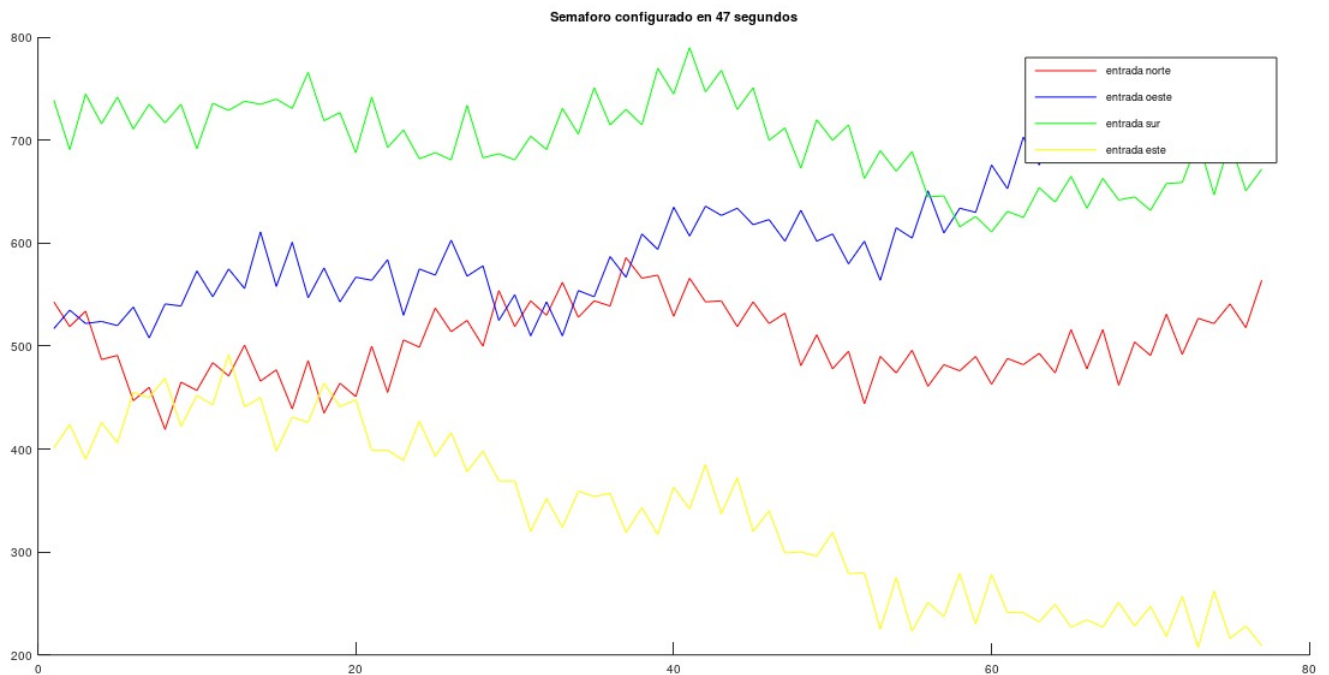
$$\frac{\text{Área de los arcos mayores de la rotonda}}{\text{Área promedio de un auto}} = \frac{10912,424m^2}{12m^2} = 91\text{Autos}$$
- Número total de autos en la rotonda:  

$$2(\text{Número de autos en área mayor de separación de carriles}) + 2(\text{Número de autos en área menor de separación de carriles}) + 4(\text{Número de autos en los arcos mayores de la rotonda})$$

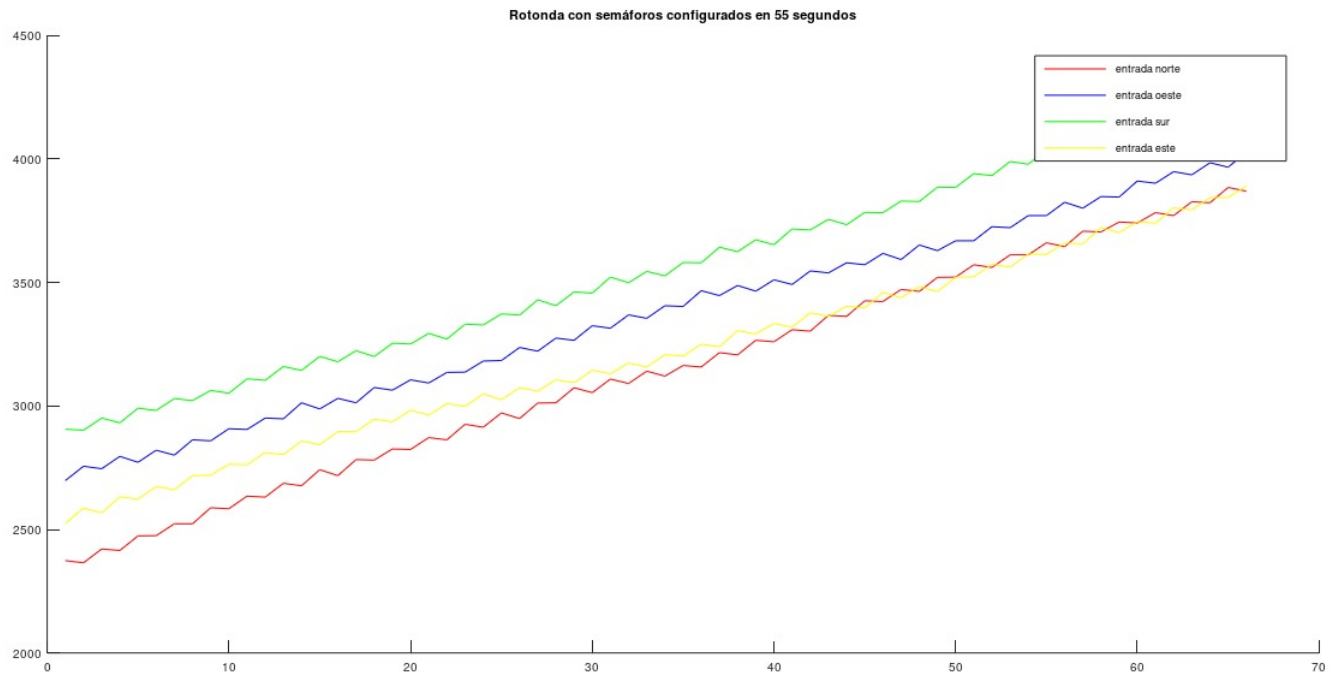
$$= 2(29) + 2(6) + 4(91) = 434\text{Autos}$$

## 7. Solución

Aplicando nuestro modelo de flujo máximo a la rotonda de la calle 63 con carrera 60, teniendo en cuenta sus restricciones geométricas y de capacidad en sus ramas, se obtiene que:



Gráfica 14: Análisis del flujo vehicular de la rotonda de la calle 63 con carrera 60 en hora valle con semaforización



Gráfica 15: Análisis del flujo vehicular de la rotonda de la calle 63 con carrera 60 en hora pico con semaforización

Mostrando que el flujo vehicular con las capacidades específicas de esta rotonda tiene el mismo comportamiento que nuestras simulaciones hechas con datos aleatorios.

## 8. Conclusión

- Se elige como mejor configuración para hora valle la opción tres de 55 segundos por iteración. Ya que de las cuatro entradas, tres de ellas logran optimizar su flujo al máximo. Y en la hora pico la mejor configuración a elegir es la de 55 segundos por iteración, dado que la tendencia al alza no es tan marcada en las entradas este y oeste.
- Escogemos para hora valle la segunda configuración, correspondiente a 47 segundos por ciclo total de semáforo. Esto debido a que la cantidad de vehículos que ingresan es la menor de las tres simulaciones.
- Teniendo en cuenta que nuestro modelo es macroscópico, cuando la rotonda se vacía por completo, como es el caso de la elección de la configuración sin semáforos, no se están tomando en cuenta factores como accidentes dentro de la rotonda, atrevimientos de los conductores, etc. Y en hora pico, con semáforos el flujo vehicular es más uniforme y con esto será más comodo transitar por la rotonda a pesar del alto flujo vehiicular. Por lo tanto para una mayor seguridad y uniformidad del flujo dentro de la rotonda, se decide usar los semáforos de la siguiente manera:
  - Para hora valle, tomamos la segunda configuración que corresponde a 47 segundos por ciclo total de semáforo.
  - Para hora pico, tomamos la tercera configuración que corresponde a 55 segundos por ciclo total de semáforo.

### 8.1. Ventajas

- Los resultados nos muestra cuál es la mejor ubicación de los semáforos dentro de una rotonda.
- Se obtiene la mejor configuración de los tiempos y sincronización de los semáforos para una mejor circulación en la rotonda.

- Ayudara a evitar la congestión vehicular dentro de la rotonda debido al exceso de demanda afuera de la rotonda.
- Al ser un modelo de nivel macroscópico describe la posición o estado físico concreto de las partículas (los vehículos) que facilita la observación de su comportamiento en la rotonda.
- Las graficas permiten ver lo que sucede en las entradas de la rotonda, que garantiza saber cuantos carros se acumulan en las colas de las entradas y que disminuye.

## 8.2. Desventajas

- El modelo hasta el momento solo toma en cuenta las rotondas normales, por lo cual no puede ser utilizado en los diferentes tipos de rotondas que existen actualmente.
- Al suponer que todos los que utilizan la rotonda son buenos conductores, no se tienen casos particulares que se ven en la vida real: (accidentes, puntos criticos en intersecciones de la rotonda, etc) que pueden ser un factor muy influyente en el flujo de la rotonda.
- Como existen varios tipos de rotonda, obliga a que el programa sea modificado ,por lo cual se tiene que iniciar desde el primer paso que es diseñar un grafo que lo represente y realizar un nuevo programa.

## Referencias

- [1] Taha, H. A. (2008) *The T<sub>E</sub>X Book*, Investigación de operaciones, 5 edición. Arkansas, Falletteville: Alfaomega.
- [2] Gasulla, M. M. (Julio de 2012), Estudio y mejora de la capacidad y funcionalidad de glorietas con flujos de tráfico. descompensados mediante microsimulación de tráfico. Catalunya, España.
- [3] Ruiz, M. (2019), Modelos Matemáticos. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- [4] Kenneth H. Rose, e. i. (2000), Handbook of discrete and combinatorial mathematics. CRC Press Boca Raton London New York Washington, D.C.
- [5] Jonathan L. Gross, J. Y. (2005), Discrete Mathematics and its applications. Chapman Hall/CRC, Taylor Francis Group. Recomendaciones para el diseño de glorietas en carreteras suburbanas. (s.f.). Madrid, España: Comunidad autonoma madrid, servicio de documentación y publicación.
- [6] Nesetril, J. M. (2008), Invitación a la matemática discreta. Reverte.
- [7] Pacheco, D. Y. (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, facultad de ingeniería. Escuela de ingeniería civil en obras civiles.
- [8] Gibson, J. (2011), Teoría de flujos vehiculares, notas de clase. Universidad de Chile, división ingeniería y transporte. FHWA. (2000). Rotondas moderna, guía informativa.
- [9] Sosa, P., Dueñas, I. (2018), Estudio comparativo entre una glorieta target y una glorieta convencional por medio de su diseño geometrico y microsimulaciones de trafico como altenativo a las intersecciones vial en Bogotá.Universidad Santo Tomas De Aquino,Facultad de ingenieria,Maestria en Infraestructura Vial.Bogotá.
- [10] Pulido, P,Gomez, M. (2018), Evaluación de la capacidad y nivel de servicios de la glorieta ubicada en la calle 63 con carrera 50 en Bogotá D.C., por medio de metodos no convencionales. Universidad La Gran Colombia, Facultad de Ingenieria Civil.Bogotá D.C.
- [11] Lluch,C (2011). Universitat Politècnica de València-UPV, (22/09/2011). Curso Teoría básica de grafos y análisis de 4 conocimientos problemas|Universitat Politècnica de València-UPV. <https://www.youtube.com/playlist?list=PL5098BF5A01819B3B>

- [12] Moncada,E. Castillo,D (2017).Evaluación de propuesta de evolución de intersección semaforizada a glorieta.Universidad Catolica de Colombia,Facultad de Ingenieria,Programa de Ingenieria Civil,Trabajo de grado.
- [13] ANDEMOS. <http://www.andemos.org/>.
- [14] Real Decreto 1428/2003, de 21 noviembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Circulación para la aplicación y desarrollo del texto articulado de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial, aprobado por el Real Decreto Legislativo 339/1990, de 2 de marzo de 1990.