

# ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE ATENDIMENTO EMERGENCIAL EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: UMA APLICAÇÃO DAS REDES DE PETRI COLORIDAS

**Bruno de Athayde Prata (FEUP)**

bruno.prata@fe.up.pt

**Francisco Régis Abreu Gomes (UFC)**

regis@glen.ufc.br

**Giovanni Cordeiro Barroso (UFC)**

gcb@fisica.ufc.br

**João Bosco Furtado Arruda (UFC)**

barruda@glen.ufc.br



*Os serviços de atendimento de emergências contribuem fortemente para a qualidade de vida dos habitantes dos grandes centros urbanos e, ao mesmo tempo, podem representar elevados custos tanto para o setor privado quanto para a administração pública. A melhoria de tais serviços é, portanto, um problema de grande importância, exigindo abordagens flexíveis e que incorram em baixos tempos de resposta, dado o caráter emergencial. Na cidade de Fortaleza, situada no Nordeste do Brasil, a empresa concessionária de energia elétrica vem se deparando com problemas para a manutenção de um elevado nível de serviço ao cliente, no que concerne à normalização de faltas na rede elétrica. O presente trabalho apresenta a proposição de um modelo, baseado em redes de Petri coloridas, com o objetivo de avaliar o desempenho de sistemas de atendimento emergencial em redes de distribuição de energia elétrica. O modelo proposto foi aplicado em uma instância teste, baseada em dados do sistema real, sendo possível compor diversos indicadores de eficiência.*

*Palavras-chaves: Logística de resposta emergencial, Avaliação de Desempenho, Simulação*

## **1. Introdução**

Os serviços de atendimento de emergências dizem respeito às situações nas quais são designadas equipes para tarefas usualmente relacionadas com as seguintes eventualidades: atendimento médico por ambulâncias, policiamento ou segurança privada, manutenção de redes de infra-estrutura e controle de incêndios pelo corpo de bombeiros.

Fortaleza, capital do Estado do Ceará, é uma das metrópoles regionais brasileiras em constante expansão. Possui cerca de 2,5 milhões de habitantes, distribuídos em dois milésimos do território cearense, constituindo quase um terço da população do Estado e caracterizando-se como a cidade de maior densidade demográfica do Brasil.

A concessionária que administra a rede de distribuição de energia elétrica em Fortaleza, nos últimos anos, tem buscado melhorar seu desempenho no serviço de atendimento de emergências, no que tange à normalização de incidências. Recentemente, a concessionária passou a adotar a política de fornecer a previsão do horário de chegada da equipe ao local da ocorrência da incidência. Verifica-se, atualmente, que existe uma grande diferença entre a previsão fornecida ao cliente e o horário de chegada na prática.

O processo de ocorrência de incidências, detecção de faltas e normalização dos serviços pode ser visto como um Sistema a Eventos Discretos (SED) em que estados discretos ocorrem de forma assíncrona ao longo do tempo. A literatura na área de SED ressalta que as Redes de Petri (RP) constituem uma técnica robusta para a modelagem, análise e simulação de tais sistemas. Nas Redes de Petri Coloridas (RPC), o porte do modelo é, geralmente, bastante reduzido pela adição de conjuntos de dados à estrutura da rede, facilitando a modelagem e a análise de sistemas complexos.

Este trabalho apresenta a proposta de um novo modelo, baseado em redes de Petri coloridas, para a análise do sistema de atendimento de emergências na rede de distribuição elétrica do Município de Fortaleza. O modelo proposto considera o processo de chegada, a detecção e normalização de ocorrências, e permite a avaliação do tempo de resposta àquelas ocorrências, com base em um conjunto de recursos operacionais.

O artigo é estruturado em cinco seções. Na segunda seção são apresentados os conceitos básicos sobre sistemas de atendimento emergencial e redes de Petri coloridas. Na terceira seção apresenta-se o modelo proposto. Na quarta seção são apresentados os experimentos computacionais realizados para avaliação de desempenho do sistema. Por fim, na quinta seção, apresentam-se as conclusões do estudo.

## **2. Conceitos básicos**

### **2.1 Modelagem de Sistemas de Atendimento Emergencial**

Muitos modelos na área de Pesquisa Operacional foram desenvolvidos com o intuito de otimizar sistemas de atendimento de emergências. Tais modelos são essencialmente normativos e primam por estruturar o sistema de atendimento analisando as características estáticas do problema, como, por exemplo, a localização das viaturas no meio urbano e o roteamento de veículos. Levantamentos sobre modelos de otimização aplicados a sistemas de atendimento emergencial podem ser obtidos em Goldberg (2004) e Goldbarg & Luna (2005).

Os modelos de avaliação partem da premissa de que a localização das equipes de atendimento já é determinada, sendo realizadas simulações com o intuito de avaliar o desempenho do

sistema, principalmente no que tange ao tempo médio de atendimento das ocorrências (SOUZA, 1996).

Os objetivos dos sistemas de atendimento emergencial, notadamente no caso de energia elétrica, são: minimizar o tempo de restauração, uniformizar o nível de serviço para todas as zonas cobertas e manter as equipes em funcionamento sem que haja excessiva concentração de ocorrências em qualquer delas (ZOGRAFOS *et al.*, 1993).

Quaisquer estudos relacionados a problemas com sistemas emergenciais devem levar em consideração a natureza estocástica da disponibilidade dos , já que eles podem estar ocupados quando da entrada de uma incidência (ALSALLOUMA & RAND, 2006; IANNONI & MORABITO, 2006).

A demanda por serviços de reparo é gerada a partir de incidentes que provocam a interrupção do fornecimento, que ocorrem randomicamente no tempo e no espaço. A indisponibilidade dos serviços de manutenção tem impacto negativo sobre os consumidores e isto se reflete na confiabilidade que estes depositam nas concessionárias. A frequência e duração da interrupção dependem do tipo de incidente (severidade do problema e tipo de equipamento, por exemplo).

Na análise de sistemas de atendimento emergencial, os fatores probabilísticos relacionados à distribuição temporal e espacial dos e das chamadas devem ser considerados, dado que a operação destes sistemas é caracterizada por incertezas com relação à localização e tempo necessário para atender a um determinado chamado (IANNONI & MORABITO, 2006).

## 2.2 Redes de Petri coloridas

Segundo Murata (1989), as redes de Petri são um tipo de grafo bipartido, dirigido e ponderado, que consegue captar a dinâmica de Sistemas a Eventos Discretos (SED). Uma grande limitação das redes de Petri ordinárias, também denominadas redes lugar-transição, é o fato de que elas demandam uma grande quantidade de lugares e de transições para representar sistemas complexos. Na medida em que a rede se expande, a visão geral do sistema modelado, por parte do analista, começa a ser comprometida, e a análise do sistema modelado, por parte do computador, começa a ser dificultada.

Os sistemas reais, muitas vezes, apresentam processos semelhantes que ocorrem paralelamente ou concorrentemente, diferindo entre si apenas pelos seus insumos e produtos. Nas redes de Petri coloridas, a quantidade de lugares, de transições e de arcos é, geralmente, sensivelmente reduzida pela adição de estruturas de dados às fichas.

De acordo com Jensen (1992), uma representação mais compacta de uma rede de Petri é obtida através da associação de um conjunto de dados (denominados conjuntos de cores) a cada lugar da rede. O conceito de cor é análogo ao conceito de tipo, comum nas linguagens de programação.

Conforme Jensen (1992), uma rede de Petri colorida é uma 9-tupla  $RPC = (\Gamma, P, T, A, N, C, G, E, I)$ , em que:  $\Gamma$  é um conjunto finito, não vazio de tipos, denominados conjunto de cores;  $P$  é um conjunto finito de lugares de dimensão  $n$ ;  $T$  é um conjunto finito de

transições de dimensão  $m$ ;  $A$  é um conjunto finito de arcos tais que  $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \emptyset$ ;  $N$  é uma função de nó, definida a partir de  $A$  por  $P \times T \cup T \times P$ ;  $C$  é uma função de cor, definida a partir de  $P$  em  $\Gamma$ ;  $G$  é uma função de guarda, definida a partir de  $T$ ;  $E$  é uma função de expressão de arcos, definida a partir de  $A$ ; e  $I$  é uma função de inicialização, definida a partir de  $P$ .

O conjunto de cores determina os tipos, operações e funções que podem ser associados às expressões utilizadas na rede (funções dos arcos, guardas, cores, etc.). Os conjuntos  $P$ ,  $T$ ,  $A$  e  $N$  possuem significado análogo aos conjuntos de vértices e de funções de precedência descrito para as redes de Petri ordinárias. As funções de cor mapeiam todos os lugares da rede, incluindo-os em um conjunto de cores. As funções de guarda mapeiam todas as transições da rede, moderando o fluxo de fichas conforme expressões booleanas. As funções de arcos mapeiam cada arco da rede, associando a eles uma expressão compatível com os conjuntos de cores possíveis. Por fim, as funções de inicialização mapeiam os lugares da rede associando-os aos multi-conjuntos existentes.

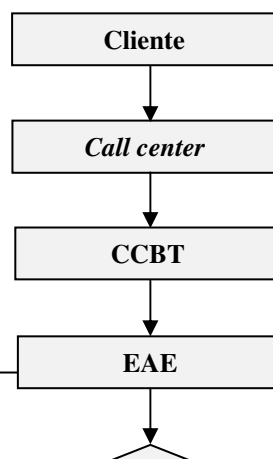
### 3. Apresentação da modelagem proposta

#### 3.1 Descrição do serviço de atendimento emergencial

Com base em visitas à COELCE, foi possível delinear as atividades inerentes ao processo de atendimento de emergências, serviço esse prestado pela empresa supracitada. Tais atividades podem ser enunciadas como segue:

- O cliente (usuário de energia elétrica, seja ele residencial, comercial ou industrial) percebe a interrupção do serviço e telefona para a COELCE;
- A reclamação do usuário é recebida pelo *Call Center*, que faz um diagnóstico inicial do tipo de ocorrência e estipula um tempo de normalização da falta para o cliente;
- O *Call Center* encaminha essa requisição ao Centro de Controle de Baixa Tensão (CCBT), que efetua o despacho de uma Equipe de Atendimento Emergencial (EAE) apta a normalizar a ocorrência pré-diagnosticada;
- Uma EAE chega ao local e efetua o diagnóstico da ocorrência. Duas situações podem ocorrer: existe realmente uma falta na rede ou esta não foi caracterizada. Caso exista ocorrência, se a EAE designada for apta ao tipo de ocorrência identificada, ela normaliza a falta; se não, entra em contato com o CCBT, que designa a viatura adequada para a normalização do sistema. Por fim, se não existe falta, a viatura dá baixa na solicitação e prossegue com sua operação;
- A EAE comunica o status do serviço ao CCBT que, por sua vez, atualiza a situação da ocorrência junto ao *Call Center*.

A seguir, na Figura 1, é apresentado um fluxograma, objetivando ilustrar graficamente o processo acima descrito.



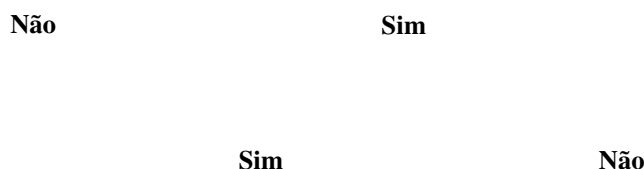


Figura 1 – Processo de atendimento emergencial.

Tendo em vista as características do atendimento, optou-se por salientar os seguintes eventos a serem incluídos no modelo: chegada e processamento de pedidos ao *Call Center*; alocação de viatura à ocorrência; normalização da ocorrência; e retorno da viatura para atendimento de novas incidências.

### 3.2 Concepção do modelo

Para implementação do modelo, utilizou-se o *software* CPNTools, editor e simulador de redes de Petri coloridas, de domínio público para aplicações de pesquisa, desenvolvido e distribuído pela Universidade de Aarhus, situada na Dinamarca (vide <http://wiki.daimi.au.dk/cpntools/cpntools.wiki>).

O *CPNTools* possui uma linguagem de programação própria, denominada CPN ML, que deriva do padrão ML, uma outra linguagem de programação. O CPN ML permite a implementação de funções e procedimentos, tornando o modelo ainda mais robusto.

Diante da lógica do processo de atendimento emergencial descrita na seção 3.1, foi concebido o modelo do Sistema de Atendimento Emergencial (SAE), baseado em redes de Petri coloridas. A seguir, na Figura 2, ilustra-se o modelo agregado do sistema supracitado. Dada a complexidade do sistema e o porte do modelo em foco, este será apresentado de forma sintética, de modo a permitir uma visão geral do processo.

Para a rede da Figura 2, os círculos representam os lugares e os retângulos representam as transições. Um lugar pode ser utilizado como indicação de um estado do sistema (conjunto dos valores atuais dos parâmetros que definem um dado sistema, em um dado instante) a ser modelado. As transições representam operações ou ações realizadas pelo sistema, podendo computar o tempo decorrido entre eventos no sistema. Tais propriedades permitem uma visualização gráfica do sistema modelado e a análise de desempenho da operação do mesmo.

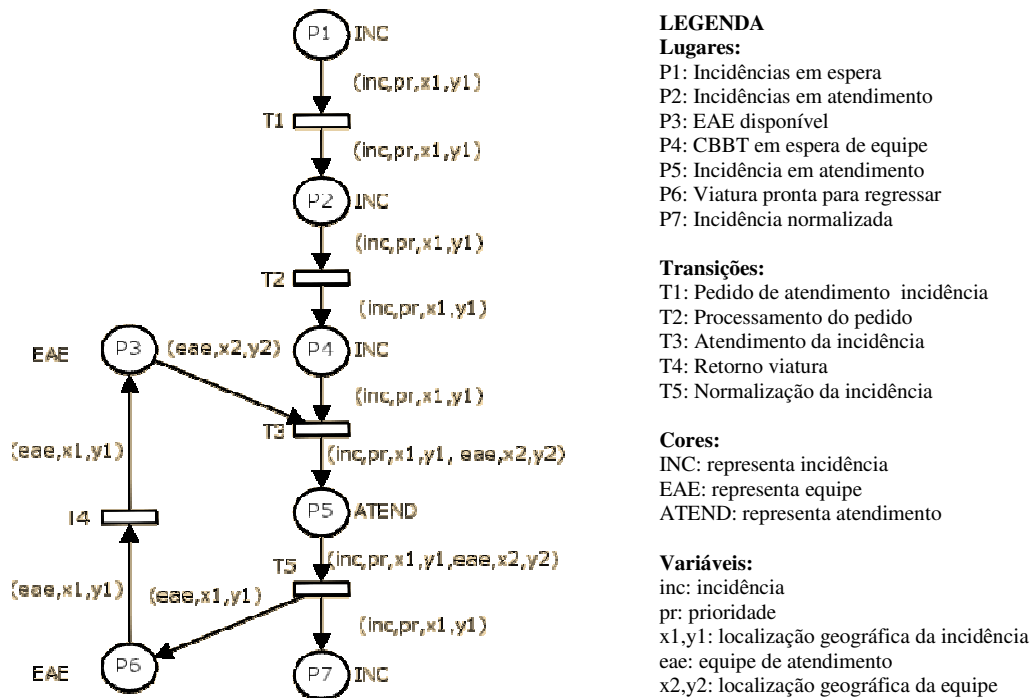


Figura 2 – Modelo agregado do sistema de atendimento emergencial.

É importante ressaltar que, nesta abordagem inicial, está sendo considerada apenas uma zona de atendimento e que a abordagem ainda não considera as possibilidades de viaturas serem pré-alocadas erroneamente ou de incidências não serem detectadas.

### 3.3 Análise do modelo

A validação de um modelo de simulação pode se dar por diversas formas, de acordo com os diversos paradigmas existentes na literatura (SHANNON, 1975). No que concerne à técnica das redes de Petri, o primeiro nível de validação a ser efetuado é o lógico (MOLDT & KORDON, 2003).

A validação lógica do modelo proposto consistiu na experimentação do mesmo, por meio de simulações, para verificar a ausência de bloqueios indesejáveis no mesmo (os chamados *deadlocks*) e se a rede se comporta conforme o esperado.

Um nível mais acurado de validação do presente modelo seria a sua validação estatística: comparam-se as saídas do modelo com aquelas da operação real do sistema e, com base em testes de hipóteses, pode-se determinar se os resultados do modelo são aceitáveis, para um dado nível de significância.

O problema deste tipo de validação é a necessidade de uma elevada quantidade de dados reais e fidedignos. No caso em estudo, tem-se dificuldade em determinar precisamente, na prática, o tempo exato de normalização de uma ocorrência, dado o ambiente de incerteza inerente ao problema.

Outro problema, que concerne ao caso em estudo, é a ausência de informações essenciais para a validação do modelo, tais como tempos de início de deslocamentos e tempos de normalização de incidências.

Do ponto de vista prático, a validação do modelo deve estar relacionada com as seguintes questões (GOLDBERG, 2004):



- a) Previsão do tempo de atendimento das ocorrências, tão próximo quanto possível do que é realizado na operação do sistema;
- b) Utilização das mesmas decisões de despacho empregadas no sistema atual;
- c) Previsão da utilização dos veículos, tão próxima quanto possível do que é realizado no sistema atual.

#### 4. Avaliação de desempenho do sistema

Os recursos disponíveis no sistema são as EAE's e os insumos do processo de atendimento são as incidências. Variando estes parâmetros, é possível conceber e simular diversos cenários operacionais, que permitiram uma avaliação dinâmica do sistema.

Como indicadores de desempenho do sistema, são propostos:

- a) Tempo médio total de normalização das incidências;
- b) Tempo máximo para normalização de uma incidência;
- c) Taxa de ocorrências atendidas por hora;
- d) Taxa de ocupação das viaturas.

Tendo em vista que, até o momento, não se dispunha de dados reais fidedignos para simulação do SAE, foram utilizados dados, gerados aleatoriamente, que consistem em:

- a) Um conjunto de 41 ocorrências, divididas em dois níveis de prioridade: prioridade 0 (mais urgente) e prioridade 1 (menos urgente).
- b) A quantidade de ocorrências de cada nível de severidade foi gerada aleatoriamente. Trabalhou-se com 12 ocorrências de prioridade 0 e com 29 ocorrências de prioridade 1. Esta proporção entre prioridades mais ou menos severas condiz com a prática do sistema.
- c) As coordenadas cartesianas dos locais das ocorrências foram geradas aleatoriamente.

Outras premissas empregadas na modelagem proposta são:

- a) Impôs-se que as incidências de prioridade 0 fossem atendidas antes das incidências de prioridade 1;
- b) A unidade métrica considerada nas coordenadas de incidências e das viaturas é o metro;
- c) Foram consideradas três viaturas, com ponto de partida na coordenada cartesiana (100; 100);
- d) Admitiu-se que o tempo de deslocamento de uma viatura até uma ocorrência é igual à distância Euclidiana entre as mesmas, dividida pela velocidade média das viaturas, arbitrada em 30km/h;
- e) Admitiu-se que as chamadas eram atendidas no *call center* em um tempo regido por uma distribuição exponencial, com média igual a 1 minuto; e
- f) Admitiu-se que as incidências eram normalizadas em um tempo regido por uma distribuição exponencial, com média igual a 30 minutos.

A convenção de que os tempos de atendimento de chamadas e de normalização de ocorrências eram exponencialmente distribuídos foi fundamentada nas seguintes considerações:

- a) A distribuição exponencial é uma função densidade de probabilidade contínua correntemente empregada na representação de processos de atendimento e de operação em estudos de simulação;
- b) Ela é função de apenas um parâmetro, o qual foi considerado como os tempos de disparo das transições. Como não foram aferidos tempos, estimar outros parâmetros, além do tempo médio, teria pouco sentido prático; e

c) Conforme Bause e Kritzinger (2002), o grafo de alcançabilidade de uma rede de Petri é isomórfico a uma Cadeia de Markov. Assim, pode-se admitir que as transições entre estados sejam regidas por uma distribuição exponencial, tendo em vista seu caráter sem memória.

Os *outputs* considerados no modelo são:

- Tempo de Ciclo (TC): tempo para a normalização de todas as incidências;
- Tempo de Atendimento (TA): tempo decorrido desde a recepção de uma ocorrência até a finalização da ordem de serviço;
- Tempo Médio de Atendimento (TMA): média dos tempos de atendimento às incidências em uma mesma replicação do modelo; e
- Taxa de Ocupação (TO): valor percentual obtido pela divisão do tempo de utilização de uma viatura e o tempo de ciclo.

Como o modelo é probabilístico, cada vez que for rodada uma simulação, ele tenderá a ofertar resultados distintos, em termos de tempos operacionais. Sendo assim, deve-se rodar o modelo  $n$  vezes de modo a obter um valor de tempo de ciclo médio que seja um bom estimador do tempo de operação do sistema.

Existem diversos métodos para a determinação do número de replicações a serem efetuadas em um modelo de simulação. Conforme Medina e Chwift (2006), um dos métodos para a consecução deste fim é a estipulação de um grande número de replicações do modelo, de forma que haja a convergência da média acumulada dos seus resultados.

No caso da presente proposta, convencionou-se, após experimentos computacionais, que um número de 50 replicações era suficiente para a convergência dos resultados do modelo.

A seguir, na Tabela 1, ilustra-se uma síntese dos resultados fornecidos pelo modelo, em termos de valores médios, mínimos, máximos, desvios padrões e coeficientes de variação.

<i>Output</i>	<b>Média</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação</b>
TC (h)	13,14	10,45	15,43	1,16	0,08
TA(h)	6,76	0,33	14,43	3,70	0,55
TMA (h)	6,76	5,76	8,13	0,59	0,08
TO (%)	95,75	79,73	100,00	4,68	0,05

Tabela 1 – Resumo dos resultados obtidos pelo modelo, em 50 replicações.

Com relação aos resultados obtidos, podem ser salientados os seguintes aspectos:

- O SAE modelado leva, em média, 13,14h para atender um conjunto de 41 ocorrências, o que incorre em uma taxa de 3,12 ocorrências atendidas por hora. Este indicador pode comparar a eficiência do SAE em diferentes cenários operacionais;
- A faixa de variação de valores da variável TA é elevada, o que ressalta a necessidade de maior controle sobre esta variável, que é crucial para um atendimento de qualidade ao cliente final;
- O comportamento da variável TMA demonstra que existe uma estabilidade da mesma. Tal tendência, de certo modo, reflete a confiabilidade do SAE modelado;



- d) A Taxa de Ocupação média está próxima do ideal; entretanto, a Taxa de Ocupação Mínima possui um valor relativamente baixo. Isso evidencia a necessidade de regras dinâmicas de alocação de serviços às viaturas;
- e) O coeficiente de variação corrobora que as variáveis TC, TMA e TO são mais estáveis que a variável TA. Novamente, verifica-se a necessidade de se controlar melhor a variável TA.

## 5. Conclusões

Este trabalho deriva de um projeto, ora em desenvolvimento na Universidade Federal do Ceará, que visa conceber e implementar um sistema de apoio à decisão para uso no atendimento emergencial da concessionária de energia elétrica de Fortaleza, objetivando corrigir, no mínimo tempo possível e de forma otimizada, as faltas detectadas no fornecimento de energia elétrica.

A avaliação dinâmica do processo de atendimento emergencial é de suma relevância para caracterizar a efetividade do serviço prestado, assim como para subsidiar o planejamento de médio e longo prazo para a expansão da capacidade do processo.

Os autores não encontraram nenhum trabalho na literatura que utilizasse as redes de Petri para a avaliação dinâmica da logística de resposta emergencial de concessionárias de energia elétrica. Tal fato evidencia a originalidade da proposta reportada no presente artigo.

A modelagem baseada em redes de Petri coloridas é bastante simples, consistindo em representar o sistema logicamente por meio de lugares e transições. Deste modo, poucas implementações computacionais são necessárias, sendo requeridas apenas aquelas que dizem respeito a rotinas específicas ao sistema em foco. Uma outra vantagem das RPC é que as simulações podem ser acompanhadas graficamente, o que facilita o entendimento do modelo por parte dos técnicos que gerem o sistema.

Tendo em vista que o projeto encontra-se em desenvolvimento, dados reais da operação do sistema de atendimento emergencial na rede de distribuição elétrica no município de Fortaleza ainda não puderam ser coletados no grau de detalhamento requerido para o presente modelo. Diante desta limitação, foi desenvolvida uma instância teste, que consiste em um conjunto de ocorrências de prioridades e localizações distintas, com características semelhantes às encontradas nas situações reais, de acordo com a experiência dos autores.

O modelo proposto apresentou promissores resultados e está sendo desenvolvida sua aplicação para dados reais. O modelo também será utilizado para o dimensionamento de frotas e de equipes de atendimento emergencial.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da *Companhia Energética do Ceará* (COELCE), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), pelo financiamento do projeto ora em andamento, e da Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura (FCPC).

## Referências

- ALSALLOUMA, O. I. ; GRAHAM K. RAND. *Extensions to emergency vehicle location models*. Computers and Operations Research Vol. 33 , n. 9, p. 2725 – 2743, 2006
- BAUSE, F.; KRITZINGER, P.S. *Stochastic Petri Nets – An Introduction to the Theory*. Lengerich: Vieweg, 2002.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. *Otimização combinatória e programação linear – modelos e algoritmos*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

**GOLDBERG, J. B.** *Operations Research models for the deployment of emergency services vehicles.* SEM Management Journal, v. 1, p. 20 – 39, 2004.

**JENSEN, K.** *Coloured Petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use – Volume 1: basic concepts.* Denmark: Springer-Verlag, 1992.

**MEDINA, C. A.; CHWIF, L.** *Modelagem e Simulação de Eventos Discretos.* São Paulo: Bravarte, 2006.

**IANNONI, A. P.; MORABITO, R.** *Modelo hipercubo integrado a um algoritmo genético para análise de sistemas médicos emergenciais em rodovias.* Gestão & Produção, v. 13, n.1, p. 93-104, 2006.

**MOLDT, D.; KORDON, F.** *Systems engineering and validation. Petri nets for systems engineering – a guide to modeling, verification and applications.* Springer-Verlag Press. Germany, 2003.

**MURATA, T.** *Petri Nets: properties, analysis and applications.* Proceedings of the IEEE, v. 77, p. 541 – 580, 1989.

**SHANNON, R. E.** *Systems simulation: the art and science.* Prentice-Hall, New Jersey, 1975.

**SOUZA, J. C.** *Dimensionamento, localização e escalonamento de serviços de atendimento emergencial.* Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

**ZOGRAFOS, I. G., DOULIGERIS, C., CLIAOXA, L., DEVELECOS, G.** *Analysis and optimization of distribution system reliability through the optimization of emergency response operations.* In: IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference: "Planning, Operation and Control of Today's Electric Power Systems", Greece, 1993.