

OTIMIZAÇÃO SEMAFÓRICA DE CRUZAMENTOS DA CIDADE DE SANTOS-SP: REDUÇÃO DE ATRASOS E GRAU DE SATURAÇÃO

Mariana de Moraes Ribeiro Lião

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Cubatão,
SP, Brasil

Lucas de Oliveira Dalbeto

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Cubatão,
SP, Brasil

Giovanna Nakamura Pinto

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Cubatão,
SP, Brasil

Glauber Renato Colnago

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Cubatão,
SP, Brasil

Resumo: Em horários de pico, cruzamentos na cidade de Santos enfrentam um fluxo intenso de veículos resultando em atrasos e congestionamento na região. Em virtude disso, este trabalho visa encontrar uma solução para o problema observado, que é minimizar o tempo de atraso e as paradas sofridas por veículos, otimizando o grau de saturação, através da definição do tempo de verde do semáforo para cada um dos três cruzamentos estudados. Para isso, foi feita uma coleta de dados, a formulação matemática como um problema de programação não linear inteira mista e a utilização do Solver do Excel com o método de solução GRG Não Linear para resolvê-lo. Os resultados mais eficientes mostraram melhoras aproximadas de 20% a 30% no grau de saturação no modelo otimizado em relação ao executado atualmente no horário de pico.

Palavras-chave: Fluxo de veículos. Tráfego. Cruzamentos.

Abstract: At rush hour, crossroads in Santos City have to confront with an intense vehicle flow resulting in delays and traffic in the region. Because of that, we propose an optimization math model that decides the green time of the traffic light for each route to minimize the delay time and stops suffered by vehicles, optimizing the degree of saturation. For this, data about the streets studied were collected, the mathematical formulation as a mixed integer nonlinear programming problem was did, and it was used the Excel Solver to solve the problem with Nonlinear GRG solution method. The most efficient results showed improvements of 20% to 30% in the degree of saturation in the optimized model in relation to the one currently executed at rush hours.

Keywords: Vehicles flow. Urban Traffic. Crossroad.

INTRODUÇÃO

Atualmente, no Brasil, o transporte veicular é o meio mais utilizado pelas pessoas para se locomoverem. Uns dos grandes benefícios de utilizá-lo é o fato de ser um transporte rápido e, de forma geral, seguro (LACORTT, M et al, 2013).

Quando se iniciou a utilização deste meio de transporte, havia ainda um pequeno número de veículos nas ruas, porém com o passar dos anos esse número aumentou e começou a formação de filas e congestionamentos, principalmente nas grandes cidades. Além disso, houve um aumento do número de acidentes envolvendo os veículos e os pedestres, e assim justificou-se a necessidade de se utilizar algo para tentar minimizar esses problemas, os semáforos (KORTZ, 2010).

Eles são essenciais para ter-se um bom controle de tráfego, porém em alguns deles nota-se que em alguma das vias do cruzamento forme filas (o que acarreta em um atraso no tempo do percurso das pessoas), enquanto a outra via permanece livre por um determinado período de tempo.

Dessa forma deixa-se de aproveitar o tempo máximo disponível pelo semáforo, e com isso surge a motivação do trabalho, que é a otimização desse tempo de ciclo numa região da cidade de Santos onde nota-se que ocorre este problema, minimizando o tempo de atraso e as paradas sofridas pelos veículos, otimizando o grau de saturação da via, e assim encontrando o tempo ótimo de verde do semáforo.

O trabalho divide-se então da seguinte forma: a próxima seção apresenta a fundamentação teórica do problema, onde são expostos informações de Engenharia de Tráfego, o embasamento matemático e a formulação matemática do problema, assim como os dados do estudo de caso pesquisado. Na sequência são apresentados os resultados e, por fim, as conclusões.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

MODELOS MATEMÁTICOS

Na literatura encontram-se trabalhos similares a esse, que partem da mesma motivação a fim de se encontrar o melhor resultado possível. A fórmula base para se determinar essa otimização foi baseada em no trabalho de LACORTT, M et al (2013). A objetivo do problema trata-se da minimização de atrasos e números de paradas dos veículos e é apresentada na sequência:

$$MIN \sum_{i=1}^{n_c} (AU_i + AL_i + P_i) \quad (1)$$

Onde:

n_c : Número de cruzamentos;

AU_i : Atraso médio uniforme do cruzamento i ;

AL_i : Atraso médio aleatório do cruzamento i ;

P_i : Número de paradas sofridas por um veículo no cruzamento i .

O AU_i pode ser representado da seguinte maneira:

$$AU_i = \frac{C \left(1 - \frac{g_i}{C}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{q}{S} \frac{g_i}{C} \cdot \frac{g_i}{C}\right)\right)} \quad (2)$$

O AL_i pode ser substituído por:

$$AL_i = \frac{\left(\frac{q}{S \frac{g_i}{C}}\right)^2}{4 \left(1 - \frac{q}{S \frac{g_i}{C}}\right)} \quad (3)$$

E o P_i é dado como:

$$P_i = \frac{1 - \frac{g_i}{C}}{1 - \frac{q}{S}} \quad (4)$$

Onde:

- C: Tempo de ciclo;
- g : Tempo de verde;
- S: Fluxo de saturação;
- q : Fluxo veicular.

Outro conceito importante do trabalho e que será utilizado nas restrições é o grau de saturação (X), ele representa o quanto o fluxo veicular está perto da capacidade horária de escoamento. Quando esse valor for maior que 1, representa que a demanda veicular está maior que essa capacidade (o que leva a uma formação de filas), já quando esse valor for menor que 1, representa que há um período no tempo de verde em que não passa carros (LACORTT, M et al, 2013). O grau de saturação pode ser representado da seguinte forma:

$$X = \frac{q}{C_p} \quad (5)$$

Onde C_p é a capacidade que uma aproximação pode atender, sendo sua fórmula:

$$C_p = S \cdot \left(\frac{g_{ef}}{C}\right) \quad (6)$$

No qual g_{ef} é o tempo de verde efetivo.

Além disso, precisa-se saber o que é o tempo perdido por ciclo (T_p), pois será outro conceito utilizado ao longo do trabalho. Ele é considerado como a soma dos tempos de amarelo, sendo que o tempo a ser adotado no amarelo varia de acordo

com a velocidade da via: $3s \leq 50\text{km/h}$, $50\text{km/h} < 4s \leq 80\text{km/h}$, $5s > 80\text{km/h}$ (LACORTT, M et al, 2013).

PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR INTEIRA

Para desenvolver o projeto é necessário conhecer em qual processo de resolução o trabalho irá se encaixar e qual software será utilizado, já que isso é essencial para conseguir resolvê-lo corretamente.

Para saber isso, precisa-se observar a função objetivo e as funções de restrição, dependendo da natureza delas o problema será classificado de diferentes formas. Como o problema possui relações não lineares e as variáveis são inteiras, então trata-se de um problema de programação não-linear inteira mista (FERNANDES, 2014).

Para a resolução do problema, foi escolhido o Solver do Excel e foi utilizada o método GRG Não Linear (Gradiente Reduzido Generalizado).

DESENVOLVIMENTO

Para o desenvolvimento do projeto foi escolhido como rua principal a Oswaldo Cruz com cruzamentos com as ruas Nabuco de Araújo - cruzamento 1 -, Dr. Lobo Viana - cruzamento 2 - e Bento de Abreu - cruzamento 3 - (Figura 1), pois é uma região que está próxima de um grande centro universitário onde, no horário de pico (perto do início da aula noturna), tem um fluxo mais intenso que o normal, causando incômodo aos motoristas. O maior problema desses cruzamentos é que nesses horários de pico (18h30 às 19h30) algumas vias possuem fluxo intenso, enquanto outras vias ficam quase vazias e o tempo programado do ciclo não condizem com esse equilíbrio de fluxo.

Para isso, foram necessários alguns dados como largura da rua, fluxo veicular e tempo do ciclo das 6 ruas que participam dos 3 cruzamentos estudados. Estas informações foram obtidas através de medições feitas no local (Tabela 1). Os dados de fluxo veicular foram obtidos em período de fluxo intenso no local, das 18h30 às 19h30.



Fonte: Google Maps (2019)

Tabela 1 – Dados obtidos das vias em estudo

	Cruzamento 1		Cruzamento 2		Cruzamento 3	
	Oswaldo Cruz	Nabuco de Araújo	Oswaldo Cruz	Dr. Lobo Viana	Oswaldo Cruz	Bento de Abreu
Largura da via (m)	4,2	4,67	4,2	4,8	4,2	6,3
Tempo verde (s)	60	50	44	82	55	57
Tempo Vermelho (s) + Tempo de Pedestre	66	76 (sendo 16s para pedestre)	82	44	71	69 (sendo 14s para pedestre)
Tempo Amarelo (s)	4	4	4	4	4	4
Tempo do Ciclo (s)	130	130	130	130	130	130
Fluxo veicular (veic/h)	824	1137	873	1306	706	1795

Fluxo de Saturação	2205	2452	2205	2520	2205	3150
--------------------	------	------	------	------	------	------

Fonte: Criado pelos autores.

Para a resolução do problema, substituiu-se (2), (3) e (4) em (1), obtendo o objetivo (7):

$$MIN \sum_{i=1}^{n_c} \frac{C \left(1 - \frac{g_i}{C}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{q}{S} \frac{g_i}{C}\right)\right)} + \frac{\left(\frac{q}{S} \frac{g_i}{C}\right)^2}{4 \left(1 - \frac{q}{S} \frac{g_i}{C}\right)} + \frac{1 - \frac{g_i}{C}}{1 - \frac{q}{S}} \quad (7)$$

$$s. a \quad T_p \leq g_i \leq C \quad (8)$$

Como em cada cruzamento existem duas ruas, existirão dois valores de g , S e q por cruzamento. Assim, encontrando o tempo de verde ótimo para as 2 vias de cada cruzamento separadamente, o tempo de vermelho será definido pelo tempo de verde da outra via do cruzamento com acréscimo do sinal dos pedestres quando houver:

$$MIN \sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^2 \frac{C \left(1 - \frac{g_{ij}}{C}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{q_{ij}}{S_{ij}} \frac{g_{ij}}{C}\right)\right)} i + \frac{\left(\frac{q_{ij}}{S_{ij}} \frac{g_{ij}}{C}\right)^2}{4 \left(1 - \frac{q_{ij}}{S_{ij}} \frac{g_{ij}}{C}\right)} i + \frac{1 - \frac{g_{ij}}{C}}{1 - \frac{q_{ij}}{S_{ij}}} i \quad (9)$$

$$s. a \quad T_p \leq g_{ij} \leq C - T_{amarelo} \quad (10)$$

$$X_{ij} \leq 1 \quad (11)$$

$$g_{ij} \in \mathbb{Z} \quad (12)$$

$$g_{i1} + g_{i2} + T_{pedestre} = C - T_{amarelo} \quad (13)$$

A restrição (10) garante que o tempo de verde seja maior que o tempo perdido e menor que o tempo do ciclo desconsiderando o tempo de amarelo que é fixo para a via.

A restrição (11) força que o grau de saturação, que é definido em função do tempo de verde, seja menor que 1 para garantir a passagem de todos os veículos.

A restrição (12) nos dá tempos de verde inteiros pelo fato de estarmos trabalhando em segundos e não haver a necessidade de uma precisão maior.

A restrição (13) é a responsável pela relação entre as duas vias do cruzamento. Essa relação é definida pelo fato do tempo de vermelho da via que cruza ser o tempo de verde da outra com o acréscimo do tempo de pedestre fixo de cada via, se houver.

Outro teste a ser feito é a minimização dos graus de saturação com esta outra função objetivo (14).

$$MIN \sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^2 X_{ij} \quad (14)$$

Substituindo as equações (5) e (6) em (14), a nova função objetivo fica:

$$MIN \sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^2 \frac{q_{ij}}{S_{ij} \cdot \left(\frac{g_{ij}}{C}\right)} \quad (15)$$

Sujeito as restrições (10), (12) e (13).

$$s. a \quad T_p \leq g_{ij} \leq C - T_{amarelo}$$

$$g_{ij} \in \mathbb{Z}$$

$$g_{i1} + g_{i2} + T_{pedestre} = C - T_{amarelo}$$

RESULTADOS

Os dados iniciais comprovaram o que era esperado, em cada cruzamento há uma via com fluxo de saturação maior que 1 enquanto a outra não, isso mostra que há a necessidade de alteração no tempo de verde a fim de diminuir o fluxo excessivo em uma das vias de um cruzamento. As células em verde representam o tempo de verde do semáforo e as vermelhas o tempo de vermelho, as primeiras linhas representam sempre a via principal (Oswaldo Cruz) e as segundas linhas as vias que cruzam (Figura 2).

Figura 2 – Dados referentes aos tempos de verde realizados na via

CRUZAMENTO 1			SOMA	CRUZAMENTO 2			SOMA	CRUZAMENTO 3			SOMA
g11=	60	66	126	g21=	44	82	126	g31=	55	71	126
g12=	50	76	126	g22=	82	44	126	g32=	57	69	126
s	q	q/s		s	q	q/s		s	q	q/s	
2205	824	0,37		2205	873	0,40		2205	706	0,32	
2452	1137	0,46		2520	1306	0,52		3150	1795	0,57	
Oswaldo Cruz x Nabuco de Araújo				Oswaldo Cruz x Dr. Lobo Viana				Oswaldo Cruz x Bento de Abreu			
x11=	0,81			x21=	1,17			x31=	0,76		
x12=	1,21			x22=	0,82			x32=	1,30		

Fonte: Criado pelos autores.

Para a resolução do problema, foi utilizado o Solver do Excel com o método de solução GRG Não Linear.

Considerando que o ideal seria sempre manter o grau de saturação de todas as vias abaixo de 1 - restrição (9) - porém, existem pesquisadores que afirmam ser melhor garantir abaixo de 0,85 (AVDIU,S et al, 2013).

Ao tentar resolver o problema com as restrições 7-11, o problema se tornou infactível. Percebeu-se então que a via Bento de Abreu permanece com grau de saturação maior que 1 ($X_{32} = 1,05$ na Figura 3), isso mostra que o fluxo é tão intenso que não é possível encontrar um tempo de verde que torne o grau de saturação menor ou igual a 1. Os graus de saturação das demais ruas ficaram dentro do limite estabelecido (Figura 3).

Para evitar o resultado infactível, foi adicionado uma nova restrição aumentando o limite aceitável de saturação para X_{32} . Primeiramente sendo $X_{32} \leq 1,1$, foi obtido um resultado factível de $X_{32} = 1,08$, então alterou-se a restrição para $X_{32} \leq 1,08$ e encontrou-se o resultado $X_{32} = 1,05$, tentou-se reduzir novamente este grau de saturação para $X_{32} \leq 1,05$ mas obteve-se um resultado infactível novamente. Ou seja, $X_{32} = 1,05$ é o menor resultado factível para X_{32} .

Figura 3 – Resultados obtidos minimizando os atrasos e as paradas

CRUZAMENTO 1			SOMA	CRUZAMENTO 2			SOMA	CRUZAMENTO 3			SOMA
g11=	49	77	126	g21=	58	68	126	g31=	42	84	126
g12=	61	65	126	g22=	68	58	126	g32=	70	56	126
s	q	q/s		s	q	q/s		s	q	q/s	
2205	824	0,37		2205	873	0,40		2205	706	0,32	
2452	1137	0,46		2520	1306	0,52		3150	1795	0,57	
Oswaldo Cruz x Nabuco de Araújo				Oswaldo Cruz x Dr. Lobo Viana				Oswaldo Cruz x Bento de Abreu			
x11=	1			x21=	0,89			x31=	1,00		
x12=	0,98			x22=	0,99			x32=	1,05		

Fonte: Criado pelos autores.

Desta forma, foram definidos os tempos ótimos de verde para melhorar o fluxo nesta rede de semáforos (Tabela 2).

Tabela 2 – Resultados obtidos e graus de saturação minimizando os atrasos e número de paradas.

	Cruzamento 1		Cruzamento 2		Cruzamento 3	
	Oswaldo Cruz	Nabuco de Araújo	Oswaldo Cruz	Dr. Lobo Viana	Oswaldo Cruz	Bento de Abreu
Tempo de verde não otimizado (s)	60	50	44	82	55	57
Tempo de verde minimizando atrasos e paradas (s)	49	61	58	68	42	70
Grau de saturação não otimizado	0,81	1,21	1,17	0,82	0,76	1,30
Grau de saturação minimizando atrasos e paradas (s)	1	0,98	0,89	0,99	1	1,05
Melhoria do grau de saturação minimizando atrasos e paradas (%)	23,47	19,01	23,93	20,73	31,58	19,23
Atraso médio uniforme não otimizado	30,09	45,90	47,09	18,39	31,82	47,65
Atraso médio uniforme otimizado	40,71	33,73	32,97	30,73	44,19	31,79
Melhoria do atraso médio uniforme (%)	-35,29	26,51	29,99	-67,10	-38,87	33,28
Atraso médio aleatório não otimizado	0,86	-1,77	-2,02	0,95	0,59	-1,41
Atraso médio aleatório otimizado	28,70	13	1,74	28,47	8184,50	-5,26
Melhoria do atraso médio aleatório (%)	-3337,20	-417,23	-93,07	-2896,84	-1387103,3	373,05

Número de paradas não otimizado	0,81	1,15	1,10	0,77	0,85	1,31
Número de paradas otimizado	1	0,98	0,92	0,99	1	1,07
Melhoria do número de paradas (%)	-23,46	14,78	16,36	-28,57	-17,65	18,32

Fonte: Criado pelos autores.

Analisando os resultados finais (Tabela 2) pode-se notar que houve uma mudança considerável nos tempos de verde desses cruzamentos. A relação percentual de melhoria do grau de saturação foi definida como: a diferença do grau atual em relação a 1, que era o grau desejado.

A via Oswaldo Cruz no Cruzamento 2 foi a que obteve melhor resultado. A via Bento de Abreu mesmo não tendo conseguido atingir o grau de saturação máximo igual a 1, não foi a via com a pior melhoria, ou seja, mesmo não cumprindo uma das restrições iniciais, houve uma grande melhora.

Em relação aos atrasos e números de paradas a melhoria foi calculada levando em conta o quão menor o número é. Melhorias percentuais negativas indicam uma piora quando comparada ao resultado anterior. Com isso, pode se notar que mesmo havendo uma melhora visível nos graus de saturação de cada via, surgem pioras enormes em seus atrasos. Isso mostra que ao se analisar individualmente cada parcela da função objetivo, não é possível perceber uma melhora significativa, mas ao se ver o que estes valores resultam quando estão todos somados, tem-se um resultado significativamente bom, ou seja, prova que a relação entre os cruzamentos que originam o resultado ótimo, se tratar cada via e cada cruzamento individualmente não há melhorias.

Ao observar as vias que obtiveram as piores melhorias, são as vias em que o grau de saturação foi aumentado para o mais próximo de 1. Como foi definido que o ideal é um grau de saturação próximo ou igual 1, a via Oswaldo Cruz (cruzamento 2) por exemplo, com 0,76 precisou piorar sua circulação para atingir 0,99 e para isso teve uma piora em seus atrasos e números de paradas.

Efetuando o segundo teste, onde a função objetivo consiste em minimizar o grau de saturação, encontrou-se os seguintes tempos de verde (Figura 4).

Figura 4 – Resultados obtidos minimizando os graus de saturação.

CRUZAMENTO 1			SOMA	CRUZAMENTO 2			SOMA	CRUZAMENTO 3			SOMA
g11=	52	74	126	g21=	59	67	126	g31=	48	78	126
g12=	58	68	126	g22=	67	59	126	g32=	64	62	126
s	q	q/s		s	q	q/s		s	q	q/s	
2205	824	0,37		2205	873	0,40		2205	706	0,32	
2452	1137	0,46		2520	1306	0,52		3150	1795	0,57	
Oswaldo Cruz x Nabuco de Araújo				Oswaldo Cruz x Dr. Lobo Viana				Oswaldo Cruz x Bento de Abreu			
x11=	0,93			x21=	0,88			x31=	0,87		
x12=	1,04			x22=	1,00			x32=	1,16		

Fonte: Criado pelos autores.

Desta forma, foram definidos os tempos ótimos de verde para melhorar o fluxo nesta rede de semáforos levando em consideração a minimização dos graus de saturação (Tabela 3).

Tabela 3 – Resultados obtidos e graus de saturação minimizando os graus de saturação.

	Cruzamento 1		Cruzamento 2		Cruzamento 3	
	Oswaldo Cruz	Nabuco de Araújo	Oswaldo Cruz	Dr. Lobo Viana	Oswaldo Cruz	Bento de Abreu
Tempo de verde não otimizado (s)	60	50	44	82	55	57
Tempo de verde minimizando os graus de saturação	52	58	59	67	48	64
Grau de saturação não otimizado	0,81	1,21	1,17	0,82	0,76	1,30
Grau de saturação minimizando os graus de saturação	0,93	1,04	0,88	1	0,87	1,16
Melhoria do grau de saturação minimizando os graus de saturação (%)	14,81	14,05	24,79	21,95	14,47	10,77

Fonte: Criado pelos autores.

Observando os resultados finais deste segundo teste, pode-se notar que mesmo tendo uma função objetivo minimizando os graus de saturação, os resultados não foram tão bons quando comparados ao primeiro teste.

Como neste ensaio não havia uma restrição que definisse o grau de saturação (X) menor ou igual a 1, o Solver minimizou estes graus de forma que temos 2 vias com grau de saturação maior que 1. Analisando desta forma parece que o segundo teste obteve graus de saturação piores que o primeiro, se considerar que o melhor é ter o menos possível de vias com graus maiores que 1, esta afirmação está correta. Porém, se analisarmos a soma dos graus de saturação obtidos nos dois ensaios, vemos que o segundo teste cumpriu sua função ao nos dar o menor somatório (Tabela 4).

Tabela 4 – Resultados dos somatórios dos graus de saturação.

Ensaio	Somatório dos graus de saturação
Minimizando atrasos e paradas	5,91
Minimizando graus de saturação	5,88

Fonte: Criado pelos autores.

Como o objetivo deste projeto é melhorar o fluxo dessas vias, o melhor resultado é aquele onde há menos graus de saturação maiores que 1, logo, seria o resultado obtido através do primeiro teste minimizando os atrasos e paradas (Tabela 5).

Tabela 5 – Tempos de verde finais.

	Cruzamento 1		Cruzamento 2		Cruzamento 3	
	Oswaldo Cruz	Nabuco de Araújo	Oswaldo Cruz	Dr. Lobo Viana	Oswaldo Cruz	Bento de Abreu
Tempo de verde (s)	49	61	58	68	42	70

Fonte: Criado pelos autores.

CONCLUSÃO

Assim, sabendo que, o tráfego de veículos em cidades como Santos causam um grande impacto no dia-a-dia da população, é necessário que haja um remanejamento nos semáforos com o intuito de otimizar o trânsito de vias com um grande fluxo de veículos, minimizando os atrasos sofridos, de modo que aumente a qualidade de vida dos moradores da cidade.

De acordo com os dados apresentados, é possível encontrar um equilíbrio nos tempos de verde dos cruzamentos com base nos graus de saturação de cada via, logo, melhorando o fluxo nessa rede semaforica em análise. O modelo de otimização utilizado no caso estudado poderia ser aplicado nos outros cruzamentos de Santos, no entanto, para que haja um resultado efetivo no tráfego veicular da cidade, seria necessário um estudo mais amplo.

Os resultados mostram que, levando em consideração o objetivo do trabalho, o ensaio 1 (minimizar os atrasos e paradas) foi mais eficiente do que o ensaio 2 (minimizar os graus de saturação), já que para otimizar essa rede semaforica da melhor forma possível, precisa-se tentar manter os graus de saturação menores ou iguais a 1.

Em algumas vias como a Bento de Abreu não seria possível chegar em um valor menor ou igual a 1, por conta de uma grande quantidade de veículos que passam naquele horário. Para que haja um resultado ainda mais satisfatório, seria necessário analisar outros cruzamentos que envolvam essa via.

No entanto, nos três cruzamentos houve uma melhoria considerável no grau de saturação, o que resultaria em um melhor aproveitamento do tempo de verde, que também foi otimizado, e, portanto, alcançou-se o principal objetivo do problema trazido inicialmente.

Cabe ressaltar que este estudo não considerou períodos fora do horário de pico. Como trabalho futuro, sugere-se este tipo de análise de forma a otimizar os índices levando em consideração vários momentos do dia.

REFERÊNCIAS

AVDIU, S, et al. Optimization Of Work Of Traffic Signals In Order To Reduce The Length Of The Waiting Queue And Delays In Isolated Intersection: A Case Study. **Journal Impact Factor**. v.4, n.5. 2013.

FERNANDES, P. A. F. Programação Não Linear Inteira Mista e Não Convexa Sem Derivadas. **Tese de Doutorado em Ciências, especialidade de Matemática, Universidade do Minho**. 2014.

GOOGLE EARTH-MAPAS. <http://mapas.google.com>. Consulta realizada em 19/05/2019.

LACORTT, M, et al. Modelos Matemáticos para Otimização do Tráfego Urbano Semaforizado. **TEMA (São Carlos)**. v.14, n.3. 2013.