

## MODELO DE LOCALIZAÇÃO PARA BASES DE VEÍCULOS DE SERVIÇOS DE ATENDIMENTO A EMERGÊNCIAS EM RODOVIAS FEDERAIS

**Bruno Guida Gouveia**

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Programa de Engenharia de Transportes (PET/COPPE)

**Igor Girão Peres Vianna**

**Luciana Velasco Medani**

**Pedro da Matta e Andrade Basilio**

**Virgílio José Martins Ferreira Filho**

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Programa de Engenharia de Produção (PEP/COPPE)

### RESUMO

Ao longo de toda a extensão territorial brasileira o modo rodoviário permite o transporte de 61,1% das cargas e 50,4% das viagens de longa distância. Por ser um país majoritariamente rodoviário, entre os anos de 2014 e 2015, mais de 43% dos acidentes nas rodovias federais terminam em feridos ou vítimas fatais. Apenas durante o período, acidentes ocorridos em rodovias federais foram responsáveis por mais de 100 mil feridos e 8 mil vítimas fatais no país. Grande parte das fatalidades poderiam ser evitadas caso houvesse menor tempo de resposta para atendimento aos acidentes. Neste contexto, este artigo inova propondo um modelo de programação linear inteira mista para localizar bases de veículos de atendimento à acidentes em rodovias federais, com o objetivo de minimizar os tempos de deslocamento de ambulâncias de suas bases aos acidentes, ao mesmo tempo que reduz o número de bases necessárias para o atendimento.

### ABSTRACT

Throughout the Brazilian territorial extension, the road mode allows 61.1% of loads transportation and 50.4% of long-distance travel. For a major road country, between 2014 and 2015, more than 43% of federal highway accidents resulted in injuries or fatalities. Only during the period, the occurrences in federal highways were responsible for more than 100 thousand injured and 8 thousand fatal ones in the country. Most social fatalities could be prevented if the response to accidents were carried out in a shorter time. In this context, this article innovates on the proposal of a mixed integer linear programming model to locate bases for emergencies services vehicles in federal highways, with the aims minimize the ambulance travel times from bases to accident, as the same reduce the number of bases necessary for the first aids cares.

### 1. INTRODUÇÃO

Para que uma determinada infraestrutura cumpra seu papel socioeconômico de forma plena perante a sociedade, o conjunto de projetos e estudos que estabelece suas características deve considerar as possíveis externalidades que possam ser criadas ou acentuadas (Pereira, 2011). Deste modo, o empreendimento deve considerar e priorizar ações que visem reduzir a gravidade e as consequências de acidentes rodoviários, que podem gerar perdas sociais, econômicas e, eventualmente, ambientais.

Analisando o panorama mundial, o número de acidentes rodoviários fatais permaneceu 1,25 milhões por ano entre 2007 e 2013, embora o número de veículos em circulação tenha aumentado em 16% e o número de habitantes em 4%. No mesmo período, estima-se que 50 milhões dos acidentes foram de vítimas não fatais. Acidentes rodoviários foram a 9ª causa de morte em 2013 e poderão ser a 7ª em 2030. Em países de renda baixa, a média de acidentes representam uma perda aproximada de 3% do PIB. Nesse contexto, a melhoria da segurança viária foi incluída como uma das metas de desenvolvimento sustentável da agenda das Nações Unidas para 2030 (Who, 2015).

No cenário brasileiro, o modo rodoviário é fundamental para o desenvolvimento das atividades

econômicas no território. O Brasil possui, aproximadamente 1,7 milhões de quilômetros de rodovias que permitem o transporte de 61,1% das cargas e 50,4% das viagens de longa distância (DNIT, 2013 & CNT, 2019).

Entre os anos de 2004 a 2010, o número de ocorrências no Brasil foi crescente, seguida de um decréscimo, até o ano de 2014 (IPEA, 2015). Contudo, mesmo com a melhora na segurança viária em nossas rodovias federais, é possível identificar também que dos tipos de veículos envolvidos em acidentes nas rodovias federais, os automóveis estavam envolvidos em mais de 75% dos acidentes e os caminhões em mais de 30% deles. Além disso, esses dois tipos de veículo foram os mais envolvidos nos acidentes que ocasionaram mortes. Nesse contexto, somente no ano de 2014, estimou-se que esses acidentes somaram um custo superior a 12 bilhões de reais. Em média, cada acidente custou à sociedade 72,7 mil reais, sendo que os acidentes com vítimas fatais custaram aproximadamente 646,7 mil reais (IPEA, 2015).

Visando reduzir o número de ocorrências, minimizar os custos com acidentes, promover a segurança viária nas rodovias brasileiras, e alinhar-se com as medidas internacionais da Década de Ações pela Segurança Viária, o Comitê Nacional de Mobilização pela Saúde e Paz no trânsito elaborou o Plano Nacional de Redução de Acidentes e Segurança Viária. Seu conjunto de medidas buscam implantar ações de fiscalização, educação, saúde, adequação de infraestruturas e segurança veicular (Brasil, 2010). Soma-se a esse esforço, a criação do Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (PNATRANS) e um dispositivo de incentivo à segurança no trânsito acrescentado ao Código de Trânsito Brasileiro, que estabelece metas para redução gradativa dos índices, nacionais e estaduais, de acidentes, no mínimo, pela metade até 2028 (Brasil, 2018).

O gerenciamento da segurança viária, bem como em qualquer área, consiste na utilização de habilidades, técnicas e conhecimentos com o objetivo de controlar ou influenciar os resultados a serem obtidos. Isto é, na melhor das hipóteses, alcançar as respostas mais adequadas com os recursos existentes no momento da tomada de decisão, de forma mais eficiente e eficaz possível. Tais decisões podem ocorrer tanto no momento de elaboração de um projeto viário (medidas proativas), quanto em situação de operação (medidas reativas) (Nodari e Lindau, 2001). Dentre as atividades que compõem a gestão da segurança viária estão: a quantificação, a qualificação e a determinação das medidas mitigadoras (Ferraz, 2012). Para Davis (2004), a abordagem mais comum na gestão racional da segurança viária é a reativa.

Assim, uma vez que um trecho rodoviário tenha uma ocorrência sistemática de acidentes, deseja-se determinar de forma racional e eficiente o local de bases de equipes socorristas ao longo da via analisada, reduzindo os tempos para início dos atendimentos. Portanto, o objetivo deste artigo é determinar a melhor localização para bases de atendimento a emergências em rodovias federais, utilizando um modelo matemático de otimização para determinar este locais. Propõem-se um modelo de programação linear inteira mista que localiza bases dos veículos de serviço de atendimento a emergências ao longo de uma rodovia federal, analisando os impactos que diferentes políticas e diferentes números de bases acarretam nos tempos médios de atendimento.

O restante do artigo está estruturado da seguinte forma. Na Seção 2 é realizada uma revisão bibliográfica sobre atendimento de acidentes em rodovias federais e problemas de localização aplicados ao tema. A Seção 3 apresenta a metodologia adotada e a Seção 4, a modelagem

matemática proposta. Na Seção 5 são descritos os resultados computacionais e suas discussões. Por fim, a Seção 6 apresenta as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### 2.1. Atendimento de acidentes em rodovias federais

Dentre as principais tarefas compreendidas nos Serviços Médico de Emergência (SME) em acidentes com vítimas, fatais ou não, estão a estabilização das condições dos pacientes e o traslado para uma instalação de cuidados médicos apropriada (Aboueljine *et al.*, 2014). Para que isso seja viabilizado, os SME têm o tempo de resposta como fator crítico para a eficácia do atendimento, ou seja, o período decorrido entre a consumação do acidente e os primeiros socorros pode determinar a intensidades das sequelas, bem como se as vítimas sobreviverão ou não (Elvik, 2009; Li *et al.*, 2011; Wilde, 2012; Billhardt *et al.*, 2014; Maleki *et al.*, 2014). Deste modo, os veículos utilizados no SME devem estar localizados de tal maneira que o tempo até o atendimento seja o menor possível, permitindo mitigar a gravidade das lesões e reduzir o número de fatalidades.

No cenário internacional, a Lei de Serviços Médicos de Emergência dos Estados Unidos determina que o tempo máximo entre o momento de ocorrência de um acidente até seu atendimento seja de dez minutos para 95% dos pedidos que acontecem na área urbana (Ball e Lin, 1993). No Brasil, no entanto, os órgãos estaduais do Rio Grande do Sul e São Paulo são mais tolerantes para uma menor quantidade de acidentes e um maior tempo máximo até o atendimento. Ambas as agências, Agência de Transporte de São Paulo (ARTESP) e Agência Estadual de Regulação dos Serviços Públicos Delegados do Rio Grande do Sul (AGERGS), fixam o nível de serviço em 90%, isto é, o percentual de acidentes atendidos. Para a ARTESP este nível de serviço nos casos de acidentes com vítimas deve ser realizado em até dez minutos, enquanto, para AGERGS o período é de trinta minutos (Dexheimer, 2012). Já Geroliminis *et al.* (2009) consideram desejável uma cobertura de 90% dos incidentes em menos de quinze minutos para determinação da localização das bases de veículos para atendimento em áreas urbanas. O nível de serviço prestado tanto do ponto da saúde quanto do econômico, está diretamente associado ao planejamento da localização e dimensionamento da frota, mix de veículos e tripulação, que prestarão os serviços (Takeda *et al.*, 2007; Chong *et al.*, 2015).

Outro aspecto importante de se ponderar na ocorrência de acidentes é a obstrução da via, o que pode gerar congestionamentos. Isso pode acarretar: aumento dos tempos de viagens; reduções na velocidade de viagem, aumentando consumo de combustíveis e outros componentes veiculares; aumento do estresse imposto a motoristas e passageiros, devido a paradas e retomadas. Os efeitos dos engarrafamentos são afetados por características dos incidentes como: frequência; duração (DOT, 1998). A desobstrução da via é feita por equipes, compostas por veículos específicos e pessoal treinado, e somente após autorização pelas autoridades responsáveis por investigar as condições do acidente. Quanto a frequência de ocorrência, pouco pode ser feito pelo atendimento de emergência. Em relação a duração, tais equipes podem reduzi-la, por exemplo, estando a postos o mais rápido possível.

### 2.2. Problemas de Localização para atendimento a emergência

Os problemas de localização são comumente utilizados para o posicionamento geográfico de facilidades, buscando a otimização de critérios preestabelecidos, para atendimento a determinada demanda. Pizzolato *et al.* (2012) realiza uma revisão dos problemas de localização

com base nos problemas  $p$ -mediana e suas variantes. Um mapeamento geral de trabalhos de localização no cenário brasileiro pode ser encontrado em Guimarães *et al.* (2018).

O trabalho de Brotcorne *et al.* (2002) mostra a evolução de modelos de localização e realocação de ambulâncias. Destaca-se que os modelos podem ser classificados em duas categorias principais, determinísticos e probabilísticos. Os modelos determinísticos são utilizados no estágio de planejamento e ignoram a estocasticidade nas considerações sobre a disponibilidade de ambulâncias. Modelos probabilísticos consideram que as ambulâncias operam servidores em um sistema de filas e nem sempre conseguem atender a uma chamada. Adicionalmente, a modelagem dos problemas também podem considerar a existência de eventos aleatórios ao longo de todo o processo de atendimento emergencial, como por exemplo, a duração e comportamento das filas de atendimento, tempo de deslocamento (dependendo do fluxo da via), entre outros.

Andrade e Cunha (2014) propõem um modelo matemático para o problema de localização de bases de atendimento emergencial e alocação de ambulâncias a essas bases em múltiplos períodos em um horizonte de planejamento definido com realocação das viaturas entre períodos subsequentes com aplicação prática no município de São Paulo. Marques e Queiroz (2014) apresentam um modelo de programação inteira com objetivo de minimizar o custo de instalação de ambulâncias e pontos de atendimento, garantindo um nível mínimo de confiabilidade do serviço prestado. Já em Ferrari *et al.* (2018), foi realizada uma avaliação multiobjetivo de atendimento de emergência a partir de um modelo matemático que considera a população atendida, o número de ocorrências e a distância percorrida.

Por se tratar de um modelo para atendimento a emergência, que envolve cuidado à vida, a solução ótima obtida maximiza os benefícios à sociedade, mitigando a gravidade das lesões e reduzindo o número de fatalidades e o custo associado a elas. Medina (1996) apresenta algumas aplicações comuns da localização de veículos de atendimento de emergências: ambulâncias, veículos de corpo de bombeiros, caminhões reboques e embarcações marítimas para atendimento de acidentes.

Neste contexto, o presente artigo busca estudar problemas de localização em rodovias federais no Brasil. Alguns trabalhos encontrados na literatura, como Mendonça e Morabito (2000), Iannoni e Morabito (2004, 2006 e 2008), fazem uma análise da localização de bases de atendimento em emergências utilizando o método do hipercubo, que localiza bases a partir de filas de atendimento.

### 3. METODOLOGIA

Devido à gravidade e ao grande número de acidentes que ocorrem nas rodovias brasileiras, é de grande importância um atendimento rápido, ainda nos primeiros cuidados médicos fornecidos pelas equipes de emergência, para reduzir o número fatalidades e minimizar possíveis sequelas. Uma boa alocação das bases de atendimento aos acidentes se torna vital para uma operação eficiente, sendo capaz de minimizar o tempo até atendimentos das vítimas. Cada base aberta vem com um custo associado. Assim, uma melhor seleção das suas localidades, também permite que menos bases sejam abertas, reduzindo os custos das operadoras de rodovias, concessionárias ou o próprio governo, e mantendo ainda um alto nível de serviço (atendimento).

Para aplicação do problema proposto, considera-se todo o espaço contínuo de um trecho de 950

quilômetros de rodovia (do Km 0 ao Km 950). Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos por meio dos relatórios divulgados pela Polícia Rodoviária Federal em PRF (2017), e se referem aos acidentes ocorridos no ano de 2015 em trechos da Rodovia Fernão Dias, que faz parte do estado de Minas Gerais na BR-381 (vide Figura 1, rodovia representada pela cor laranja). Com 1220 Km de extensão, a rodovia é a principal via de ligação entre as regiões metropolitanas de Belo Horizonte e São Paulo, apresentando grande relevância para o transporte de carga e de passageiros de todo o Brasil, passando pelos municípios de Lavras, Varginha, Três Corações, Santa Rita do Sapucaí, Pouso Alegre e Extrema, na região Sul de Minas (MG, 2019).



**Figura 1:** Mapa das rodovias federais no estado de Minas Gerais  
Fonte: MG, 2019

Na base de dados acessada haviam registros de 172 ocorrências no ano de 2015, que foram filtrados de acordo com a separação dos acidentes por sentido de deslocamento e quilômetro de ocorrência, não fazendo nenhuma discriminação quanto ao tipo ou gravidade dos acidentes, nem a quantidade de feridos.

Alguns trechos da rodovia têm maior incidência de acidentes, pois são mais perigosos para os motoristas e passageiros que por ali trafegam. Assim, o número de acidentes registrados resultou em 158 locais (pontos de demanda de atendimento de serviços emergenciais). Adicionalmente, considera-se que nenhum acidente acontece ao mesmo tempo que outro, isto é, a ocorrência de um acidente não inviabiliza ou dificulta outro atendimento.

Conforme apresentado anteriormente na revisão bibliográfica, o tempo de resposta é um fator crítico para o sistema, dado que a demora (tempo) até o primeiro socorro pode determinar a intensidade das sequelas e as condições para salvar vidas. Por este motivo, considerou-se que os tempos máximos de deslocamento de uma ambulância localizada em uma determinada base para atender a um acidente não devem ultrapassar tempos aceitáveis de 10, 15 e 30 minutos, conforme apresentado em Geroliminis *et al.* (2009) e Dexheimer (2012).

Decidiu-se avaliar, para cada tempo de deslocamento, as velocidades de 60, 80 e 100 km/h como velocidades médias dos veículos de atendimento a emergência, uma vez que cada trecho

da rodovia tem uma velocidade média calculada. Ressalta-se que por questão de segurança e capacidade, o veículo de atendimento deve cumprir a velocidade máxima de cada trecho.

O modelo de programação linear inteira mista, proposto para a resolução do problema apresentado, permite selecionar qual a melhor localização das bases de atendimento visando a redução dos tempos médios de atendimento, além de determinar a quantidade de atendimentos que cada base realiza. Como um fator secundário, caso haja empate no tempo médio de atendimento, é priorizado o arranjo que utilize um número menor de bases. Apesar da abordagem proposta ser de natureza discreta, o problema foi resolvido de tal forma que fosse possível a instalação de uma base em cada um dos 950 Km do trecho da rodovia, totalizando 951 possíveis bases.

O número mínimo de bases necessárias para a realização dos atendimentos também pode ser obtido pelo modelo, através da variação do número máximo de bases permitidas e da verificação da viabilidade do mesmo. O aumento do máximo de bases permitidas também possibilita observar os efeitos que o crescimento no número de bases tem na média dos tempos para atendimento.

#### 4. MODELAGEM MATEMÁTICA

Esta seção apresenta a formulação do modelo matemático proposto para a solução do problema de localização de bases de veículos de serviços de atendimento a emergências em rodovias federais. Na Tabela 1 é apresentada a notação utilizada.

**Tabela 1:** Notação da formulação matemática

Notação	
<b>Conjuntos:</b>	
B, {i}	Conjunto de localização das bases
A, {j}	Conjunto de localização dos acidentes
<b>Parâmetros:</b>	
$\omega$	Custo de cada base a ser implantada
M	Total de acidentes que ocorrem no trecho da rodovia
$D_{ij}$	Distância da base i para o acidente j
b	Quantidade máxima de bases que podem ser abertas
vel	Velocidade do veículo de atendimento
T_max	Tempo máximo de atendimento aceitável
<b>Variáveis de decisão</b>	
$x_{ij}$	1 se a base i atende o acidente j; 0, caso contrário
$z_i$	1 se a base i é aberta; 0, caso contrário
$y_i$	Número de acidentes atendidos pela base i
$t_s$	Soma dos tempos de atendimento de todos os acidentes que acontecem no trecho da rodovia

$$MIN \quad t_s + \omega \sum_{i \in B} z_i \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in B} D_{ij} x_{ij} \frac{1}{vel} \leq T\_max \quad \forall j \in A \quad (2)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in A} D_{ij} x_{ij} \frac{1}{vel} = t_s \quad (3)$$

$$\sum_{i \in B} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in A \quad (4)$$

$$\sum_{j \in A} x_{ij} = y_i \quad \forall i \in B \quad (5)$$

$$y_i \leq Mz_i \quad \forall i \in B \quad (6)$$

$$y_i \geq z_i \quad \forall i \in B \quad (7)$$

$$\sum_{i \in B} z_i \leq b \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (9)$$

$$y_i \in \mathbb{Z}^+ \quad (10)$$

$$z_i \in \{0,1\}, \quad (11)$$

$$t_s \in \mathbb{R}^+ \quad (12)$$

A Função Objetivo (1) possui duas parcelas. Na primeira, como objetivo principal do modelo, visa-se minimizar o tempo total até os atendimentos. A segunda parcela é dotada de um custo de modo que seu resultado sirva apenas para a escolha do menor número de bases quando há mais de um arranjo de bases com o mesmo tempo total de atendimento.

A Restrição (2) garante que o tempo máximo de deslocamento de cada veículo que sai da base  $i$  para atender o acidente  $j$  ao qual foi alocado não seja superior a um tempo máximo para atendimento aceitável segundo a literatura. A Restrição (3) define  $t_s$  como sendo a soma de todos os tempos de deslocamento para os atendimentos realizados. A Restrição (4) garante que cada incidente  $j$  só pode ser atendido uma única vez. A Restrição (5) define  $y_i$  como sendo o número de atendimentos realizados por cada base, as Restrições (6) e (7) garantem que a base  $i$  seja aberta se houver algum atendimento feito por ela e a Restrição (8) limita um número máximo de bases que podem ser abertas. As Restrições (9), (10), (11) e (12) estão associadas aos domínios das variáveis de decisão.

## 5. RESULTADOS COMPUTACIONAIS E DISCUSSÕES

O modelo foi implementado em Python e a otimização realizada pelo Gurobi. Os resultados foram obtidos em um computador Windows Server® Intel® Xeon® CPU E5-2620 v4 @ 2.10GHz com 2 processadores, 256GB de memória RAM e sistema operacional Windows 7, 64 bits, utilizando o Python 3.6 e o Gurobi 8.0.0.

Devido aos três diferentes tempos máximos para atendimentos recomendados na literatura, e as três diferentes velocidades médias de tráfego consideradas, foram propostos nove cenários conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2: Cenários Propostos**

Cenário	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tempo máximo para atender um acidente (minutos)	10	10	10	15	15	15	30	30	30
Velocidade média de tráfego (Km/h)	60	80	100	60	80	100	60	80	100

A Tabela 3 apresenta os resultados computacionais (número de iterações, nós explorados, tempo total de execução e construção do modelo) dos nove cenários propostos, para o mínimo de bases abertas, tal como a função objetivo obtida. Analisando a Tabela 3, é possível verificar que a cada cenário, o número de nós explorados, iterações e tempo de execução crescem. Nos cenários 1 a 8 os resultados são praticamente da mesma ordem de grandeza, enquanto o último cenário assume grandezas bem maiores, verificando que há uma maior dificuldade para resolver o modelo no cenário 9 em relação ao demais, cenário este que apresenta os parâmetros com maior folga para o modelo, o que dificulta a otimização.

**Tabela 3:** Resultados computacionais do modelo para cada cenário avaliado

Cenário	Função Objetivo	Nós Explorados	Número de Iterações	Tempo Total de Execução (s)	Tempo de construção do modelo (s)	Tempo de otimização (s)
1	11.45	2512	179811	23.57	9.29	14.28
2	10.77	3664	225931	32.61	9.6	23.01
3	10.87	4337	318997	48.1	8.47	39.63
4	17.23	3424	245104	44.93	9.52	35.41
5	18	4762	330144	70.38	9.36	61.02
6	15.38	7079	306218	99.32	9.51	89.81
7	38.18	5611	357802	170.76	7.36	163.4
8	30.25	8101	386671	219.06	9.58	209.48
9	33.19	42111	12435194	3442.84	8.3	3434.54

A Tabela 4 apresenta o resultado para cada um dos cenários, o número mínimo de bases abertas, número de atendimentos – máximo, médio e mínimo realizados por cada base, tempo médio e maior tempo de atendimento. Os resultados obtidos permitem analisar que quanto maior o tempo máximo de atendimento e velocidade de tráfego, menos bases precisam ser abertas, sendo o problema bastante sensível a escolha destes parâmetros. Nota-se que o tempo médio obtido em cada cenário é bem inferior ao limite de tempo de deslocamento admitido no modelo, representando, em média, 40% a menos que o maior tempo para atendimento. Adicionalmente, é possível observar que o maior número de atendimentos que uma mesma base realiza é 19 para os cenários 1 e 2, 26 no caso dos cenários 3, 4 e 5, 28 no cenário 7 e 8, 30 para o cenário 6, e por fim, 51 para o cenário 9. Conforme os cenários vão se tornando menos rigorosos quanto ao tempo de deslocamento, e as velocidades mais rápidas, menos bases são necessárias, e mais atendimentos são realizados por uma única base.

**Tabela 4:** Número de Bases Abertas e Tempos para Atendimento

Cenário	Número de bases abertas	Num. min. atend.	Média atend.	Num. máx. atend.	Média dos tempos para atend. (minutos)	Maior tempo para atend. (minutos)
1	29	1	5.9	19	4.26	10
2	23	3	7.5	19	4.14	9.9
3	20	3	8.6	26	4.21	9.84
4	21	3	8.2	26	6.71	15
5	17	3	10.1	26	6.94	15
6	15	4	11.5	30	6.22	15
7	12	5	14.3	28	14.64	30
8	10	6	17.2	28	11.87	30
9	8	11	21.5	51	12.59	30

A Tabela 5 apresenta a localização e o número mínimo de bases abertas para cada cenário

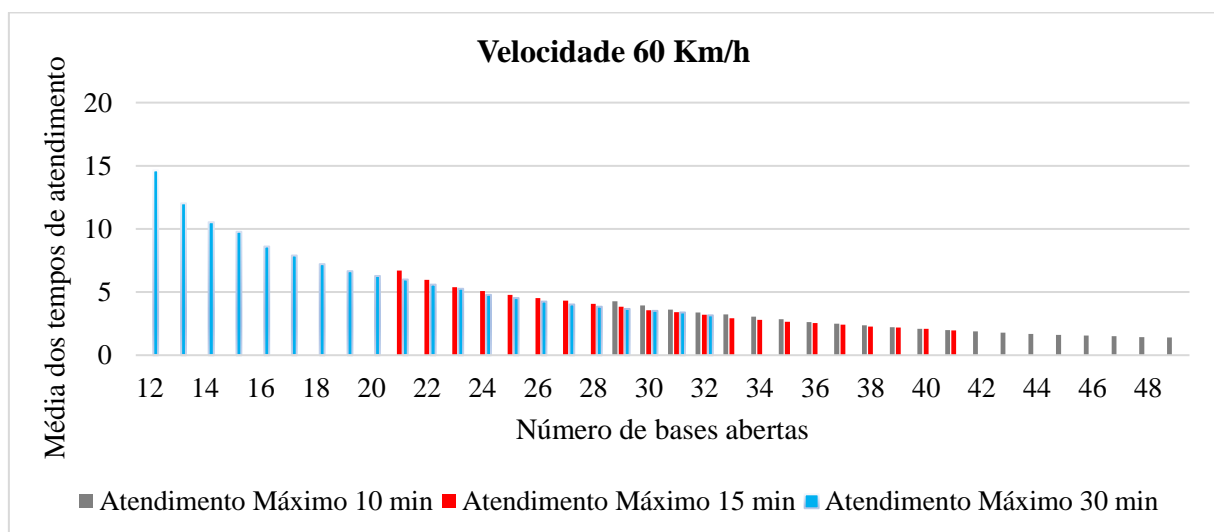


proposto. Verifica-se que não existem localizações fixas, isto é, uma mesma base que esteja presente em todos os cenários, mostrando a sensibilidade da alocação das bases em relação aos parâmetros utilizados.

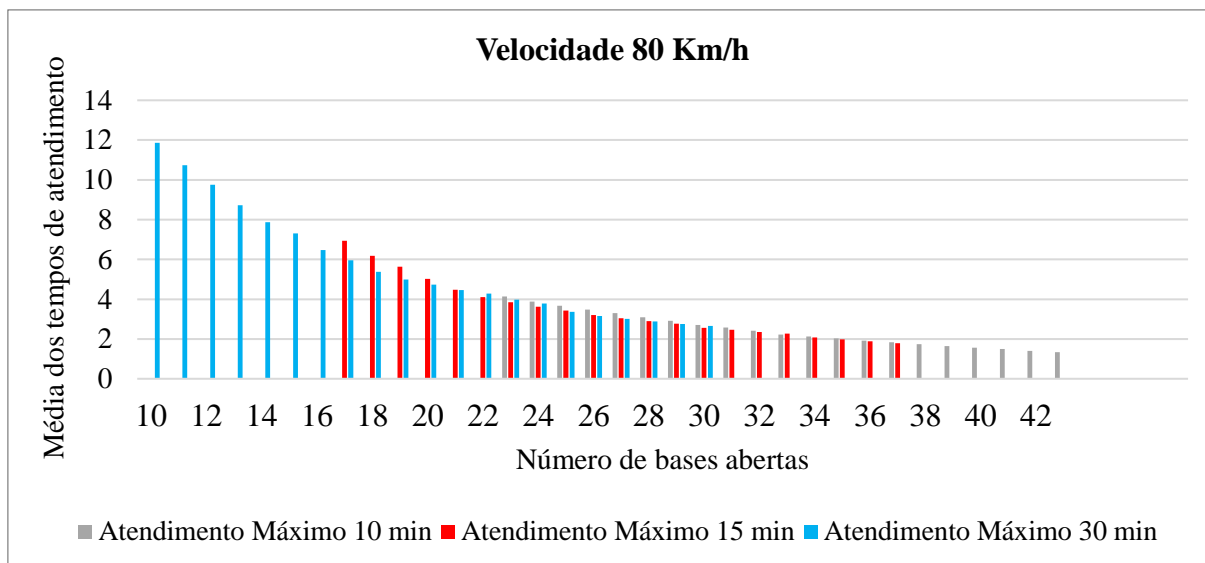
**Tabela 5: Localização (Km) e Número de atendimentos de cada base**

Cenário	Número de bases abertas	Km de localização da base
1	29	(143-166-187-209-237-260-289-322-344-365-394-426-449-488-508-529-557-614-637-657-684-700-730-758-784-822-884-907-938)
2	23	(156-196-247-286-320-344-365-403-447-489-510-529-559-625-653-694-739-757-781-819-887-907-938)
3	20	(158-193-244-285-325-353-400-449-492-526-559-628-650-694-741-778-816-887-907-937)
4	21	(152-194-245-285-325-355-401-448-493-525-558-626-652-694-730-757-779-817-887-907-937)
5	17	(161-189-240-304-345-389-436-492-526-558-631-674-720-776-816-890-933)
6	15	(168-234-284-341-394-449-493-538-636-687-730-776-816-890-936)
7	12	(173-237-314-368-446-493-533-637-712-786-847-915)
8	10	(183-261-343-431-492-533-643-726-794-905)
9	8	(188-310-411-513-638-730-794-905)

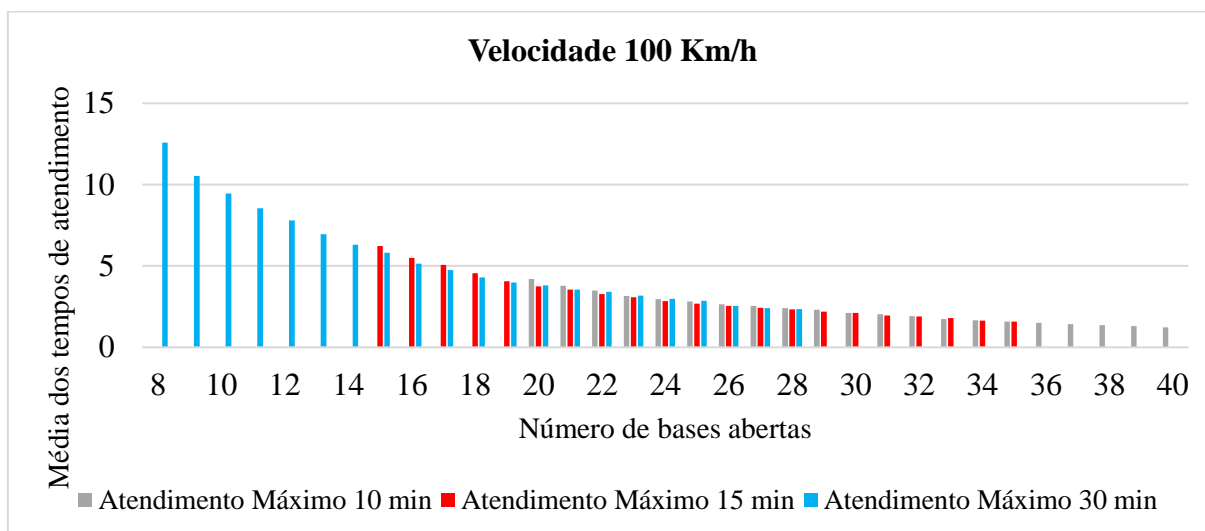
Foi realizada a análise do comportamento do problema, para cada um dos cenários, quando há um aumento no número de bases permitidas. Os resultados do tempo médio de atendimento para diferentes números de base são apresentados na Figura 1, que agrupa os cenários 1, 4 e 7, na Figura 2, que agrupa os cenários 2, 5 e 8, e na Figura 3, que agrupa os cenários 3, 5 e 9. Pela análise das Figuras 1, 2 e 3, verifica-se, que para um mesmo número de bases abertas e uma mesma velocidade, o tempo médio para atendimento cai com a relaxação do tempo máximo considerado aceitável. Observa-se que independente da velocidade do veículo, à medida que o tempo máximo aceitável para o atendimento diminui, mais bases são necessárias para garantir o atendimento. Isto é, quando o modelo é menos rigoroso em relação ao tempo de atendimento, faz com que menos bases sejam abertas e que elas necessitam atender a um grupo maior de incidentes.



**Figura 1: Média dos Tempos de Atendimento e Número de Bases Abertas para a velocidade de 60 Km/h**



**Figura 2:** Média dos Tempos de Atendimento e Número de Bases Abertas para a velocidade de 80 Km/h



**Figura 3:** Média dos Tempos de Atendimento e Número de Bases Abertas para a velocidade de 100 Km/h

Outra avaliação que pode ser feita, para todos os cenários, é a grande relação presente entre o número de bases abertas e o tempo médio de atendimento do acidente, ou seja, quanto mais bases são instaladas, menor é o tempo médio para atendimento, indicando que as bases estão mais próximas dos locais dos acidentes. Estes resultados permitem uma avaliação que considere os ganhos obtidos pela diminuição do tempo de atendimento e os custos adicionais associados a instalação de um número maior de bases.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil é um país majoritariamente rodoviário, por esta razão, acidentes como colisões, capotamento, dentre outros são comuns no cenário nacional. Portanto, a busca para minimizar os tempos de atendimento aos acidentes é de extrema importância, podendo salvar vidas. Inclusive, algumas fatalidades poderiam ser evitadas caso o tempo de resposta para atendimento

de acidentes fosse menor.

Nesse contexto, este artigo apresentou um modelo matemático de programação linear inteira mista para problemas de localização de bases de veículos de serviços médicos emergenciais em rodovias federais. O objetivo do modelo proposto visa atender todos os acidentes no menor tempo possível, respeitando os tempos de até atendimento considerados aceitáveis. A modelagem proposta é inovadora pois minimiza os tempos de deslocamento de ambulâncias de suas bases aos acidentes, ao mesmo tempo que reduz o número de bases necessárias para o atendimento. Avaliando os resultados e cenários propostos verifica-se bons resultados computacionais em relação ao número de iterações, a quantidade de nós explorados e o tempo de solução.

Como próximas etapas a serem desenvolvidas para tornar o modelo proposto neste artigo mais robusto e compatível com a realidade, planeja-se incluir um simulador que possa considerar as demandas (ocorrência de acidentes) de maneira estocástica, com acidentes que acontecem de maneira simultânea, o fluxo da via, a sazonalidade e os horários de congestionamento. Ademais, pretende-se incluir no modelo custos operacionais para a instalação de bases, ou combustível; considerar a velocidade de cada trecho com base no Km do acidente e pesos para a fila de atendimento com relação a gravidade do acidente e números de vítimas. Adicionalmente, planeja-se resolver simultaneamente um modelo de localização e roteamento de veículos para atendimento de acidentes rodoviários, tal que o problema de localização seja resolvido em dois níveis hierárquicos. O primeiro como proposto neste artigo para localizar as melhores bases para atendimento de acidentes. O segundo, dado que as localizações das bases já estão definidas, determinar a melhor localização dos hospitais locais que realizam atendimento médico emergencial, com restrições de sua capacidade de atendimento.

#### Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e incentivo a pesquisa. À Polícia Rodoviária Federal pelo mapeamento dos acidentes em rodovias brasileiras, fonte de dados deste estudo.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aboueljinnane, L.; Sahin, E.; Jemai, Z.; Marty, J., 2014, “A simulation study to improve the performance of an emergency medical service: Application to the French Val-de-Marne department”. *Simulation Modeling Practice and Theory*, v. 47, pp. 46-59.
- Andrade, L. A., Cunha C. B. 2014, “Modelo de apoio à decisão para o problema de posicionamento de bases, alocação e realocação de ambulâncias em centros urbanos: estudo de caso no município de São Paulo”, *Transportes*, v. 22, n.2, p. 34-50.
- Billhardt, H.; Lujak, M.; Sánchez-Brunete, V.; Fernández, A.; Ossowski, S., 2014, “Dynamic coordination of ambulances for emergency medical assistance services”. *Knowledge-Based Systems*, v. 70, pp. 268-280.
- Ball, M. O., Lin, L. F., 1993, “A reliability model applied to emergency service vehicle location”. *Operation Research*, v. 41, n. 1, p. 18-36.
- Brasil. Ministério das Cidades. Plano Nacional de Redução de Acidentes e Segurança Viária para a Década 2011-2020, Proposta Preliminar. Brasília, DF, 2010.
- Brasil. Congresso Nacional. Lei nº 13.614. Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito. Brasília, DF, 2018.
- Brotcorne, L., Laporte, G., Semet, F., 2003, “Ambulance location and relocation models”, 2003, *European Journal of Operational Research*, n. 147, p. 451-563.
- Chong, K. C.; Henderson, G.; Lewis, M. E., 2015, “The vehicle mix decision in emergency medical service systems”. *Manufacturing & Service Operations Management*, v. 18, n. 3, pp. 1-14.
- CNT, 2019, Boletim Estatístico, dezembro, Confederação Nacional do Transporte. Acesso em: 16/06/2019. Disponível em: <http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/Boletim%20unificado/Fevereiro/BOLETINS%20T%C3%89CNICO.S%20DA%20CNT%20-%20FEVEREIRO.pdf>.

- Davis, G. A., 2004, "Possible Aggregation Biases in Road Safety Research and a Mechanism Approach to Accident Modeling", *Accident Analysis and Prevention*, v. 36, n. 6, pp. 1119–1127.
- Dexheimer, L., 2012. A pegada ecológica dos incidentes rodoviários. 103p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- DNIT, 2013, *Relatório dos Levantamentos Funcionais das Rodovias Federais*, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília, DF.
- DOT, 1998, *Highway Cost Allocation Study Final Report*, FHWA/DOT, Department of Transportation, Wash., D.C.
- Elvik, R.; Høy, T.; Vaa, M.; Sørensen, M., 2009, *The Handbook of Road Safety Measures*. 2 ed. Bingley, Emerald Group Publishing.
- Ferrari, T., Vieira, B. S., Camara, M. V. O., Ribeiro, G. M., Nassi, C. D., 2018, “Uma avaliação multiobjetivo de atendimentos de emergência com base na população, no número de ocorrências e na distância percorrida pelos veículos de resgate”, *Transportes*, v. 26, n. 3, p. 145-158.
- Ferraz, C., Raia Jr., A., Bezerra, B., Bastos, T., Rodrigues, K. (2012) *Segurança viária*. São Carlos: Suprema gráfica e editora Ltda.
- Geroliminis, N., Karlaftis, M. G., Skabardonis, A. (2009) *A spatial queuing model for the emergency vehicle districting and location problem*, *Transportation Research Part B*, v. 43, p. 798-811.
- Guimarães, V. A., Ribeiro, G. M., Ferreira, M. A., 2018, Mapping of the Brazilian scientific publication on facility location, *Pesquisa Operacional*, v. 38 p. 308-330.
- Iannoni, A. P., Morabito, R., 2004, “Analisando a configuração e operação de sistemas médico emergencial em rodovias utilizando o modelo hipercubo”, *Simpósio Brasileiro Pesquisa Operacional*, XXXVI, São João del-Rei, Minas Gerais.
- Iannoni, A. P., Morabito, R., 2006, “Modelo hipercubo integrado a um algoritmo genético para análise de sistemas médicos emergenciais em rodovias”, *Gestão e Produção*, v. 13, n. 1, p. 93-104.
- Iannoni, A. P., Morabito, R., 2008, “Otimização da localização das bases de ambulâncias e do dimensionamento das suas regiões de cobertura em rodovias”, *Produção*, v. 18, n. 1, p. 047-063.
- IPEA, 2015, *Relatório de Pesquisa: Acidentes de trânsito nas rodovias federais brasileiras: caracterização, tendências e custos para a sociedade*, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, DF.
- Li, X.; Zhao, Z.; Zhu, X.; Wyatt, T., 2011, “Covering models and optimization techniques for emergency response facility location and planning: a review”. *Mathematical Methods of Operations Research*, v. 74, n. 3, pp. 281-310.
- Maleki, M.; Majlesinasab, N.; Sepehri, M. M., 2014, “Two new models for redeployment of ambulances”. *Computers & Industrial Engineering*, v. 78, pp. 271-284.
- Marques, R. R., Queiroz, T. A., 2014, “Estudo de um modelo de programação inteira para o problema de localização de estações e ambulâncias”, *Congresso Nacional de Matemática Aplicada*, Caldas Novas, Goiás.
- Medina, A. C. (1996) Modelos para dimensionamento de frota e localização de embarcações para atendimento de acidentes marítimos. 1996. 240p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, São Paulo.
- Mendonça, F. C., Morabito, R., 2000, “Aplicação do modelo hipercubo para análise de um sistema médico-emergencial em rodovia”, *Gestão e Produção*, v. 7, n. 1, p. 73-91.
- MG, 2019, Governo de Minas Gerais. Conheça Minas. Rodovias. Acesso em: 04/07/2019. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/conheca-minas/rodovias>.
- Nodari, C., T., Lindau, L., A., 2001 “Auditoria da segurança viária”. *Transportes*, v. 9, n. 2, p. 47-66.
- Pereira, A.C. *Análise de Investimentos em Infraestrutura de Transportes*. 1ª ed. Natal: IFRN, 2011.
- Pizzolato, N. D., Raupp, F. M. P., & Alzamora, G. S., Revisão de desafios aplicados em localização com base em modelos da p-mediana e suas variantes, *Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento*, volume 4, pp. 13-42, 2012.
- PRF, 2017, Site oficial da Polícia Rodoviária Federal, Brasília, DF. Acesso em 17/08/2017. Disponível em: <https://www.prf.gov.br/portal/dados-abertos/acidentes>
- Takeda, R. A.; Widmer, J. A.; Morabito, R., 2007, “Analysis of ambulance decentralization in an urban emergency medical service using the hypercube queuing model”. *Computers & Operations Research*, v. 34, pp. 727-741.
- Who, 2015, *Global status report on road safety*, World Health Organization, Geneva, Suíça.
- Wilde, E. T., 2013, “Do emergency medical system response times matter for health outcomes?”. *Health Economics*, v. 22, pp. 790-806.