



ANALISANDO A CONFIGURAÇÃO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS MÉDICO EMERGENCIAL EM RODOVIAS UTILIZANDO O MODELO HIPERCUBO

Ana Paula Iannoni

Universidade Federal de São Carlos

13565-905 São Carlos, SP

papi@iris.ufscar.br

Reinaldo Morabito

Universidade Federal de São Carlos

13565-905 São Carlos, SP

morabito@power.ufscar.br

Resumo:

O objetivo deste trabalho é analisar a configuração e operação de sistemas de atendimento médico emergencial (SAE) em rodovias utilizando o modelo hipercubo. O modelo é baseado em teoria de filas espacialmente distribuídas, e permite representar as incertezas dos SAE levando em conta a individualidade de seus servidores. Nos SAEs em rodovias, o tempo médio de resposta a um chamado é a principal medida de desempenho para os usuários do sistema. Além disso, a operação destes sistemas é caracterizada por uma política particular de despacho em que somente algumas ambulâncias do sistema podem atender chamadas em uma dada região e duas ambulâncias podem atender uma única chamada (múltiplo despacho). Desta forma, propomos uma extensão do modelo hipercubo múltiplo despacho para análise dos SAEs em rodovias, utilizando um estudo de caso de um SAE de rodovias do estado de São Paulo.

Palavras-chaves: modelo hipercubo, filas espacialmente distribuídas, despacho de ambulâncias.

Abstract:

The purpose of this study is to analyze the configuration and operation of Emergency Medical Systems (EMS) on highways using the hypercube model. This model is based on spatially distributed queuing theory. It allows representing the uncertainties of the EMS, considering the identity of the servers. In the case of EMS on highways, the mean response time is the main performance measure for the users of the system. Furthermore, these systems operate within a particular dispatching policy, which considers that only some ambulances in the system can travel to a certain region and two ambulances can be dispatched to respond to a single call (multiple dispatch). In this way, we propose an extension of the multiple dispatch hypercube model to analyze the EMS on highways, using a case study of an EMS on highways of São Paulo state.

Keywords: hypercube model, spatially distributed queues, ambulance deployment.

Área: PM e/ou LGT

1. Introdução

Nos sistemas de atendimento médico emergencial em rodovias brasileiras, a rapidez no atendimento a um chamado é uma das principais medidas de desempenho, dado que o atraso no tempo de resposta pode resultar em seqüelas e estado de invalidez dos acidentados. Além disso, em muitas situações, pode também significar a diferença entre a vida e morte das vítimas envolvidas. A qualidade dos primeiros socorros prestados pelos SAEs também influencia demasiadamente no progresso dos tratamentos posteriores no hospital, quando estes são necessários.

Durante os últimos anos, novos SAEs estão sendo instalados e os existentes estão sendo revisados em rodovias brasileiras. Um significativo impulso nesta direção é a implementação de um sistema de contrato de concessão adotado por alguns estados brasileiros. Através deste contrato, organizações privadas passam a ser responsáveis pelo planejamento, manutenção e outras operações de atendimento ao usuário nos trechos sob concessão.

Ao analisar os sistemas de atendimento emergencial (SAEs), os fatores probabilísticos relacionados à distribuição temporal e espacial dos servidores e chamadas devem ser considerados, dado que a operação destes sistemas é caracterizada por incertezas com relação à localização e tempo necessário para atender um determinado chamado. O atraso no tempo de resposta está diretamente relacionado ao conflito entre as variáveis aleatórias da demanda por serviço e as restrições de capacidade do sistema. Assim sendo, estes sistemas podem ser analisados por meio de modelos probabilísticos, que consideram as relações entre a demanda por serviços e o tempo de espera para atendimento aos usuários.

Importantes contribuições podem ser encontradas na literatura de estudos sobre métodos de otimização que incorporam os aspectos probabilísticos dos SAEs. No entanto, a maioria destes métodos apenas considera a aleatoriedade associada à disponibilidade dos servidores e não assumem que há outros aspectos probabilísticos que devem ser considerados na análise. Os estudos de Larson & Odoni (1981), Swersey (1994), Owen & Daskin (1998), Chiyoshi et al. (2000) e Brotcorne et al. (2003) revisam os principais modelos de localização para analisar os sistemas de atendimento emergencial, desenvolvidos nas últimas décadas.

O modelo hipercubo, desenvolvido por Larson (1974) e estendido por vários autores (Swersey, 1994), é baseado nos resultados de Teoria de Filas Espacialmente Distribuídas e aproximações Markovianas. Este modelo tem se mostrado como um método preciso e robusto para analisar os sistemas de emergência, pois permite representar as incertezas de um SAE, considerando a identidade dos servidores, assim como a cooperação e/ou iteração entre os mesmos. O modelo envolve a solução de um sistema linear de $O(2^N)$ equações, cujas variáveis envolvidas correspondem às probabilidades de estado do sistema em equilíbrio. Através destas probabilidades podem ser estimadas importantes medidas de performance para análise e gerenciamento do sistema, tais como cargas de trabalho, tempo médio de resposta e frações de despacho de cada servidor a cada região. Além de sistemas que consideram fila de espera, o modelo também pode ser aplicado a sistema sem filas como é o caso dos SAEs nas rodovias brasileiras.

Como o modelo hipercubo original de Larson (1974) assume hipóteses que limitam sua aplicação, diversas extensões vêm sendo estudadas para análise de sistemas de emergência, principalmente em patrulhamento policial e despacho de ambulâncias. Alguns estudos podem ser encontrados em Larson (1975), Jarvis (1985), Halpern (1977), Chelst & Barlach (1981), Burwell et al (1993) e Mendonça & Morabito (2000; 2001). Em particular, Chelst & Barlach (1981) propuseram um modelo que modifica o modelo Hipercubo de Larson considerando duplo despacho para sistemas que não admitem fila de espera. O estudo apresenta dois modelos derivados das versões exata e aproximada do modelo hipercubo, respectivamente, para análise de um sistema de patrulhamento policial. Os autores mostram que

interessantes medidas de performance podem ser obtidas considerando o despacho de dois servidores idênticos para um mesmo chamado.

Uma direção promissora na análise dos SAE parece ser a integração do modelo hipercubo em métodos de otimização. Algumas publicações com este enfoque são os estudos de Batta et al. (1989), Saydam & Aytug (2003), Chiyoshi et al. (2003), Galvão et al. (2003a) e Galvão et al. (2003b). Alguns exemplos de aplicação do modelo hipercubo são: a localização de ambulâncias em Boston, MA (Brandeau & Larson, 1986) e o patrulhamento policial em Orlando, FL (Sacks & Grief, 1994). No Brasil, alguns exemplos são o atendimento a interrupções na distribuição de energia elétrica em Santa Catarina (Albino, 1994) e o Serviço de Atendimento Médico de Urgência (SAMU) da prefeitura de Campinas, SP (Takeda et al, 2004). Em particular, Mendonça & Morabito (2000, 2001) analisaram o SAE “Anjos do Asfalto”, que atendia um trecho da Via Dutra entre as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro.

Apesar do recente aprimoramento dos sistemas de atendimento ao usuário, o número de acidentes em rodovias brasileiras ainda é preocupante. Além disso, estes sistemas têm sido muito pouco estudados. Dada a relevância dos SAEs em rodovias, o objeto do presente estudo é mostrar como o modelo hipercubo pode ser estendido para análise destes sistemas. Em particular, aplicamos o modelo para estudar um SAE de uma concessionária de rodovias no interior de São Paulo, com uma política especial de despacho, a qual inclui *backup* parcial e múltiplo despacho de ambulâncias. Este artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta uma breve descrição do sistema de atendimento médico emergencial em rodovias, a seção 3 descreve o modelo hipercubo múltiplo para análise dos SAE em rodovias; a seção 4 apresenta os resultados para algumas medidas de desempenho do sistema analisado e a seção final discute conclusões deste estudo e apresenta as referências consultadas.

2. O sistema de atendimento médico emergencial em rodovias brasileiras:

Alguns SAEs em rodovias brasileiras são gerenciados por organizações privadas como parte do contrato de concessão com o governo do estado. De acordo com este contrato, estas organizações devem realizar todas as obras necessárias de planejamento, ampliação e melhoria das rodovias, assim como prover todo tipo de assistência ao usuário. Neste estudo analisamos o sistema de atendimento médico emergencial no SAE de uma concessionária em trechos de rodovias no interior de São Paulo. Este sistema é similar a outros SAEs em rodovias gerenciados pelo governo do estado ou outras concessionárias.

O SAE em rodovias analisado possui cinco bases de ambulâncias ao longo do trecho de concessão, sendo que cada base possui uma ambulância. O sistema também conta com uma equipe de profissionais especializados composta por médicos, resgatistas e enfermeiros. A central de informações, localizada em uma das bases, é responsável por receber as chamadas por atendimento, despachar as ambulâncias de acordo com a política de despacho do sistema e monitorar os movimentos das mesmas. A política de despacho é enviar a ambulância da base mais próxima do local da chamada. Se a mesma estiver ocupada, a segunda ambulância mais próxima (chamada *backup*) é despachada. Caso as duas estiverem ocupadas a chamada é transferida para outro sistema (por exemplo, o hospital mais próximo) e a chamada é considerada perdida para o sistema.

Note que, com esta política particular de despacho, a chamada pode ser atendida por somente duas ambulâncias (preferencial e *backup*), pois a terceira ambulância nunca é despachada. Além disso, em certos tipos de acidentes, duas ambulâncias podem ser despachadas para uma mesma chamada. Portanto, este sistema é um sistema sem filas que não respeita duas das principais hipóteses do modelo hipercubo original de Larson (1974). Estas hipóteses assumem que qualquer servidor pode viajar a qualquer átomo e apenas um servidor pode ser despachado para cada chamada. A figura 1 representa o SAE analisado.

- Política de despacho: o despacho dos servidores é realizado de acordo com uma lista de preferência. Quando ocorre uma chamada em um determinado átomo, somente os servidores desta lista podem ser despachados. Uma chamada tipo 1 pode ser atendida por um servidor preferencial ou um *backup*. Uma chamada tipo 2 é atendida por dois servidores ao mesmo tempo, e é perdida pelo sistema se os dois servidores preferenciais estiverem ocupados. Note que, os dois servidores preferenciais de uma chamada tipo 2 de um dado átomo corresponde aos servidores preferencial e *backup* de uma chamada tipo 1 no mesmo átomo. Além disso, se uma chamada tipo 2 ocorre quando um dos dois servidores estiver ocupado, o outro disponível deve atender sem ajuda de um terceiro servidor do sistema.
- Tempo de atendimento: o tempo médio de atendimento para cada servidor é conhecido e inclui o tempo de *set-up* (preparação), o tempo de viagem do servidor ao local da chamada, o tempo em cena e o tempo de retorno do servidor a sua base. O modelo também admite que o desvio padrão dos tempos de atendimento é aproximadamente igual à média (pois o tempo de atendimento é representado por uma distribuição exponencial negativa). Porém, razoáveis aproximações desta hipótese não representam significantes alterações na acuracidade do modelo (Larson & Odoni, 1981). Se o sistema não admite filas, como é o caso presente, esta suposição é ainda mais desnecessária, pois os modelos M/M/N/N e M/G/N/N têm a mesma distribuição de equilíbrio. As chamadas do tipo 1 são atendidas por um servidor j cujo tempo de serviço é exponencialmente distribuído com média $1/\mu_j$ e as chamadas do tipo 2 são atendidas por dois servidores j e l , com tempo de serviço exponencial independente $1/\mu_j$ e $1/\mu_l$, respectivamente. Note que, com relação ao tempo de atendimento, uma chamada do tipo 2 é tratada como duas chamadas tipo 1 distintas, sendo atendidas cada uma por um servidor. Tal consideração mantém o mesmo número de estados do sistema do modelo hipercubo original.;
- Tempo de viagem: o tempo de viagem entre cada par de átomos é conhecido ou pode ser estimado através de conceitos de probabilidade geométrica. As variações no tempo de atendimento devido a variações no tempo de viagem são consideradas de segunda ordem quando comparadas a variações no tempo em cena ou no tempo de *set-up*.

Esta específica política de despacho também requer modificações na determinação das equações de equilíbrio dos estados do sistema com relação ao modelo hipercubo original. Note que, naquele modelo uma transição pode ocorrer somente com a mudança de estado de apenas um servidor do sistema e uma chamada é apenas perdida quando todos os servidores estão ocupados. No modelo hipercubo múltiplo despachado para os SAE em rodovias, uma transição também ocorre quando dois servidores se tornam ocupados com a chegada de uma chamada do tipo 2 no sistema. Além disso, chamadas podem ser perdidas se os servidores de sua lista de despacho estão ocupados mesmo que há outros servidores disponíveis no sistema.

As principais medidas de desempenho obtidas pelo modelo hipercubo múltiplo despacho são: - cargas de trabalho dos servidores do sistema; - probabilidade de perda para chamadas tipo 1 e tipo 2; - tempo médio de viagem para chamadas tipo 1; - tempo médio de viagem para chamadas tipo 2 considerando a primeira ambulância que chega no local; - tempo médio de viagem para chamadas tipo 2 considerando o tempo de viagem das duas ambulâncias que viajam para o local; - tempo médio de viagem para primeira e segunda ambulância que chegam para atender uma chamada do tipo 2 (medidas do ponto de vista do usuário); - tempo médio de viagem para as ambulâncias preferencial e *backup* em um atendimento de chamadas do

tipo 2 (medidas do ponto de vista do sistema); - frequências de despacho de cada servidor a cada átomo, considerando os dois tipos de chamadas, e outras medidas.

4. Resultados:

Para aplicar o modelo hipercubo, inicialmente dividimos o trecho de rodovia analisado em 8 átomos, de acordo com as áreas primárias de cada ambulância estabelecidas pelos operadores do sistema. Os dados foram coletados na central de operações do SAE analisado, e correspondem aos atendimentos realizados durante o período de dezembro 2001 à junho 2002. A tabela 1 apresenta os dados de entrada do processo de chegada em cada átomo do sistema (taxas de chegada de chamadas do tipo 1 e do tipo 2), assim como a lista de preferência de despacho (ambulância preferencial e *backup*) e o tamanho de cada átomo. A tabela 2 apresenta os dados do processo de atendimento (taxas de atendimento) e fração de ocupação de cada servidor do sistema.

Tabela 1- Dados do processo de chegada em cada átomo

Átomo j	Taxa de chegada tipo 1 $\lambda_j^{[1]}$ chamadas/h	Taxa de chegada tipo 2 $\lambda_j^{[2]}$ chamadas/h	Servidor preferencial	Servidor <i>backup</i>	Extensão do átomo j (km)
1	0,06181	0,00340	1	2	32
2	0,04819	0,00476	2	1	42
3	0,00693	0,00040	1	2	15
4	0,00996	0,00042	3	1	38
5	0,00494	-	3	2	26
6	0,01139	-	4	3	45
7	0,01440	-	4	5	16
8	0,01937	0,00196	5	4	20

Tabela 2 – Dados do processo de atendimento

Servidor i	Taxa de atendimento μ_i chamadas/h	Fração de ocupação
1	1,3085	0,0587
2	1,0642	0,0532
3	0,8247	0,0182
4	1,0852	0,0252
5	1,1495	0,0185

Note que, $\lambda = \sum_{j=1}^8 (\lambda_j^{[1]} + \lambda_j^{[2]}) = 0,1878$ e $\mu = \sum_{i=1}^5 \mu_i = 5,4321$. Observe nas tabelas 1 e 2 que, os servidores 1 e 2 possuem maior carga de trabalho, dado que suas áreas de atendimento correspondem às áreas com maior taxa de chegadas.

Realizamos testes de aderência (*Kolmogorov-Smirnov* e *Qui-quadrado*) para verificar a hipótese de que o processo de chegada é Poisson. Os resultados obtidos desta análise, com nível de significância $\alpha = 0,05$, mostraram que, para todos os átomos, não se pode rejeitar esta hipótese. Aplicando os mesmos testes de aderência na análise do processo de atendimento, com nível de significância $\alpha = 0,05$, a hipótese de que a distribuição dos tempos de atendimento é exponencial deve ser rejeitada para todos os servidores. Portanto, se trata de um sistema M/G/N/N (e não M/M/N/N), similarmente ao sistema analisado por Mendonça & Morabito (2000; 2001). Porém, como comentado em Jarvis (1985) e Chiyoshi et al (2000), este tipo de sistema pode ser analisado pelo modelo hipercubo sem que a análise seja comprometida.

Aplicamos também a análise de variância para verificar a variabilidade entre os tempos médio de atendimento dos servidores. Esta análise mostrou que, com nível de significância $\alpha = 0,05$, as diferenças são significantes e os servidores devem ser considerados não homogêneos na aplicação do modelo hipercubo (i.e, as taxas de atendimento μ_j são distintas). Os dados de tempo médio de viagem entre as bases dos servidores e átomos do sistema foram obtidos utilizando os dados de velocidade média de cada servidor e a distância entre o local da chamada à base de cada servidor, considerando que há dois tipos de despacho: chamadas tipo 1 e chamadas tipo 2.

Equações de equilíbrio:

A equação de equilíbrio para cada estado do sistema pode ser construída considerando as transições para fora do estado e as transições para dentro do estado. Dado que o SAE analisado tem $N = 5$ servidores, há $2^5 = 32$ estados possíveis para o sistema. Utilizando a lista de preferência de despacho da tabela 1, as equações de equilíbrio podem ser formuladas como a expressão (1) abaixo, que corresponde a equação de equilíbrio do estado 11001 (com servidores 1, 2 e 5 ocupados e servidores 3 e 4 livres):

$$\begin{aligned} p_{11001}((\lambda_4^{[1]} + \lambda_5^{[1]} + \lambda_6^{[1]} + \lambda_7^{[1]} + \lambda_8^{[1]} + \lambda_4^{[2]} + \lambda_5^{[2]} + \lambda_6^{[2]} + \lambda_7^{[2]} + \lambda_8^{[2]}) + \mu_1 + \mu_2 + \mu_5) = \\ p_{00001}(\lambda_1^{[2]} + \lambda_2^{[2]} + \lambda_3^{[2]}) + p_{10001}(\lambda_1^{[1]} + \lambda_2^{[1]} + \lambda_3^{[1]} + \lambda_1^{[2]} + \lambda_2^{[2]} + \lambda_3^{[2]}) + \\ p_{01001}(\lambda_1^{[1]} + \lambda_2^{[1]} + \lambda_3^{[1]} + \lambda_1^{[2]} + \lambda_2^{[2]} + \lambda_3^{[2]}) + p_{11000}(\lambda_8^{[1]}) + p_{11101}(\mu_3) + p_{11011}(\mu_4) \end{aligned} \quad (1)$$

Observe que, de acordo com o lado esquerdo da expressão (1), o sistema não permite que chamadas tipo 1 ou tipo 2 dos átomos 1, 2 e 3 sejam atendidas, pois neste estado os 2 servidores preferenciais destes átomos estão ocupados. Embora o servidor 5 esteja ocupado, chamadas de ambos os tipos nos átomos 7 e 8 são atendidas pelo servidor 4. Os valores obtidos para as probabilidades de estado mostraram que o sistema está na maior parte do tempo com todos servidores disponíveis, pois $p_{00000} = 0,8434$ e $p_{11111} = 0,00000034$.

A tabela 3 apresenta os resultados da carga de trabalho (ρ_i) para cada ambulância obtidos pelo modelo, e os compara com os valores obtidos na análise da amostra de dados:

Tabela 3 – Resultados para carga de trabalho dos servidores

Servidor	ρ_j Modelo	ρ_j Amostra	Desvio relativo
1	0,0578	0,0587	-1,53%
2	0,0537	0,0532	0,94%
3	0,0186	0,0182	2,19%
4	0,0253	0,0252	-0,39%
5	0,0185	0,0185	0%

Observe que, ρ_1 (máximo valor) é mais que 200% maior que ρ_5 (mínimo valor). Os desvios dos resultados do modelo para a amostra são pequenos, e o desvio médio é de apenas 1,0%. A probabilidade de perda para uma chamada de qualquer tipo no sistema, obtida pelo modelo, é 0,006.

Outras medidas de desempenho calculadas pelo modelo hipercubo são as freqüências de despacho de cada ambulância a cada átomo do servidor, tais como:

$f_{ij}^{[1]}$ - freqüência de despachos do servidor i ao átomo j para atender chamadas do tipo 1 no sistema, considerando o total de chamadas deste tipo;

$f_{(i,l)j}^{[2]}$ - freqüência de despachos do servidor i e l ao átomo j para atender chamadas do tipo 2, considerando o total de despachos tipo 2 no sistema;

$f_{ij}^{[2]}$ - freqüência de despachos que servidor i atende sozinho chamadas do tipo 2 no átomo j considerando o total de despachos tipo 2 no sistema;

Outras medidas de freqüência para cada tipo de chamada também podem ser calculadas considerando o total de despachos no sistema. Utilizando as medidas de freqüência de despacho pode determinar as medidas de tempo de viagem. Por exemplo, a expressão (2) abaixo determina o tempo médio de viagem para chamadas do tipo 1 e a expressão (3) determina o tempo médio de viagem no sistema para chamadas do tipo 2 (considerando a primeira ambulância que chega no local da chamada quando há duplo despacho):

$$\bar{T}^{[1]} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{N_A} f_{ij}^{[1]} t_{ij} \quad (2)$$

$$\bar{T}^{[2]} = \sum_{i=1}^{N_A} \left[\sum_{l=j+1}^N \sum_{j=1}^{N-1} f_{(i,l)j}^{[2]} \min(t_{ij}, t_{lj}) \right] + \sum_{j=1}^N f_{ij}^{[2]} t_{ij} \quad (3)$$

onde t_{ij} é o tempo médio de viagem do servidor i ao átomo j ;

A tabela 4 apresenta algumas medidas agregadas de tempos de viagem calculadas pelo modelo hipercubo, e compara estes resultados com os resultados obtidos pela análise da amostra de dados. Algumas destas medidas também são comparadas com os resultados da simulação deste sistema. As medidas apresentadas na tabela 4 são definidas da seguinte forma:

$\bar{T}^{[1]}$ - tempo médio de viagem no sistema para chamadas do tipo 1;

$\bar{T}^{[2]}$ - tempo médio de viagem no sistema para chamadas do tipo 2 (considerando a primeira ambulância que chega no local da chamada quando há duplo despacho);

\bar{T}_t - tempo médio de viagem considerando as duas ambulâncias que viajam para atender uma chamada do tipo 2;

\bar{T}_p - tempo médio de viagem para a ambulância preferencial da uma chamada do tipo 2 e

\bar{T}_F - tempo médio de viagem para a segunda ambulância que chega no local da chamada quando há duplo despacho.

Tabela 4 - Medidas agregadas de tempo médio de viagem no sistema (min):

Medida (min)	Hipercubo	Amostra	Desvio	Simulação	Desvio
$\bar{T}^{[1]}$	6,277	5,962	5,3%	6,291	-0,22%
$\bar{T}^{[2]}$	7,776	7,201	7,9%	7,778	-0,03%
\bar{T}_t	25,130	25,144	-0,06%		
\bar{T}_p	7,776	7,771	-0,06%	7,778	-0,03%
\bar{T}_F	17,373	17,944	-3,3%	17,364	0,05%

A tabela 4 mostra que os desvios das medidas de tempo de viagem obtidas pelo modelo para os resultados da amostra são pequenos, sendo que o desvio médio é menor que 1%. O desvio máximo é 7,9%, referente à medida do tempo médio de viagem para a primeira ambulância que chega no local de uma chamada do tipo 2. Este resultado pode ser explicado. Isso se deve ao fato de que, pela amostra podemos identificar e computar no cálculo de $\bar{T}^{[2]}$ em quais atendimentos o servidor preferencial foi o segundo a chegar. Enquanto que no modelo e na simulação, utilizamos as médias dos tempos de viagem de cada servidor a cada átomo, e portanto, o servidor preferencial é sempre o primeiro a chegar no local do evento. O intervalo médio entre as chegadas de duas ambulâncias quando ocorre um duplo despacho (tempo de espera da primeira pela segunda ambulância) é de 9,60 minutos.

Determinamos também a fração de chamadas que são atendidas em mais que 10 minutos, considerando que os tempos médios de viagem ambulância – átomos são determinísticos. Os resultados obtidos mostraram que 7,58% das chamadas do tipo 1 e 31,37% das chamadas do tipo 2 são atendidas em tempo superior à 10 minutos.

5. Conclusões:

Este estudo mostra como o modelo hipercubo pode ser estendido para análise dos sistemas de atendimento médico emergencial em rodovias considerando *backup* parcial e múltiplo despacho de ambulâncias. O modelo foi aplicado para um estudo de caso de um SAE de uma concessionária no estado de São Paulo e mostrou-se eficaz em determinar as medidas mais interessantes do sistema, como o tempo médio de viagem para único e múltiplo despacho e a carga de trabalho dos servidores. Os resultados obtidos foram comparados com os valores obtidos da análise da amostra de dados e com os resultados de um modelo de

simulação deste sistema. Os desvios obtidos foram relativamente pequenos, o que mostra que o modelo pode ser aplicado para analisar a operação dos SAEs em rodovias considerando as suas particularidades.

Referências :

- ALBINO J.C.C. (1994) Quantificação e locação de unidades móveis de atendimento de emergência e interrupções em redes de distribuição de energia elétrica: aplicação do Modelo Hipercubo. *Dissertação* (Mestrado em Engenharia de Produção) - Departamento de Engenharia de Produção, Florianópolis : UFSC.
- BATTA R., DOLAN J.M., KRISHNAMURTHY N.N. (1989) The maximal expected covering location problem: Revisited. *Transportation Science* 23, p. 277-287.
- BRANDEAU M., LARSON R.C. (1986) Extending and applying the hypercube queuing model to deploy ambulances in Boston. In: SWERSEY, A.J, INGNALL, E.,J.(eds). *Delivery of Urban Services. TIMS Studies in the Management Science* 22, Elsevier, p.121-153.
- BROTCORNE L., LAPORTE G., SEMET F. (2003). Ambulance location and relocation models. *European Journal of Operational research* 147, p. 451-63.
- BURWELL, T.H.; JARVIS, J.P.; McKNEW, M.A. (1993) Modeling co-located servers and dispatch ties in the hypercube model. *Computers and Operations Research*, v. 20, n. 2, p. 113-119.
- CHELST K.; BARLACH Z. (1981) Multiple unit dispatches in emergency services: models to estimate system performance. *Management Science* 27(12), p.1390-1409.
- CHIYOSHI F., GALVÃO R. D., MORABITO R. (2000) O uso do modelo hipercubo na solução de problemas de localização probabilísticos. *Gestão & Produção* 7(2), p.146-174.
- CHIYOSHI F., GALVÃO R. D., MORABITO R. (2003) A note on solutions to the maximal expected covering location problem. *Computers and Operations Research* 30(1), p. 87-96.
- GALVÃO R.D., CHIYOSHI F., ESPEJO L.G.A., RIVAS M.P.A. (2003a) Solução do problema de localização de máxima disponibilidade utilizando o modelo hipercubo. *Pesquisa Operacional (in press)*.
- GALVÃO R.D., CHIYOSHI F., MORABITO R. (2003b) Towards unified formulations and extensions of two classical probabilistic location models. *Computers & Operations Research*, (in press).
- HALPERN J. (1977) Accuracy of estimates for the performance criteria in certain emergency service queuing systems. *Transportation Science* 11(3). p. 223-242.
- JARVIS J.P. (1985) Approximating the equilibrium behavior of multi-server loss systems. *Management Science* 31, p. 235 - 239.
- LARSON R.C. A (1974) Hypercube queuing model for facility location and redistricting in urban emergency services. *Computers and operations research* 1, p. 67-95.
- LARSON R.C. (1975) Approximating the performance of urban emergency service systems. *Operations Research* 23, p. 845-868.

- LARSON R.C., ODONI A.R. (1981) *Urban operations research*. Prentice Hall. New Jersey.
- MENDONÇA, F.C.; MORABITO, R. (2000) Aplicação do modelo hipercubo para análise de um sistema médico-emergencial em rodovia. *Gestão & Produção*, v.7, n.1, p.73-91.
- MENDONÇA F.C., MORABITO R. (2001) Analysing emergency service ambulance deployment on a Brazilian highway using the hypercube model. *Journal of the Operational Research Society* 52, p.261-268.
- OWEN S., DASKIN M.S. (1998) Strategic facility location: a review. *European Journal of Operational Research* 3(2), p. 423-447.
- SACKS S. R., GRIEF S. (1994) Orlando Police Department uses OR/MS methodology, new software to design patrol districts. *OR/MS Today*, Baltimore, p. 30-32.
- SAYDAN C., REPEDE J., BURWELL T. (1994) Accurate estimation of expected coverage: a comparative study. *Socio -Economic Planning Sciences* 28 (2). p.113 - 120.
- SAYDAM C., AYTUG H. (2003) Accurate estimation of expected coverage: revisited. *Socio -Economic Planning Sciences* 37, p. 69-80.
- SWERSEY A.J. (1994) *Handbooks in OR/MS*. Amsterdam: Elsevier Science B.V., v. 6, p. 151-200.
- TAKEDA R. A., WIDMER, J. A., MORABITO, R. (2004) Aplicação do modelo hipercubo de filas para avaliar a descentralização de ambulâncias em sistema urbano de atendimento médico de emergência. *Pesquisa Operacional* (*in press*).