

APLICAÇÃO DE CADEIAS DE MARKOV NA ESTIMATIVA DA CONFIABILIDADE NA PONTUALIDADE DE VOOS DE ALGUMAS EMPRESAS AÉREAS BRASILEIRAS

Elyelton Cesar de Souza Lima (UFSC) elyelton.ufsc@gmail.com

Amanda Ribeiro Ganske (UFSC) amanda.ganske@hotmail.com

Christiane Wenck Nogueira Fernandes (UFSC) christiane.fernandes@ufsc.br

Luisa Mafra de Oliveira (UFSC) luisa.maoli@gmail.com

Silvia Lopes de Sena Taglialenha (UFSC) s.taglialenha@ufsc.br

Resumo:

No atual cenário da aviação civil, para uma empresa tornar-se competitiva no mercado é fundamental a qualidade na prestação de serviços, atrelado à satisfação dos clientes. Assim, o presente trabalho tem como objetivo estimar o grau de confiabilidade na pontualidade de voos de algumas empresas aéreas brasileiras, estimando os percentuais de cancelamentos e atrasos de voos em determinado período para quatro rotas aéreas brasileiras de grande fluxo. Neste sentido, aplicou-se os conceitos de Cadeias de Markov para determinação das estimativas apresentadas no trabalho. Mostra-se um alto grau de confiabilidade na previsão dos percentuais de atraso dos voos.

Palavras chave: Cadeias de Markov. Empresas aéreas. Pontualidade de voos.

APPLICATION OF MARKOV CHAINS TO ESTIMATE OF THE RELIABILITY DEGREE IN THE PUNCTUALITY OF FLIGHTS OF SOME BRAZILIAN AERIAL COMPANIES

Abstract

In the current scenario of civil aviation, for a company to become competitive in the market, it is necessary to provide quality service, coupled with customer satisfaction. Thus, the present study aimed to estimate the degree of reliability in the punctuality of flights of some Brazilian airlines, estimating the percentages of cancellations and delays of flights in a given period for four Brazilian high-flow routes. In this sense, the concepts of Markov Chains were applied to determine the estimates presented in the paper. A high degree of reliability is shown in predicting the percentage of flight delays.

Key-words: Markov chains. Airline companies. Punctuality of flights.

1. Introdução

Antes privilégio de poucos, voar hoje se tornou acessível e uma realidade para a grande maioria da população brasileira. Entre os anos de 2004 e 2014, ocorreu um desenvolvimento expressivo do setor de transporte aéreo no país, acarretando em uma redução de cerca de 48% do custo de passagens aéreas domésticas. Paralelamente, a média anual de crescimento do setor aeroviário foi três vezes o crescimento médio do PIB (Produto Interno Bruto) para o

mesmo período (3,4%). Com base nesta conjuntura, segundo dados apresentados pela Secretaria Nacional de Aviação Civil “o número de passageiros cresceu 170% alcançando 117 milhões em 2014”.

Dentre os vários aspectos analisados pelo cliente para a escolha da empresa aérea que atenda suas expectativas encontra-se o nível de confiabilidade na pontualidade dos voos. Uma empresa que apresentar pontualidade, atrelado à qualidade de seus serviços, assim como um bom serviço de bordo, conforto, segurança, etc., certamente estará entre as mais competitivas.

Neste contexto, o presente artigo pretende estimar o grau de confiabilidade na pontualidade dos voos de três grandes empresas aéreas brasileiras através da estimativa dos percentuais de cancelamentos e atrasos de voos, avaliando estes percentuais para quatro rotas aéreas brasileiras de grande fluxo, que se encontram entre as dez rotas brasileiras de maior fluxo.

O presente artigo apresenta o referencial teórico, um tópico onde será abordada a metodologia utilizada neste artigo e o desenvolvimento da análise realizada, da apresentação dos resultados e, por fim, da conclusão.

2. Referencial Teórico

2.1 Processos Estocásticos

De acordo com Almeida *et al.* (2015), um processo estocástico é uma família de variáveis aleatórias $\{X_{(t)}, t \in T\}$ definidas em um espaço de probabilidade, indexado por um parâmetro t , onde t varia no conjunto T . O conjunto T é chamado de espaço de parâmetro. Os valores assumidos por $X_{(t)}$ são chamados de estados, e o conjunto de todos os possíveis estados é chamado de espaço de estados do processo estocástico e é denotado por E .

Segundo Hillier & Lieberman (2013), os processos estocásticos são de interesse porque descrevem o comportamento de um sistema que opera ao longo de algum período.

Exemplos de processos estocásticos:

- Variação do tráfego em um cruzamento;
- Variação diária no tamanho do estoque de uma empresa;
- Variação minuto a minuto do índice IBOVESPA;
- Variação no número de chamadas feitas a uma central telefônica;
- A evolução dos níveis de estoque semanais de um Centro de Distribuição, etc.

A estimativa do grau de confiabilidade na pontualidade dos voos trata-se de um processo estocástico, já que trata de um fenômeno que varia de forma imprevisível à medida que o tempo passa. Esta imprevisibilidade implica que as observações foram feitas em diversas ocasiões diferentes, sob condições presumivelmente idênticas.

2.2 Cadeias de Markov

Segundo Almeida (2007), para um processo estocástico ser considerado uma Cadeia de Markov, seu comportamento dinâmico deve respeitar uma característica, chamada propriedade markoviana. Essa característica demonstra a probabilidade condicional que em um evento futuro, dado qualquer evento passado, no estado presente $X_t = i$, depende somente do estado presente do processo, não importando como o processo chegou a tal estado.

De acordo com Taha (2008), um processo estocástico é um processo de Markov se a ocorrência de um estado futuro depender somente do estado imediatamente precedente. Processos de Markov: probabilidade de X_t assumir um valor futuro depende apenas do estado atual (desconsidera estados passados):

$$\bullet \quad P(X_n = x_n | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_{n-1} = x_{n-1}) = P(X_n = x_n | X_{n-1} = x_{n-1}) \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots, n$$

Seja X_t um processo de Markov, i e j estados, s e t tempos:

$$\bullet \quad P_{ij} = P[X_{(s+t)} = j | X_{(s)} = i] \quad s \geq 0 \text{ e } t \geq 0$$

Se P_{ij} independe do tempo então o processo de Markov é dito estacionário ou homogêneo.

Para Taha (2008), a notação matricial é uma forma conveniente de resumir as probabilidades de transição. Assim, a matriz P define a cadeia de Markov, sendo todas as probabilidades de transição fixas e independentes ao longo do tempo. Para determinar a matriz de decisão para N fases, eleva-se a matriz P na n -ésima potência.

Considerando que em uma Cadeia de Markov $\{X_n\} \quad n \geq 1$ composta por espaço de estados $S = \{1, 2, \dots, s\}$ existam s^2 probabilidades de transição, de acordo com $\{p_{ij}\}, i = 1, \dots, s \text{ e } j = 1, 2, \dots, s$. A matriz P apresentada na FIGURA 1, expressa as probabilidades de transição de uma Cadeia de Markov:

Figura 1 – Matriz de transição

$$P^n = \begin{pmatrix} p_{11} & \dots & p_{1s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{s1} & \dots & p_{ss} \end{pmatrix}$$

Fonte: Taha (2008)

De acordo com Taha (2008), a partir das probabilidades $a^{(0)} = \{a_j(0)\}$ de iniciar no estado j , e a matriz de transição P de uma Cadeia de Markov, as probabilidades absolutas $a^{(n)} = \{a_j(n)\}$ de estar no estado j após n transições ($n > 0$) são calculadas da seguinte maneira:

$$a^{(1)} = a^{(0)} * P$$

$$a^{(2)} = a^{(1)} * P = a^{(0)} * PP = a^{(0)} * P^2$$

$$a^{(3)} = a^{(2)} * P = a^{(0)} * P^2P = a^{(0)} * P^3$$

$$a^{(n)} = a^{(0)} * P^n, n = 1, 2, \dots, n$$

A matriz P^n representa a matriz de transição após n etapas:

$$P^n = P^n * P$$

$$P^n = P^{n-m} * P^m, 0 < m < n$$

Estas equações são conhecidas como equações de Chapman-Kolgomorov, e comprovam que a matriz de probabilidades de transição de n estados pode ser obtida elevando a matriz de transição da etapa a n -ésima potência. (TAHA, 2008)

O grau de confiabilidade da pontualidade de um determinado voo pode ser considerado um processo Markoviano, quando visto de forma que, a análise estocástica de uma ocorrência independe dos eventos anteriores. Deste modo, o estudo de atrasos e cancelamentos de um determinado voo busca realizar uma previsão de situações futuras, desconsiderando os

episódios antecedentes.

3. Metodologia

3.1. Descrição do cenário

As análises deste trabalho basearam-se na seleção de quatro importantes rotas nacionais, sendo os principais critérios de escolha o volume de passageiros e a abrangência por estado. As rotas selecionadas foram:

- Rota 1: São Paulo – Rio de Janeiro;
- Rota 2: Brasília – São Paulo;
- Rota 3: São Paulo – Salvador;
- Rota 4: Porto Alegre – São Paulo.

A Rota 1 possui o maior fluxo de passageiros, com cerca de 6,7 milhões de pessoas no ano de 2014, segundo dados da ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil).

Para o estado de São Paulo foram considerados os aeroportos de Congonhas e Guarulhos. Já, a análise para o Rio de Janeiro foi feita com base na movimentação nos aeroportos Santos Dumont e Galeão.

As três empresas aéreas com maior representatividade e participação de mercado no contexto do transporte aeroviário no Brasil foram as escolhidas para englobar este estudo, sendo definidas por:

- Empresa A;
- Empresa B;
- Empresa C.

O período analisado foi O mês de dezembro, por representar a época de maior movimentação nos aeroportos de todo o Brasil (devido aos feriados importantes e período de férias), foi definido como o tempo de base para o estudo. Foram utilizados dados desde dezembro de 2012 até dezembro de 2016, totalizando 5 anos de observação.

O grau de confiabilidade das empresas A, B e C, juntamente com a previsão de cancelamentos e atrasos para dezembro do ano corrente, foi estimado para cada uma das quatro como será apresentado nos tópicos a seguir.

3.2. Base de dados

A Resolução ANAC nº 218, de 28 de fevereiro de 2012, estabelece que os percentuais de atrasos e de cancelamentos de voos do transporte aéreo público regular doméstico e internacional de passageiros no Brasil devem ser divulgados mensalmente na página da ANAC na internet para a consulta do público em geral.

Os percentuais são divulgados de acordo com modelos estabelecidos por meio da Portaria ANAC nº 464/SRE, de 13 de março de 2012, publicada no Diário Oficial da União de 19 de março de 2012 e são apresentados conforme segue:

- Individualmente para cada etapa básica de voo;
- Consolidados por empresa e par de aeroportos de origem e de destino.

São publicados dois percentuais de atrasos, um considerando as etapas que atrasam 30 minutos ou mais e outro considerando as etapas que atrasam 60 minutos ou mais.

No contexto da aviação civil, o termo ‘etapa básica de voo’ corresponde àquelas etapas realizadas pela aeronave desde a sua decolagem até o próximo pouso. Os dados estatísticos das etapas representam o *status* da aeronave em cada etapa do voo, apresentando a movimentação de cargas e passageiros entre os aeródromos de origem e destino da aeronave.

Empresa Aérea	Nº Voo	Aeroporto de Origem		Aeroporto de Destino		Etapas Previstas	% de Cancelamento	% de Atrasos	
		Designador OACI	Nome	Designador OACI	Nome			Superiores a 30min.	Superiores a 60 min.
Empresa A	3154	SBGR	São Paulo-Guarulhos	SBSV	Salvador	31	0	19	10
Empresa A	3170	SBGR	São Paulo-Guarulhos	SBSV	Salvador	31	3	40	17
Empresa A	3178	SBGR	São Paulo-Guarulhos	SBSV	Salvador	31	0	39	13
Empresa A	3600	SBSP	São Paulo-Guarulhos	SBSV	Salvador	27	11	8	4
Empresa A	3604	SBSP	São Paulo-Guarulhos	SBSV	Salvador	4	0	0	0
Empresa A	3628	SBSP	São Paulo-Guarulhos	SBSV	Salvador	4	0	0	0
Empresa A	3662	SBGR	São Paulo-Guarulhos	SBSV	Salvador	31	0	16	10
Empresa A	3732	SBSP	São Paulo-Guarulhos	SBSV	Salvador	5	0	0	0
Empresa A	3804	SBGR	São Paulo-Guarulhos	SBSV	Salvador	31	0	6	0
Empresa A	3816	SBGR	São Paulo-Guarulhos	SBSV	Salvador	31	3	23	20
Empresa A	3894	SBGR	São Paulo-Guarulhos	SBSV	Salvador	31	0	3	3
Empresa A	3895	SBGR	São Paulo-Guarulhos	SBSV	Salvador	31	0	10	6

Fonte: ANAC (2014)

Tabela 1 – Exemplo de percentuais para a Rota 3 realizada pela Empresa A

3.3. Planilha eletrônica

Com base nos dados fornecidos pela ANAC, foram construídas planilhas eletrônicas, como mostra a tabela 2 para os cálculos referentes aos percentuais de cancelamentos e atrasos para cada uma das quatro rotas, tendo como prestadora dos serviços de transporte as três companhias aéreas citadas, num período total de cinco anos. Ao final desta etapa de análise foram obtidas 60 planilhas, e a partir destas foi possível calcular os valores em porcentagem necessários para a construção das Matrizes de Transição de Estado (Matriz P) da Cadeia de Markov.

Etapas previstas	Realizadas	%C	%A 30+	%A 60+
31	31	0	6	6
31	31	0	3	3
31	31	0	19	3
31	31	0	13	0
31	31	0	35	19
31	31	0	26	13
27	27	0	15	4
4	4	0	25	25
5	5	0	20	0
5	5	0	0	0
31	31	0	10	6
31	31	0	6	3
289	289	0	43	19
		0	0,1488	0,0657

Fonte: Autores

Tabela 2 – Exemplo de planilha eletrônica

O número de voos realizados foi calculado a partir da quantidade de voos previstos, desconsiderando o percentual de etapas canceladas. Desta forma, o número total de cancelamentos foi obtido pela subtração entre as etapas previstas e realizadas.

Os cálculos referentes ao total de atrasos foram feitos através de uma média ponderada entre o número de etapas realizadas e o número de atrasos de 30 (ou mais) e 60 (ou mais) minutos.

O percentual de cancelamentos foi apurado por meio da divisão da quantidade de etapas canceladas pela quantidade de etapas previstas no mês de referência, de acordo com a seguinte fórmula:

- $\text{Percentual de Cancelamentos} = \text{Etapas Canceladas} / \text{Etapas Previstas}$.

O percentual de atrasos é apurado por meio da divisão da quantidade de etapas atrasadas em cada intervalo de atraso pela quantidade total de etapas realizadas, de acordo com a seguinte fórmula:

- $\text{Percentual de Atrasos} = \text{Etapas Atrasadas} / \text{Etapas Realizadas}$.

4. Resultados

No presente trabalho se obteve as Matrizes P^1 através das Equações de *Chapman-Kolmogorov*. As matrizes resultantes deste processo correspondem às previsões do grau de

confiabilidade das empresas aéreas em relação ao percentual de atrasos e cancelamentos de voos para dezembro de 2017.

São Paulo-Rio de Janeiro			
	%C	%A 30+	%A 60+
Empresa A	0,087	0,074	0,024
Empresa B	0,105	0,115	0,031
Empresa C	0,108	0,064	0,022

Fonte: Autores
Tabela 3 – Rota 1 para dezembro de 2017

Brasília – São Paulo			
	%C	%A 30+	%A 60+
Empresa A	0,052	0,134	0,034
Empresa B	0,049	0,186	0,054
Empresa C	0,226	0,140	0,096

Fonte: Autores
Tabela 4 - Rota 2 para dezembro de 2017

São Paulo - Salvador			
	%C	%A30+	%A 60+
Empresa A	0,006	0,131	0,044
Empresa B	0,045	0,085	0,020
Empresa C	0,068	0,073	0,033

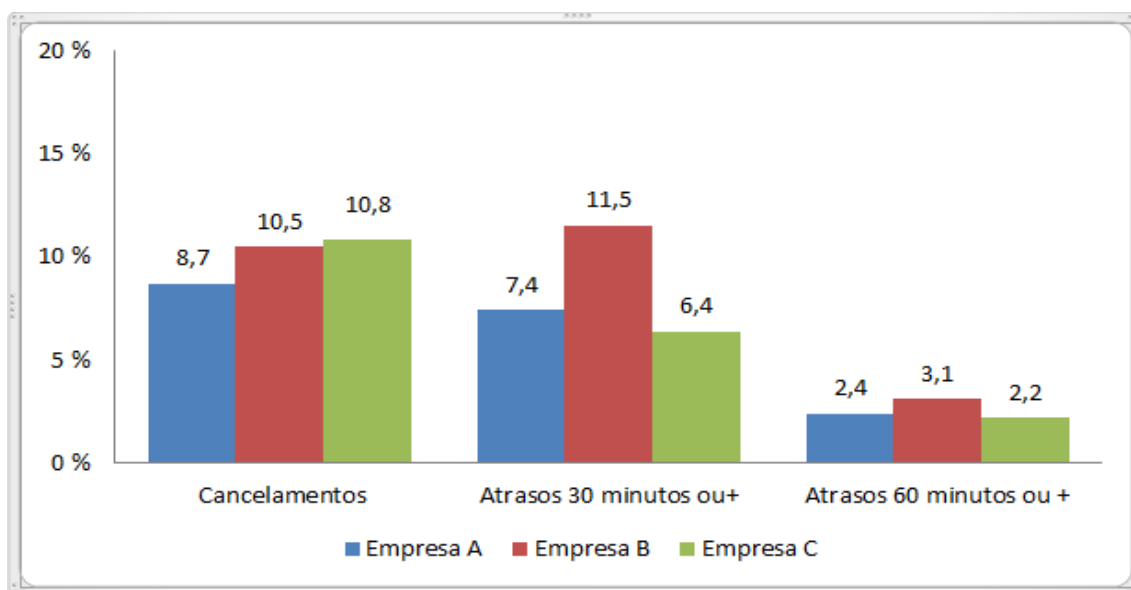
Fonte: Autores
Tabela 5 - Rota 3 para dezembro de 2017

Porto Alegre – São Paulo			
	%C	%A 30+	%A 60+
Empresa A	0,037	0,058	0,019
Empresa B	0,036	0,095	0,024
Empresa C	0,097	0,046	0,014

Fonte: Autores
Tabela 6 – Rota 4 para dezembro de 2017

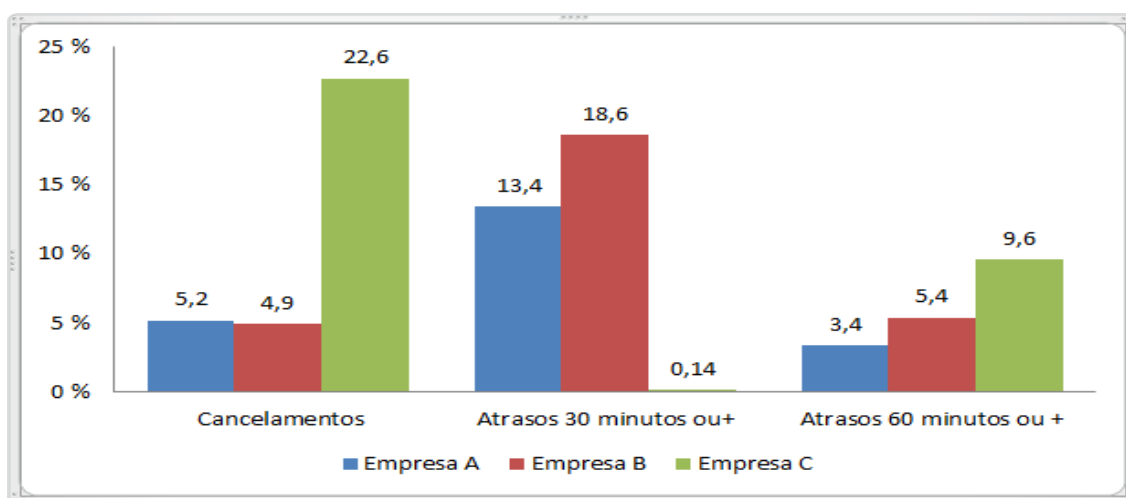
Para obter uma melhor visualização dos resultados obtidos e assim tornar mais fácil uma análise comparativa dos percentuais de cancelamentos e atrasos de cada uma das três empresas para cada uma das quatro rotas, os dados obtidos foram trabalhados no Excel para

gerar os gráficos comparativos, como mostrado na figura 1, figura 2, figura 3 e figura 4:



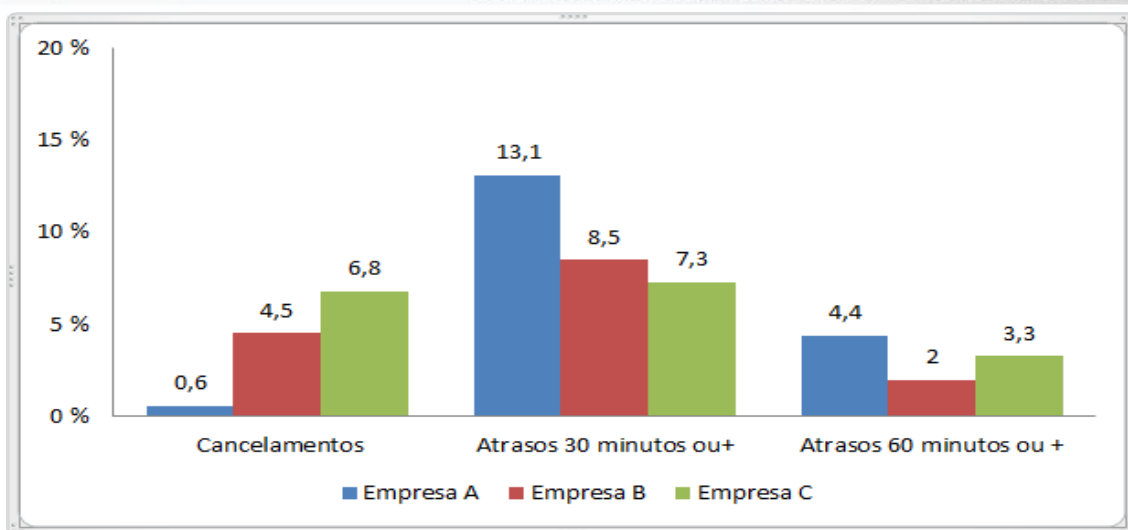
Fonte: Autores

Figura 1 – Previsão de percentuais de cancelamentos e atrasos da rota 1 dezembro de 2017



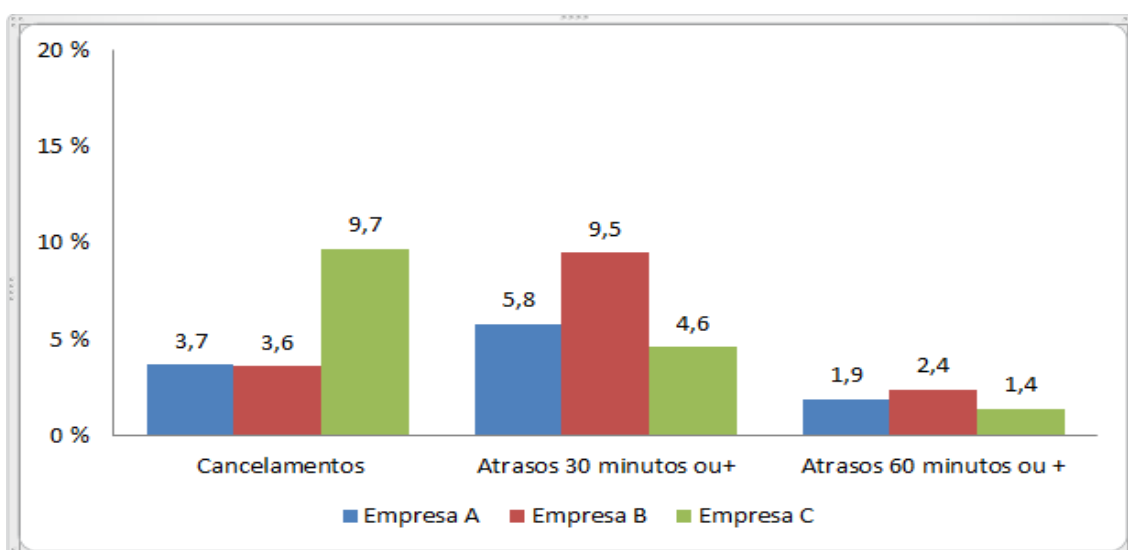
Fonte: Autores

Figura 2 – Previsão de percentuais de cancelamentos e atrasos da rota 2 para dezembro de 2017



Fonte: Autores

Figura 3 – Previsão de percentuais de cancelamentos e atrasos da rota 3 para dezembro de 2017



Fonte: Autores

Figura 4 – Previsão de percentuais de cancelamentos e atrasos da rota 4 para dezembro de 2017

5. Conclusão

A partir da análise dos resultados obtidos, é possível concluir que os percentuais de cancelamentos fornecem dados com menor grau de confiabilidade, isso se justifica pelo fato de que muitos fatores internos e externos, como condições climáticas, greves, manutenção e etc., afetam as operações viárias. Porém, estes fatores não foram levados em consideração no presente estudo.

Desta forma, uma ideia de desenvolvimento de futuros trabalhos na mesma temática seria investigar com maior acurácia os percentuais de cancelamentos, porém, levando em consideração os fatores aqui não abordados e que contribuem muito para a determinação da eficiência e confiabilidade das companhias aéreas.

A aplicação do método considerando as 3 empresas aéreas, apresenta a empresa A com menor

cancelamento de voos e menor número de atrasos com 60 minutos ou mais, a empresa C possui menor número de atrasos de 30 minutos ou mais, não levando em consideração as rotas.

Com relação as rotas, a decisão pode ser tomada para a empresa com menor avaria, se for considerado a rota 1,2 e 4 a empresa A é a melhor escolha, já a rota 3 a empresa B se comportou melhor.

Para os percentuais de atrasos de voos a aplicação de cadeias de Markov se mostrou uma ferramenta eficiente com um alto grau de confiabilidade dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

ANAC. **Histórico dos percentuais de atrasos e cancelamentos**. Disponível em:

<<http://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/historico-dos-percentuais-de-atrasos-e-cancelamentos>>.

Acesso em: 20 jun. 17.

ALMEIDA, Ígor Lorenzato. **Redes neurais recorrentes para inferência de redes de interação gênica utilizando cadeias de Markov**. 2007. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Computação Aplicada, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2007. Disponível em:

<<http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/2231>>. Acesso em: 20 jun. 17.

ALMEIDA, Marcos André Pereira et al. **Cadeias de Markov: aplicações no cotidiano**. Cadernos de Graduação: Ciências exatas e tecnológicas, Aracaju, v. 3, n. 1, p.45-54, out. 2015. Disponível em:<periodicos.set.edu.br> . Acesso em: 20 jun. 17.

BRASIL. Ministerio dos transportes, Portos e Aviação Civil. Disponível em: < <http://transportes.gov.br/>>

Acesso em: 09 set. 18.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 9º ed. São Paulo: Editora Bookman, 2013.

TAHA, Hamdy A. **Pesquisa Operacional: uma visão geral**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.