

Análise Estocástica aplicada aos Tempos de Chegada de Aeronaves do Aeroporto Internacional de Manaus

Victor Vermehren Valenzuela, MSc

Universidade Estadual do Amazonas

vv@netium.com.br, vvalenzuela@uea.edu.br

H. M. de Oliveira, Docteur

Universidade Federal de Pernambuco

hmo@ufpe.br

Palavras-chave: distribuições, processos estocásticos, processo de Poisson, χ^2

Resumo: Neste artigo, aplicou-se um modelo estocástico aos registros dos tempos de chegadas de aeronaves do Aeroporto Internacional Eduardo Gomes de Manaus, com base no Processo de Poisson. A adequação deste processo foi validada comparando-se as estimativas teóricas com as distribuições das chegadas. Investigou-se, através da teoria das filas, a capacidade de serviço do aeroporto. Mostra-se que o fator de utilização é de 80% (2010), com taxa de chegadas de 1,58 aeronaves/h. Contudo, há 65% de probabilidade do atraso de chegada de aeronave ultrapassar 15 min.

1. Introdução

Muitos trabalhos têm sido publicados sobre o tráfego aéreo em aeroportos pelo mundo [5], [9], [10], mas a maioria investiga as filas clássicas devidas ao congestionamento em solo ou no ar, o fornecimento de peças de manutenção, com logística eficiente [7]. Desenvolveram-se gráficos de rotas de circulação aérea visando-se reduzir os tempos de espera. Outros vão além, construindo tabelas de nível de tráfego para indicar o risco de colisão [2]. Aeroportos de menor porte – como o Aeroporto Internacional de Manaus – podem vir a apresentar problemas similares, e carecem de estudos. Este aeroporto remonta à década de 70, com uma única pista para pousos e decolagens. Possui dois terminais de passageiros:

- i) Um para atender aeronaves de maior porte, que operam vôos domésticos e internacionais,
- ii) Outro para receber aviões de menor porte, utilizados em vôos regionais, e ainda um complexo de três terminais de carga.

O terminal de passageiros principal tem seis portões para embarque e desembarque. De acordo com [12], ele possui capacidade para atender 1,8 milhões de passageiros/ano. Entretanto, até o final de 2009, transitaram pelos terminais mais de dois milhões de passageiros, superando a capacidade instalada. Esta situação requer uma investigação como base de consulta para as agências aeroportuárias regionais, em caso de uma eminente expansão.

2. Análise dos tempos de chegada

O processo de Poisson modela uma das mais simples distribuição aleatória de pontos em linha [11]. O que torna este modelo conveniente de usar é o fato de as chegadas de aeronaves serem independentes, sem sobreposição entre intervalos. Em muitas situações, a aplicação do processo de Poisson pode ser justificada teoricamente, mas na maioria dos casos pode-se apenas verificar a plausibilidade do Poisson assumido comparando as formulações com os dados reais.

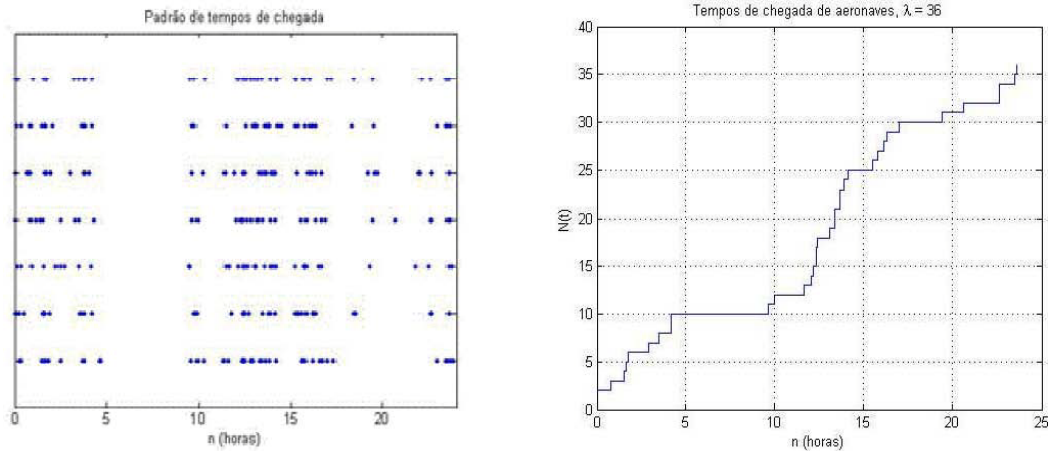


Figura 1 e 2: Padrão de tempos de Chegada e Tempos de chegada de aeronaves com $\lambda=36$

Duas condições são normalmente aplicadas:

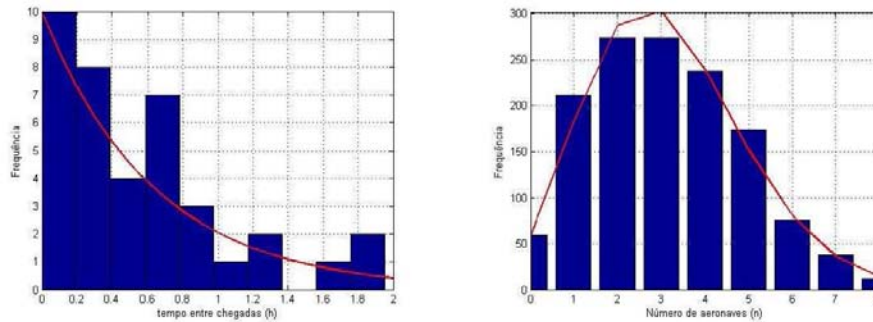
- 1 Se o processo de decolagens/aterissagens é Poisson [8], a distribuição dos tempos entre chegadas, $f(t)$, é exponencial, com valor médio $\mu=1/\lambda$, em que λ é a taxa média de eventos na unidade de tempo do processo;
- 2 Se o processo é Poisson, o número de eventos em um intervalo de duração t tem distribuição de Poisson com valor esperado médio λt .

Antes de verificar essas técnicas de validação para o processo de chegada de aeronaves no aeroporto, mostrar-se-á a validade dos dados para um Processo de Contagem de Poisson. O conjunto de dados utilizados foi coletado a partir do site [3] da INFRAERO, durante três meses e referem-se às chegadas confirmadas de aeronaves de passageiros, totalizando 1.356 amostras. Na Figura 1, os pontos em cada linha horizontal representam chegadas de aeronaves durante um período de 24 horas (representam sete dias, escolhidos aleatoriamente, entre os 90 dias). Primeiro, observe-se que apesar de o tempo previsto (nominal) diariamente ser determinístico, as chegadas são aleatórias e independentes entre si. E segundo, ao esboçar qualquer uma das linhas (dias) da Figura 1 sob a forma de Processo de contagem pode-se observar que $N(t)=0$ para $t<0$ e n é um inteiro não decrescente no tempo (Figura 2). Para determinar os valores esperados ou teóricos [1], Plackett [6] sugere usar o estimador como o somatório das médias diárias (λ_i) de aeronaves que chegam ao aeroporto, que vai de $i=2$ até o último valor médio do total de dias analisados. Então, tomando os valores coletados na URL da INFRAERO, tem-se que $\lambda_M=38$ aeronaves/dia. Considerando as propriedades da distribuição de Poisson [8], $E[n]=\text{var}[n]=\lambda t$, e atribuindo o valor da média total calculada, vem a PMF das chegadas de n aeronaves do aeroporto no intervalo de tempo t .

$$P_{N(t)}(n) = \frac{(38t)^n e^{-38t}}{n!} .$$

3. Teste de aderência

Após a identificação das distribuições teóricas de probabilidade e associada ao comportamento estocástico do sistema sob investigação, a correta estimação de seus parâmetros foi verificada através do teste de qui-quadrado (χ^2) de modo a medir e avaliar os desvios entre a distribuição amostral e a teórica.



Figuras 3 e 4 - Histogramas para a distribuição Exponencial e de Poisson, respectivamente

Primeiramente, se deseja verificar se os dados aderem ou não a uma exponencial de média $\beta=38/24$ aeronaves por hora. Portanto, testaram-se as seguintes hipóteses relativas ao intervalo de chegadas de duas horas, sob um nível de significância $\alpha=5\%$.

H_0 : A variável aleatória possui distribuição exponencial com média $\beta=38/24$;

H_1 : A variável aleatória não adere a distribuição exponencial ($\beta=38/24$).

A hipótese H_0 não pode ser rejeitada, $\chi^2=6,525 < 15,51 = \chi_{\alpha,8}^2$. O mesmo procedimento foi adotado para a distribuição de Poisson, agora com valor esperado $\lambda t=38/12$. O valor crítico de χ^2 com $k=7$ graus de liberdade e $\alpha=0,05$, é igual a 14,07. E mais uma vez a hipótese nula H_0 não foi rejeitada. Vale salientar que resultados similares foram obtidos, conforme Figura 3 e Figura 4, para outras escolhas aleatórias, apenas com variações de frequência e amplitude.

4. Capacidade de serviço

O estudo das filas de espera, chamada de teoria das filas, está entre as técnicas de análise quantitativas mais usadas [5], [8]. Os processos de fila são analisados segundo modelos designados por letras (notação desenvolvida por D.G. Kendall) que representam os padrões de chegadas do sistema e o número de servidores (ou neste caso, o número de pistas de pouso ou decolagem). O modelo aplicado ao aeroporto de Manaus é o chamado M/M/1. As chegadas são um processo de Poisson de taxa de chegada λ , independente dos requisitos de serviço das aeronaves. O tempo de serviço de uma aeronave é uma variável aleatória exponencial de taxa μ , independente do estado do sistema [13]. O aeroporto em estudo possui uma única pista (canal) e $\mu > \lambda$. Admitidas as condições citadas, desenvolveu-se, cf. [4] e [5], uma série de equações que definem as características de operação da fila, aplicados ao aeroporto de Manaus.

5. Exemplos numéricos e discussões

Dadas as formulações e validações, seguem alguns resultados dos modelos em relação à chegada de aeronaves.

- Probabilidade de exatamente três aeronaves chegarem em duas horas, $P(n=3)=0,223$.
- Probabilidade que cheguem menos de quatro aeronaves em duas horas, $P(n<4)=0,61$.
- Probabilidade de quatro ou mais aeronaves chegarem em duas horas é $P(n\geq 4)=0,39$.
- Probabilidade de o passageiro esperar mais de 15 minutos a chegada da aeronave, $P(t>15)=0,673$.

Considerando-se que a taxa média de chegadas $\lambda=1,58$ aeronaves/h e a taxa média de serviço é $\mu=2$ aeronaves/h, no modelo M/M/1 obtém-se:

- Fator de utilização, $\rho=0,79$. Probabilidade de o sistema estar ocioso, $P_0 = (1 - \rho)\rho^0 = 0,21$.
- Número médio de aeronaves no sistema no intervalo de 2 horas, $L_s \approx 3$ aeronaves.

Muitos problemas encontrados não podem ser resolvidos por métodos analíticos. Modelagem e simulação podem fornecer algum critério ou discernimento em muitas situações reais. Em sistemas complexos, diferentes cenários podem ser avaliados via experimentos

simulados, nos quais podem ser tomadas decisões, ou realizadas medições sob situações intrincadas. E este trabalho ilustra esse fato, ou seja, uma vez modelado (Poisson), usou-se a distribuição de probabilidade de eventos aleatórios com uma taxa média de ocorrência constante. Mesmo consistindo em um exercício numérico, os dados empregados são reais: além de poderem auxiliar em decisões, fornecem uma ilustração da aplicabilidade destas ferramentas.

Outros modelos poderiam ser aplicados dependendo do objetivo, por exemplo, cadeia de Markov para um melhor dimensionamento do tempo de serviço.

Aplicando os dados deste trabalho no simulador de processos estocásticos ARENA [14], um dos cenários experimentado forneceu uma solução técnica e econômica para resolver as filas nos horários de pico de chegadas, a qual propõe o aumento do número de *fingers* de seis para oito. Analisando em termos de expansão futura, prevendo um possível aumento do quantitativo de vôos, esta solução parece ser coerente. Inclusive suportaria um movimento estimado de 2,4 milhões de passageiros/ano mantendo-se como referência a atual proporção passageiro/*finger*.

Alguns aspectos relevantes foram deixados a parte neste estudo preliminar, como por exemplo, a existência de horários de pico no movimento do aeroporto. Isto sugere propor o ajuste do fluxo de entrada da fila através de um processo de Poisson não homogêneo, com densidade periódica. Tais alterações podem ser incluídas para tornar os resultados da simulação mais próximos da situação real, e podem ser incluídos no aplicativo usado (ARENA).

Como extensão simples, tais estudos podem ser conduzidos especificamente para cada companhia aérea, permitindo comparar as respectivas eficiências.

Referências

- [1] R.U. Alvarado, Aplicação da distribuição de Poisson zero truncada à produtividade de autores, *Perspect. Cienc. Inf.* Belo Horizonte, 9 (2004) 18-33.
- [2] B.G.-Jeddi, G.L. Donohue, J.F. Shortle, A Statistical Analysis of the Aircraft Landing Process, *Journal of Industrial and Systems Engineering* 3 (2009) 152-169.
- [3] INFRAERO, <http://www.infraero.gov.br/index.php/br/estatistica-dos-aeroportos.html> Acesso 1/2011.
- [4] M. Lohatepanont, "Advanced topics in CE I – Intro to Queuing theory", Open Course Ware, Chulalongkorn University, Lecture Notes, 2007.
- [5] H. Mehri, T. Djemel, H. Kammoun, "Solving of waiting lines models in the airport using queuing theory models and linear programming", hal-00263072, ver.2 em http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/26/90/41/PDF/article_file.pdf Acesso 1/2011.
- [6] R.L. Plackett, The truncated Poisson Distribution, *Biometrics*, 9 (1953) 485-497.
- [7] J. Rakas, "Equipment failure rates and probabilities Markov transition matrices", Nexxtor Aviation Short Course, 2004.
- [8] S. Ross, "A First Course in Probability", Prentice Hall, 1981.
- [9] K. Roy, B. Levy, C.J.Tomlin, Target tracking and Estimated Time of Arrival (ETA) Prediction for Arrival. *Aircraft, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Keystone, Colorado, (2006) 1-22.
- [10] R.C.E. Seah, I. Swang, Target Tracking of Arrival Aircraft using Hybrid Estimation, *Forty-Fourth Annual Allerton Conference*, UIUC, Illinois, USA, 2006.
- [11] D. Veneziano, "Are the sequences of bus and earthquake arrivals Poisson?" http://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering/1-151-probability-and-statistics-in-engineering-spring-2005/lecture-notes/app6_buses_eqs.pdf Acesso 1/2011.
- [12] WIKI http://pt.wikipedia.org/wiki/Aeroporto_Internacional_de_Manauas Acesso 1/2011.
- [13] R.D. Yates, D.J. Goodman, "Probability and Stochastic Processes", Wiley, 2005.
- [14] P.J.Freitas Filho, Introdução à modelagem e simulação de sistemas, Visual Books, 2008.