

Utilização de modelo matemático de otimização para determinar a localização de radares de velocidade em vias urbanas no Rio de Janeiro

Gabriel Nakalski Farias¹, Anderson Marden de Souza Silva¹, Filipe Mendes Gonçalves Machado¹, Jéssica Wanderley Souza do Nascimento¹, Kelly Cristina da Silva de Almeida¹, Ana Carolina de Barros Pamplona¹, Laura Silvia Bahiense da Silva Leite¹, Glaydston Mattos Ribeiro¹

¹Laboratório de Otimização e Sistemas de Informações Geográficas (OPTGIS) vinculado ao Programa de Engenharia de Transporte (PET) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – Avenida Horácio Macedo, 2030, Bloco I, Sala 244, Cidade Universitária – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

`gabriel.farias@pet.coppe.ufrj, anderson.marden@poli.ufrj.br, filipemgm@pet.coppe.ufrj.br, jessica.wanderley12@gmail.com, kelly.almeida@pet.coppe.ufrj.br, carolpamplona@poli.ufrj.br, laura@cos.ufrj.br, glaydston@pet.coppe.ufrj.br`

Resumo. *Este artigo investiga a relação entre velocidade e sinistros de trânsito, com foco na otimização da localização de radares de velocidade em áreas urbanas. Por meio da análise de dados de pontos de sinistros em avenidas da cidade do Rio de Janeiro, foram implementados modelos matemáticos de máxima cobertura, p-medianas e seccionamento para a escolha dos locais mais adequados para a instalação de radares. Por fim, foi feita comparação entre os modelos de localização propostos e o cenário atual da posição de radares nas avenidas estudadas. A integração de radares inteligentes com os modelos de otimização e pesquisas futuras sobre o impacto a longo prazo da otimização na segurança viária são sugeridas.*

1. Introdução

O número expressivo de mortes e lesões graves no trânsito na cidade do Rio de Janeiro é grande pretexto para mudanças na visão de cuidar da infraestrutura viária. A abordagem tradicional, que privilegia o automóvel em detrimento do humano, gera mais engarrafamentos, poluição, violência e mais mortes [IPTD, 2017]. Segundo o Instituto de Segurança Pública (ISP), no ano de 2022 foram registrados mais de 7,6 mil sinistros e mais de 500 mortes no trânsito no município do Rio de Janeiro. Esse número traz à tona o cenário da segurança viária da cidade atualmente, que sofre com a falta de medidas que contribuam para a prevenção de sinistros. Abordar a segurança viária de forma diferente,

com uma visão mais humana, levando em conta conceitos como sistema seguro e visão zero, é a chave para o combate à mortalidade no trânsito.

Os dados de mortalidade levantados pela Organização Mundial de Saúde (OMS), entre 2000 e 2019, indicam que as mortes e incapacitações causadas por sinistros de trânsito ocupam posições relevantes e mais elevadas nas estatísticas gerais, conforme mais pobres se mostram os países analisados. Alguns motivos para o peso desse problema nos países pobres consistem no aumento do número de veículos motorizados, na alta letalidade dos sinistros, no pouco incentivo às leis e regulamentos voltados à segurança viária e nos problemas de atendimento e cobertura da saúde pública. Para serem efetivas, as políticas de segurança no trânsito dos países em desenvolvimento devem basear-se em pesquisas e evidências, adequar-se ao contexto social, político e econômico desses locais e aproveitar as experiências dos países desenvolvidos.

De acordo com Mohit et al. [2018], programas de redução de velocidade se mostram capazes de diminuir a probabilidade de mortes em sinistros de trânsito e mesmo pequenos investimentos em reduções de velocidade têm o potencial de produzir ganhos de saúde pública. A partir da instalação de sistema de controle de velocidade por radares, Montella et al. [2015] conseguiram avaliar os efeitos desse novo elemento na velocidade e na segurança em uma rodovia de Nápoles, na Itália. Foi possível verificar que, após a implantação de radares na via, houve diminuição da variabilidade da velocidade e do excesso de velocidade. O novo sistema também reduziu significativamente o número de sinistros, principalmente em trechos curvos e em acidentes com feridos.

Em decorrência da relação entre a velocidade e sinistros de trânsito em vias urbanas, torna-se evidente a necessidade da implantação de equipamentos de fiscalização eletrônica para mitigação dessa problemática [Jamrozik et al. 2016; Farias et al. 2024]. Porém, a abordagem de alocação de radares de velocidade no contexto da cidade do Rio de Janeiro parece não adotar estratégias eficazes que otimizem a localização desses equipamentos considerando a cobertura dos locais com mais sinistros [IPTD, 2017]. Este artigo, portanto, tem como objetivo propor uma comparação entre três diferentes modelos matemáticos de otimização de localização de radares de velocidade em avenidas de alto risco de sinistros da cidade do Rio de Janeiro, visando a redução de acidentes e a promoção da segurança viária.

A metodologia da presente pesquisa é composta por 3 etapas principais, são elas: (1) identificar a posição dos sinistros de trânsito nas duas vias com maior taxa de sinistros na cidade do Rio de Janeiro; (2) implementar modelos de localização dos radares nas vias e; (3) realizar uma análise comparativa entre os resultados apresentados e o cenário atual da posição dos equipamentos de fiscalização eletrônica.

2. Metodologia

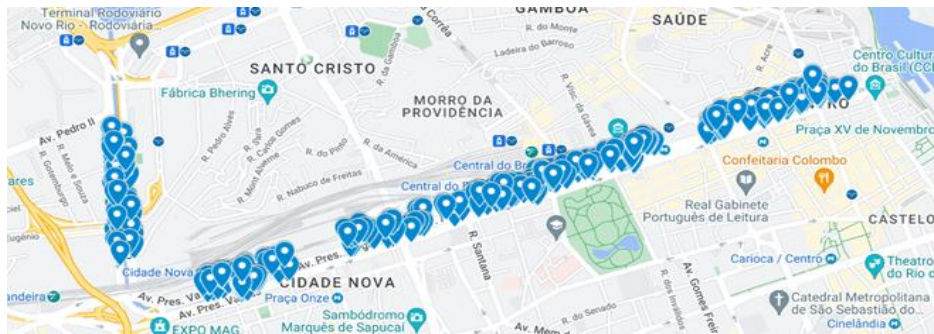
2.1. Modelagens matemáticas

Para atingir os resultados propostos na Etapa 1 da metodologia deste estudo, as vias foram classificadas com base na taxa de sinistros por quilômetro (Tabela 1), ordenados do maior para o menor, considerando os sinistros ocorridos em um período de cinco anos, entre 2018 e 2022, utilizando dados fornecidos pela CET-Rio.

Tabela 1. As vias com maior índice de sinistros por quilômetro

Vias	Quantidade de sinistros por quilômetro
Avenida Francisco Bicalho	30,33
Avenida Presidente Vargas	25,26
Avenida Ministro Edgard Romero	18,63
Rua Visconde de Niterói	17,07
Estrada Mal. Miguel Salazar Mendes de Moraes	17,06
Avenida Salvador de Sá	15,50
Rua Pinheiro Machado	14,35 (conclusão)
Avenida Armando Lombardi	13,82
Avenida Paulo de Frontin	13,82 (continua)
Praia de Botafogo	12,86

Dessa forma, pode-se observar que a Avenida Francisco Bicalho e a Avenida Presidente Vargas, duas avenidas localizadas na região central da cidade e com grande volume de veículos diariamente, apresentaram o maior número de sinistros por quilômetro (Figura 1).

**Figura 1. Localização dos sinistros nas Avenidas Presidente Vargas e Francisco Bicalho**

2.2. Modelo de máxima cobertura com p iterativo

O modelo de máxima cobertura com p iterativo foi desenvolvido levando em conta o raio máximo de influência de um radar no comportamento dos motoristas. Para realização da modelagem de localização de radares das duas vias em estudo foi adotado o conceito de *coverage*, que considera um conjunto de pontos dentro do raio máximo determinado. Foi adotado raio de cobertura de 300m ao redor dos radares a serem alocados. O modelo de otimização proposto é detalhado a seguir:

Conjuntos:

m : conjunto de i pontos de instalação, onde $i = 1, \dots, m$

n : conjunto de j pontos de demanda, onde $j = 1, \dots, n$

Parâmetros:

$coverage_j$ = conjunto de pontos de demanda $j \in n$ que estão dentro do raio de cobertura do ponto de instalação $i \in m$.

$distance_{ij}$ = distância entre os pontos de demanda $j \in n$ e pontos de instalação $i \in m$.

$coverage_radius_km$ = raio de cobertura.

A variável $coverage_j$ é uma estrutura que armazena quais pontos de demanda são cobertos por cada ponto de instalação [2.1]. Cada entrada da estrutura $coverage_j$ corresponde a um ponto de instalação, e o valor associado é uma lista de índices dos pontos de demanda cobertos por esse ponto de instalação:

$$coverage_j = \{i \mid distance_{ij} \leq coverage_radius_km\} \quad [2.1]$$

Variáveis de decisão:

x_i : Variável binária que indica se uma instalação será construída no ponto $i \in m$. Se $x_i = 1$, significa que uma instalação será construída no ponto $i \in m$; caso contrário $x_i = 0$.

y_j : Variável binária que indica se um ponto de demanda $j \in n$ é coberto por pelo menos uma instalação. Se $y_j = 1$, significa que o ponto de demanda $j \in n$ é coberto por pelo menos uma instalação; caso contrário, $y_j = 0$.

Modelo matemático:

O objetivo é maximizar o número de pontos de demanda cobertos, o que é representado pela soma das variáveis y_j [2.2].

$$\text{Maximizar } \sum_{j=1}^n y_j \quad [2.2]$$

Sujeito a:

$$y_j \leq \sum_{i \in coverage_j} x_i, \forall j \in n \quad [2.3]$$

$$\sum_{i=1}^m x_i \leq p \quad [2.4]$$

$$\sum_{i \in coverage_j} x_i \leq 1, \forall j \in n \quad [2.5]$$

$$y_j \in \{0,1\}, \forall j \in n \quad [2.6]$$

$$x_i \in \{0,1\}, \forall i \in m \quad [2.7]$$

As Restrições [2.3] garantem que um ponto de demanda seja considerado coberto apenas se tiver dentro do raio de cobertura de pelo menos uma instalação, para cada ponto de demanda $j \in n$ (restrição de cobertura de demanda). Essas restrições comparam a variável y_j com a soma das variáveis correspondentes aos pontos de instalação que cobrem o ponto de demanda $j \in n$. Se a soma das variáveis x_i for maior que zero, ou seja,

se pelo menos uma instalação cobrir o ponto de demanda $j \in n$, então a variável y_j deve ser 1, indicando que o ponto de demanda está coberto. Caso contrário, a variável y_j deve ser 0.

A Restrição [2.4] limita a soma das variáveis x_i a p (restrição de limite de instalações). Já as Restrições [2.5] garantem que um ponto de demanda seja coberto por no máximo uma instalação limita a soma das variáveis y_j cobrindo um mesmo ponto de demanda $j \in n$ a 1. Por fim, as Restrições [2.6] e [2.7] contemplam os domínios das variáveis.

2.3. Modelo de p -medianas

Diversas metodologias foram propostas para solucionar o problema da localização de facilidades, cada uma com suas vantagens e desvantagens. Uma das técnicas mais utilizadas é o método p -medianas, descrito por Pizzolato et al. [2004]. O modelo visa reduzir o número de acidentes de trânsito através da identificação de pontos estratégicos para a instalação dos dispositivos. Para isso, considerou-se a implementação do modelo em matrizes de distâncias entre pontos de ocorrência desses sinistros onde o número de radares a serem alocados não pode ser maior que p e cada ponto deve ser alocado em apenas um radar. O objetivo deste modelo de programação é encontrar a localização de p -medianas de forma a minimizar a soma das distâncias entre os pontos de sinistros e os radares mais próximos.

Para aplicação na presente pesquisa, o número de radares alocados em cada via ficou restrito a 6 para Avenida Presidente Vargas e 2 para Avenida Francisco Bicalho. Os detalhes da otimização são demonstrados a seguir:

Índices:

$$\begin{aligned} i &= 1, \dots, m \\ j &= 1, \dots, n \end{aligned}$$

Parâmetros:

d_{ij} = distância entre os pontos $i \in m$ e $j \in n$.

p = número de medianas.

Variáveis de decisão:

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{se o ponto } j \in n \text{ é escolhido como mediana} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o ponto } i \in m \text{ é alocado à mediana } j \in n \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Modelo matemático:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad [2.8]$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n y_j = p \quad [2.9]$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \forall i \in m \quad [2.10]$$

$$x_{ij} \leq y_j, \forall i, j \in m, n \quad [2.11]$$

$$y_j \in \{0,1\}, \forall j \in n \quad [2.12]$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, j \in m, n \quad [2.13]$$

A Função Objetivo [2.8] visa minimizar a soma das distâncias de cada vértice ao radar mais próximo. A Restrição [2.9] determina que a quantidade de vértices $j \in n$ escolhidos como medianas deve ser igual a p . As Restrições [2.10] garantem que todos os vértices $i \in m$ são atendidos por uma única mediana. As Restrições [2.11] determinam que todo vértice $i \in m$ seja alocado a uma mediana. Por fim, as Restrições [2.12] e [2.13] garantem que as variáveis de decisão sejam binárias.

2.4. Modelo de seccionamento

A fim de buscar um modelo que melhor representasse a realidade da implantação de equipamentos de fiscalização eletrônica em grandes cidades brasileiras, foi desenvolvido um método de otimização que diferencia os dois sentidos distintos das vias estudadas, por meio da separação das vias em trechos específicos, divididos considerando interseções, alças de acesso e outras interferências que possam impactar o fluxo normal de veículos. Essa separação em seções levou em conta os dois sentidos das vias, com divisões a cada interferência possível.

O ponto médio de cada uma das seções foi atrelado a um peso específico, referente a quantidade de sinistros que ocorreram na seção determinada. A partir disso, considerando o peso de cada ponto médio e as restrições do modelo, foi realizada a otimização da localização de radares para as vias. Abaixo, é possível verificar o detalhamento do modelo:

Índices:

$$\begin{aligned} i &= 1, \dots, m \\ j &= 1, \dots, n \end{aligned}$$

Parâmetros:

S_i = número de sinistros no ponto $i \in m$.

d_{ij} = distância euclidiana entre os pontos $i \in m$ e $j \in n$.

D = distância mínima permitida entre dois radares. O valor utilizado é 300m.

A distância euclidiana $d_{i,j}$ entre os pontos $i \in m$ e $j \in n$ pode ser calculada com base nas coordenadas (x_i, y_i) e (x_j, y_j) :

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad [2.14]$$

Onde x_i e y_i são coordenadas do ponto $i \in m$ e x_j e y_j são as coordenadas do ponto $j \in n$.

Variáveis de decisão:

x_i = Variável binária que indica se um radar é instalado no ponto $i \in m$ e $j \in n$.

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{se um radar é instalado no ponto } i \in m \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Modelo matemático:

$$\text{Maximizar } z = \sum_{i=1}^n S_i x_i \quad [2.15]$$

Sujeito a:

$$x_i + x_j \leq 1, \forall i, j \in m, n \text{ com } d_{ij} < D \quad [2.16]$$

A Função Objetivo [2.15] visa maximizar a quantidade de radares alocados. As Restrições [2.16] garantem que a distância entre quaisquer dois radares selecionados seja de pelo menos 300 metros, de forma que, se a distância euclidiana $d_{i,j}$ entre os pontos $i \in m$ e $j \in n$ for menor que 300 metros, então não é permitido selecionar ambos os pontos simultaneamente.

3. Análise e Discussão dos Resultados

Para avaliação dos resultados do modelo, o mesmo foi implementado com o auxílio da linguagem Python® em um computador equipado com um processador AMD Ryzen 5 5600g (dispondo de 6 cores e 12 threads) CPU 3.9 GHz, 16 GB de memória RAM rodando o solver Pulp® o sistema operacional Microsoft Windows 11 de 64 Bits.

3.1. Modelo de máxima cobertura com p iterativo

Os pontos de ocorrência de sinistros e a alocação dos radares nas avenidas estudadas podem ser observados na Figura 2.



Figura 2. Localização de radares e sinistros nas Avenidas Presidente Vargas e Francisco Bicalho

O modelo de máxima cobertura com p iterativo busca determinar o menor valor de p que representa a quantidade e localização dos radares de modo a maximizar a cobertura dos sinistros. O resultado, portanto, baseia-se tanto na cobertura máxima dos sinistros como no tamanho da via. Considerando que o raio de cobertura de cada radar é de 300m, foi possível alocar 6 radares na Av. Presidente Vargas, ao passo que na Av. Francisco Bicalho foram alocados 2 radares ao longo da via. Com isso, cada ponto de sinistro em ambas as vias foi coberto por no máximo um radar, conforme a Figura 2.

3.2. Modelo de p -medianas

A aplicação do modelo aos dados de sinistros das duas avenidas resultou na identificação ótima das localizações para a instalação de medianas (radares) por meio de duas matrizes de distância: uma para a Avenida Presidente Vargas e outra para a Avenida Francisco Bicalho, onde foi calculada a distância entre cada par de pontos de sinistros. O parâmetro p utilizado foi fixado de acordo com os resultados provenientes do modelo de máxima cobertura com p iterativo, para fins de comparação posterior. Com isso, foi fixada a quantidade de 6 radares para a Av. Presidente Vargas e 2 para a Av. Francisco Bicalho. É importante destacar que outros valores de p não foram testados. Os pontos de ocorrência de sinistros e a alocação dos radares nas duas vias estudadas podem ser melhor observados na Figura 3.



Figura 3. Localização de radares e sinistros nas Avenidas Presidente Vargas e Francisco Bicalho

3.3. Modelo de seccionamento

As vias foram divididas em seções, para a criação de pontos de possível alocação de radares nos pontos médios de cada uma dessas seções. O número de sinistros de cada um

dos trechos foi adicionado como peso do ponto médio da seção. O modelo adotado alocou radares nos pontos de maior peso, respeitando as restrições impostas.

O seccionamento da Av. Francisco Bicalho em ambos os sentidos e ponto médio de cada seção podem ser melhor observados na Figura 4, no mapa da esquerda. Quatro pontos médios foram escolhidos pelo modelo de otimização, representando as 4 seções com mais acidentes, sendo 2 em cada sentido, considerando o espaçamento entre radares de no mínimo 300m. O resultado da localização de radares pode ser observado na Figura 4. O mesmo modelo foi aplicado na Av. Presidente Vargas, resultando em 28 seções no sentido Candelária e em 21 seções no sentido Praça da Bandeira. Na Figura 5, é possível verificar todas as seções e seus respectivos pontos médios.

Treze pontos médios foram escolhidos representando as treze seções com mais acidentes, sendo 6 no sentido Candelária e 7 no sentido Praça da Bandeira, considerando o espaçamento entre radares de no mínimo 300m. O resultado da localização de radares pode ser observado na Figura 6.

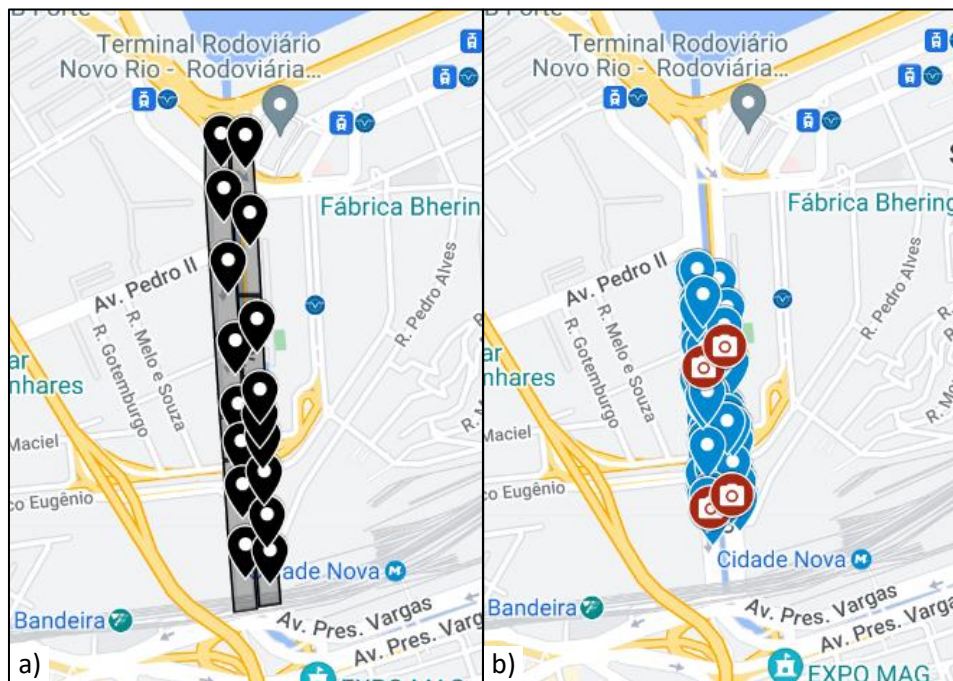


Figura 4. Av. Francisco Bicalho separada em seções nos dois sentidos: (a) ponto médio de cada seção; (b) localização de radares a partir do modelo de seções e pontos de sinistros

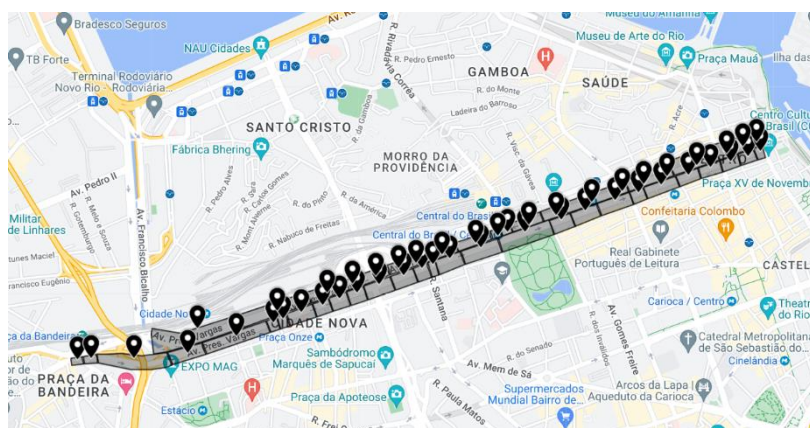


Figura 5. Av. Presidente Vargas separada em seções nos dois sentidos e ponto médio de cada seção



Figura 6. Localização de radares a partir do modelo de seções e pontos de sinistros na Av. Presidente Vargas

3.4. Análise comparativa dos modelos

Nesta seção, é realizada uma comparação entre os modelos de localização de radares propostos para a Av. Presidente Vargas e a Av. Francisco Bicalho, bem como é estabelecida a relação entre estes modelos e a posição atual dos radares de velocidade nestas avenidas.

Tabela 2. Número de radares alocados nas vias analisadas por modelo de otimização

Vias	Máxima cobertura	<i>P</i> -medianas	Seccionamento
Avenida Francisco Bicalho	2	2	4
Avenida Presidente Vargas	6	6	13

No modelo de máxima cobertura com p iterativo, o número de radares nas Avenidas Presidente Vargas e Francisco Bicalho foram 6 e 2, respectivamente. Para o modelo de p -medianas, os autores consideraram a quantidade de radares resultante do modelo de máxima cobertura com p iterativo, por necessitar de um número fixo de radares a serem alocados. O modelo de seccionamento permitiu a separação de sentidos para a modelagem do problema, além de considerar características físicas da via para realizar essas divisões, como interseções ou alças de acesso. Esse modelo alocou radares nos dois sentidos de cada uma das vias, sendo 2 em cada sentido da Av. Francisco Bicalho e 6 no sentido Candelária e 7 no sentido Praça da Bandeira na Avenida Presidente Vargas. Um maior detalhe no número de radares alocados em cada modelo pode ser verificado na Tabela 2.

Na Figura 7, verifica-se os radares alocados atualmente pela CET-Rio na Av. Francisco Bicalho e na Av. Presidente Vargas, segundo a listagem mais atual de radares da cidade.



Figura 7. Localização atual de radares nas Avenidas Francisco Bicalho e Francisco Bicalho

Analisando a situação atual dos radares na Av. Francisco Bicalho, é possível perceber que, ao comparar com o modelo de máxima cobertura, o radar no sentido Rodoviária se aproxima mais do alocado atualmente, apesar da localização no modelo estar no outro sentido da via, por não considerar essa variável. Já o radar mais ao norte se encontra mais acima no modelo do que no visto atualmente. Na comparação com o modelo de p -medianas, o radar atual alocado no sentido Centro fica muito próximo do resultado do modelo proposto. Porém, ao considerarmos o radar no sentido Rodoviária, podemos notar que a localização do modelo é um ponto mais abaixo do que existe atualmente.

O modelo de seccionamento é o que mais se aproxima do cenário atual na Av. Francisco Bicalho, considerando o radar mais ao norte no sentido Centro. Porém, esse modelo alocou 4 radares na via, apontando uma provável deficiência na abordagem atual de localização de radares, que acaba por não englobar todos os locais com mais sinistros da via.

Considerando o posicionamento atual dos radares na Av. Presidente Vargas, nota-se uma grande diferença no número de radares quando comparado com os modelos apresentados. O modelo de máxima cobertura, por exemplo, por não considerar os dois sentidos da via, apresenta apenas 6 radares alocados. Se fossem considerados os dois sentidos da via, somente 12 radares seriam instalados seguindo esse modelo, contra 17 radares que existem atualmente. O mesmo acontece com o modelo de p -medianas, em que também são alocados 6 radares, porém em posições diferentes do de máxima cobertura. Já ao analisarmos o modelo de seccionamento, é possível perceber uma maior aproximação com o cenário atual, uma vez que considera a diferença de sentido da via e posiciona 13 radares, um número mais próximo dos 17 atuais. Porém, diferente do que é adotado atualmente pela CET-Rio, o modelo de seccionamento tem uma melhor distribuição espacial dos radares, que acabam por englobar a maior parte da avenida e seus acidentes. Para a realização dessa comparação, não foram analisados os radares de fiscalização de faixa exclusiva de ônibus (BRS), somente radares eletrônicos de velocidade.

4. Considerações Finais

A pesquisa demonstra como modelos de otimização podem auxiliar na escolha da localização de radares de velocidade em avenidas com um grande número de ocorrências de sinistros. Dois dos três modelos mostram resultados muito semelhantes, já o modelo

de seccionamento mostra uma leve diferença, pois ele tem uma precisão maior dada as devidas análises de separação de seção e alocação dos sinistros nas seções. O modelo também contou com a separação das vias nos dois sentidos, o que não foi considerado nos outros modelos. O modelo de máxima cobertura apresentou 2 radares em uma das vias e 6 radares na outra via, uma vez que foi determinado um raio de cobertura máximo de sinistros. Porém, o posicionamento de radares nesse modelo não considerou a diferença entre os sentidos da via.

O modelo de p -medianas usou o mesmo número de radares considerado no de máxima cobertura, por exigir a determinação de um número fixo de radares a serem posicionados. Já no caso do modelo de seccionamento, as vias foram divididas em seções de influência, sendo atribuído um peso para o ponto médio de cada seção, equivalente a quantidade de sinistros naquele trecho. Nesse caso, os radares foram alocados considerando cada sentido da via, resultando no maior número de radares entre os três modelos propostos.

Os resultados da otimização, quando comparados com a posição atual dos radares na Av. Francisco Bicalho, indicam que o modelo de seccionamento se aproxima mais da realidade, devido a posição dos radares muito próximos do cenário atual. Nesse modelo, quatro radares foram alocados, sendo dois em cada sentido, garantindo uma cobertura mais eficiente da via e sugerindo uma possível deficiência na abordagem atual de localização de radares, que apresenta somente um radar em cada sentido na avenida estudada.

Para aprimorar ainda mais a efetividade da otimização, recomenda-se a considerar radares inteligentes, conhecidos como doppler, aos modelos matemáticos, tal qual apresentado na literatura sobre o assunto. Esta integração permitirá a coleta de dados em tempo real sobre o comportamento dos condutores e atualizar os modelos de forma dinâmica, otimizando a localização dos radares de acordo com as necessidades específicas de cada momento. Além disso, pesquisas futuras são necessárias para avaliar o impacto em longo prazo da otimização da localização dos radares na segurança viária. Vale pontuar que estas pesquisas devem considerar diferentes tipos de vias, condições de tráfego e características dos condutores, de modo a fornecer um panorama mais completo da efetividade da otimização.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à FAPERJ e ao Laboratório de Otimização e Sistemas de Informações Geográficas (OPTGIS) da COPPE/UFRJ pelo suporte financeiro.

Referências

- Church, R. L., & Meadows, M. E. (1979). Location Modeling Utilizing Maximum Service Distance Criteria. *Geographical Analysis*, Columbus, 11(4):358-373.
- Farahani, R. Z., & Hekmatfar, M. (2009). *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies*. Contributions to Management Science. Berlin: Physica Heidelberg.

- Farias, G. N., Silva, A. M. de S., Machado, F. M. G., Nascimento, J. W. S. do, Almeida, K. C. da S. de, Leite, L. S. B. da S., & Ribeiro, G. M. (2024). Implementação de modelo matemático para otimizar a localização de radares de velocidade em vias urbanas no Rio de Janeiro. *Anais do 21º Congresso Rio de Transportes*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 12p.
- Ghobrial, R., Sayed, T., & Abdelkhalek, M. (2014). Speed camera location optimization using linear programming. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40(1):174-183.
- Instituto de Políticas de Transporte & Desenvolvimento. (2017). *Moderação de tráfego e sua importância na construção de cidades mais humanas e inclusivas*. Rio de Janeiro: IPTD.
- Jamrozik, K., Newstead, S., Shreeve, N., & Stevens, A. (2016). The effect of fixed speed cameras on road safety: A systematic review and meta-analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 87(1):1-10.
- Mohit, B., Rosen, Z., & Muennig, P. A. (2018). The impact of urban speed reduction programmes on health system cost and utilities. *Injury Prevention*, 24(4):262-266.
- Montella, A., Imbriani, L. L., Marzano, V., & Mauriello, F. (2015). Effects on speed and safety of point-to-point speed enforcement systems: Evaluation on the urban motorway A56 Tangenziale di Napoli. *Accident Analysis and Prevention*, 75(1):164-178.
- Pizzolato, N. D., Barros, A. G., Barcelos, F. B., & Canen, A. G. (2004). Localização de escolas públicas: Síntese de algumas linhas de experiências no Brasil. *Pesquisa Operacional*, 24(1):111-131.
- Instituto de Segurança Pública (2022). *Trânsito 2022 – monitorando as ruas e estradas do estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: Fórum Brasileiro de Segurança Pública.