

IMPACTO DE TEMPERATURAS EXTREMAS NA PERFORMANCE DE AERONAVES EM QUATRO AEROPORTOS BRASILEIROS

Paula Conde Santos Borba
Evandro José da Silva
Mauro Caetano
Wilson Cabral de Sousa Júnior
Cláudio Jorge Pinto Alves
Divisão de Engenharia Civil
Instituto Tecnológico de Aeronáutica

RESUMO

Diante de cenários de mudanças climáticas, elevadas temperaturas podem influenciar o peso máximo de decolagem de uma aeronave. A partir de simulações com temperaturas obtidas em projeções climáticas regionais em três períodos de tempo e em dois cenários, RCP4.5 e RCP8.5, foi observada a redução relativa do peso de decolagem em dois tipos de aeronaves, B737-800 e A321-200, no aeroporto de Congonhas e B737-800 para o aeroporto Santos Dumont. Para o aeroporto de Guarulhos e Galeão, foram consideradas as aeronaves B747-800 e A380-800. Os resultados indicaram que aeroportos de maior porte (Guarulhos e Galeão) sofrem menor redução relativa de peso de decolagem em relação aos outros aeroportos. As reduções atingem valores maiores para o cenário RCP8.5, e nos aeroportos de menor porte, SBSP e SBRJ, podendo atingir valores, respectivamente, de 0,04% e 0,05% para aeronaves modelo B737-800, e 0,04% para a aeronave A321-200 em SBSP.

ABSTRACT

In face of climate change scenarios, high temperatures can influence the maximum takeoff weight of an aircraft. From simulations of temperatures obtained in regional climate projections over three time periods and in two scenarios, RCP4.5 and RCP8.5, the takeoff weight reduction was observed in two types of aircraft, B737-800 and A321-200, at Congonhas, and B737-800 at Santos Dumont. For Guarulhos, and Galeão, B747-800 and A380-800 were considered. The results show that the larger airports (Guarulhos e Galeão) suffer smaller takeoff weight reduction compared to the other airports. The reductions reached higher values for the worst scenario, RCP8.5, and in smaller airports, SBSP and SBRJ, reaching values of 0.04% and 0.05% for B737-800 aircrafts, and 0.04% for A321-200 at the SBSP.

1. INTRODUÇÃO

Eventos climáticos extremos, associados ao aquecimento global, tendem a se intensificar no futuro e o entendimento sobre como tais mudanças climáticas impactarão a aviação auxilia o planejamento de futuras operações (ZHOU, 2018a). De acordo com Williams e Joshi (2013), até então, poucos estudos tem analisado os efeitos das mudanças climáticas na aviação. Em seu estudo os autores demonstram a necessidade de compreensão do efeito da temperatura na performance das aeronaves, em especial durante a decolagem.

As mudanças climáticas globais são caracterizadas principalmente pelo aumento na média da temperatura global, mudanças em regimes hidrológicos, alterações na intensidade de eventos extremos e aumento do nível do mar. As mudanças estão associadas ao crescimento populacional, econômico, ao estilo de vida e ao uso de energias e tecnologias, uma vez que estas podem aumentar a concentração de dióxido de carbono (CO²), metano (CH₄) e óxido de nitrogênio (N₂O). A emissões destes gases, conhecidos como Gases de Efeito Estufa (GEE), são as causas definidas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) como “extremamente prováveis” na mudança do sistema climático (IPCC, 2015).

O IPCC (2015) realiza simulações que indicam diferentes cenários, nomeados de RCPs (*Representative Concentration Pathways*), baseados no número de reflexão de radiação. Isso corresponde à razão entre a quantidade de energia solar que entra e que sai do planeta, indicando

o quanto ficou armazenada no sistema terrestre de acordo com as emissões de gases de efeito estufa (GEE), (IIASA, 2009).

O RCP4.5 descreve o cenário em que o sistema terrestre irá armazenar 4,5 W/m² adicionais e o aumento da irradiação se estabilizaria antes de 2100 no panorama global. O cenário RCP8.5, o mais pessimista, representa as elevadas emissões e prevê um aumento de 8,5W/m². Para esse cenário, a Terra poderia aquecer entre 2,6°C e 4,8°C ao longo do século (IPCC, 2015).

Os cenários propostos pela IPCC são projeções climáticas globais que adotam resoluções que atingem cerca de 1° e 3° na latitude ou longitude. Contudo, estas resoluções em escalas locais ou regionais podem não englobar outros fatores relevantes, como topografia e uso e ocupação do solo, para estudos mais pontuais (LYRA *et al.*, 2017).

Lyra *et al.* (2017) apresentam projeções climáticas no modelo Eta RCM (*Regional Climate Model*) com resolução espacial de 5km na área sudeste do Brasil, com ênfase nas regiões metropolitanas de São Paulo (MRSP), Rio de Janeiro (MRRJ) e Santos. As projeções são baseadas nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 e foram feitas para três principais intervalos de tempo: 2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2100. Os autores indicaram aumento de valores na temperatura máxima diária, conforme consta na Tabela 1. TXx significa o valor anual mais alto da temperatura máxima diária.

Tabela 1: projeção de temperatura (°C). Diferença entre a temperatura média de cada período e a média dos valores do período 1961 a 1990. Valores da esquerda: RCP4.5 e da direita: RCP8.5. Adaptado de Lyra *et al.* (2017).

Índice	RMRJ			RMSP		
	2011- 2040	2041- 2070	2071- 2100	2011- 2040	2041- 2070	2071- 2100
TXx	+3,+4	+4,+5	+5,+8	+3,+4	+4,+6	+5,+9

A Tabela 1 indica o intervalo superior e inferior de mudanças nos índices climáticos para os três tempos futuros. Os valores da esquerda indicam a variação correspondente ao cenário RCP4.5, e o da direita, ao intervalo RCP8.5. As temperaturas máximas aumentam aproximadamente 3°C no primeiro intervalo de tempo para ambas as regiões, contudo para o final do século, no cenário mais pessimista (RCP8.5) a região RMSP apresenta valores de temperatura máxima maiores do que da região RMRJ (LYRA *et al.*, 2017).

De acordo com Pal e Eltahir (2015), as altas temperaturas começam a exceder os limites históricos e alguns impactos na aviação podem ocorrer, como o aumento da restrição de pesos na decolagem. Segundo Anderson (2015), com o aumento da temperatura do ar, a uma pressão constante, ocorre a expansão do ar, deixando-o menos denso. A sustentação gerada pela asa de um avião ocorre devido ao fluxo de massa através da sua superfície. Em baixas densidades, uma maior velocidade é requerida para produzir dado coeficiente de sustentação em um dado perfil aerodinâmico que, por sua vez, interfere no peso de decolagem da aeronave.

Para um dado comprimento de pista, há um limite de temperatura na qual as operações acima desta, utilizando o peso de máximo de decolagem (*MTOW - Maximum Takeoff Weight*), tornam-se inviáveis devido ao desempenho das aeronaves. Quando isso ocorre, restrições de peso são impostas, podendo afetar a remoção de passageiros, cargas e combustível (COFFEL E

HORTON, 2015). Cancelamentos operacionais também podem ocorrer. Por exemplo, no dia 20 de junho de 2017, a temperatura no aeroporto de Phoenix, nos Estados Unidos, atingiu 48°C, gerando o cancelamento de 40 vôos (ZHOU *et al.*, 2018a).

Segundo Coffen *et al.* (2017), o entendimento de como a mudança climática interfere no peso de decolagem, é determinante para o planejamento de operações futuras. Contudo, poucos estudos que exploram os potenciais riscos foram realizados.

Deste modo, o presente estudo busca analisar o desempenho de aeronaves a partir da premissa de mudanças climáticas em quatro aeroportos brasileiros de acordo com projeções climáticas propostas por Lyra *et al.* (2017).

2. MÉTODOS

O presente estudo considerou três principais intervalos de tempo: 2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2100. Para a análise de restrições de peso máximo de decolagem nos aeroportos selecionados, foram considerados os acréscimos das temperaturas máximas diárias do período, TXx, proposto por Lyra *et al.* (2017).

Este estudo considera o acréscimo das temperaturas máximas diárias dos três intervalos de tempo em relação à temperatura de referência de cada aeroporto analisado. Segundo a ANAC (2017), a temperatura de referência é a média mensal das temperaturas máximas diárias para o mês mais quente do ano. Diante da ausência e dificuldade de obtenção de dados mais precisos, foi considerado o acréscimo da temperatura máxima diária do período analisado como temperatura de referência.

2.1 Aeroportos e aeronaves selecionadas

Foram selecionados quatro aeroportos da região sudeste do Brasil para a análise de ocorrência das restrições de peso de decolagem: Aeroporto Internacional de Guarulhos (SBGR) e Aeroporto de Congonhas (SBSP), ambos localizados em São Paulo, Aeroporto do Galeão (SBGL) e Aeroporto Santos Dumont (SBRJ), ambos localizados no Rio de Janeiro.

As características utilizadas como dados de entrada para obtenção dos pesos de decolagem estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Características de TORA, altitude e temperatura de referência. Fonte: AIP (2018).

	SBGR		SBSP		SBGL		SBRJ	
	RWY	TORA (m)	RWY	TORA (m)	RWY	TORA (m)	RWY	TORA (m)
Distâncias declaradas	09L	3700	17R	1790	10	4000	02R	1323
	27R	3700	35L	1790	28	4000	20L	1323
Altitude/ temperatura de referência	750m/28°C		802m/28°C		9m/32°C		3m/32°C	
Código de referência da aeronave de projeto do aeródromo	4F		4C		4F		4C	
Aeronaves analisadas	B747-800		B737-800		B747-800		B737-800	
	A380-800		A321-200		A380-800			

Considerou-se a maior distância de pista disponível para pousos e decolagens (TORA – *take-off runway available*) em cada aeródromo. Esse comprimento, associado ao aumento da temperatura, indicou o peso de decolagem de quatro aeronaves selecionadas.

Os modelos de aeronaves foram selecionados de acordo com o código de referência do aeródromo, que segundo a ANAC (2017), está relacionado às características físicas e operacionais da aeronave crítica, que, por sua vez, demanda os maiores requisitos em termos de infraestrutura aeroportuária.

Para os aeroportos SBGR e SBGL, as aeronaves A380-800 e B747-800 foram escolhidas por pertencerem à categoria 4F. Para o aeroportos de menor porte, SBSP e SBRJ, as aeronaves selecionadas foram da categoria 4C: B737-800 e A321-200.

2.2 Cálculo da redução de peso de decolagem

O peso de decolagem de cada aeronave, fornecido pelo fabricante, está relacionado à performance do motor que a equipa. O documento fornecido pelo fabricante contém ábacos relacionando o peso de decolagem, altitude e temperatura padrão ao comprimento de pista requerido (COFFEN *et al.*, 2017).

A partir do modelo atmosférico padrão, conhecido como *International Standard Atmosphere* (ISA), obteve-se a temperatura padrão (T), dado pela Equação 1 referente à altitude *h* do aeroporto em análise.

$$T = 15 - 0,0065xh \quad (1)$$

Além da correção dada pela altitude, o comprimento da pista deve aumentar 1% a cada 1°C que a temperatura de referência estiver acima da temperatura padrão do local. Desse modo, o comprimento da pista foi corrigido através da divisão da TORA pelo fator de correção, obtido pela diferença da temperatura de referência e temperatura padrão.

Para quantificar o impacto de temperaturas mais quentes nos voos, utilizou-se a temperatura de referência para cada intervalo de tempo. Foram então identificados os percentuais de redução do peso de decolagem nos diferentes cenários (RCP4.5, RCP8.5) em relação ao peso de decolagem permitido para cada aeroporto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da análise dos ábacos fornecidos pelos fabricantes das aeronaves analisadas, obteve-se a redução dos pesos de decolagem para cada aeroporto em relação ao peso máximo de decolagem para a temperatura de referência informada pelo DECEA (2019). A Tabela 2 indica os valores de entrada utilizados para a obtenção do peso limitante de decolagem.

Tabela 3: Dados de entrada para a obtenção do peso máximo de decolagem.

	Temperatura de referência (DECEA)	Temperatura ISA +15°C	Fator de correção
SBGR	28,00	25,13	1,029
SBSP	28,00	24,79	1,032
SBGL	32,00	29,94	1,021
SBRJ	32,00	29,98	1,020

Para o modelo de aeronave B747-800, o peso máximo de decolagem para SBGR e SBGL é de 447.696 kg. Em relação ao modelo B737-800, obteve-se para SBSP e SBRJ valores de peso máximo de decolagem iguais a 61.870 kg e 57.184 kg, respectivamente.

A aeronave da Airbus, modelo A380-800, apresentou peso limite de decolagem de 583.190 kg para SBGR e 609.309 kg para SBGL. Já o modelo de menor porte, A321-200, teve como peso máximo de decolagem 79.002 kg para SBSP. Esse modelo não foi considerado para o aeroporto SBRJ, uma vez que ele sofre grandes restrições de peso, tornando a operação viável apenas com o peso operacional vazio.

Para cada temperatura de referência calculou-se um novo fator de correção para temperatura. Esse fator reduziu o comprimento de pista e, a partir de então, obteve-se o valor máximo de peso de decolagem. As Tabelas 3 e 4 indicam os fatores de correção de temperatura para o cenário RCP4.5 e o para o cenário mais pessimista em termos de mudanças climáticas, o RCP8.5.

Tabela 4: Temperaturas de referências para os períodos indicados e seus respectivos fatores de correção para o cenário RCP4.5.

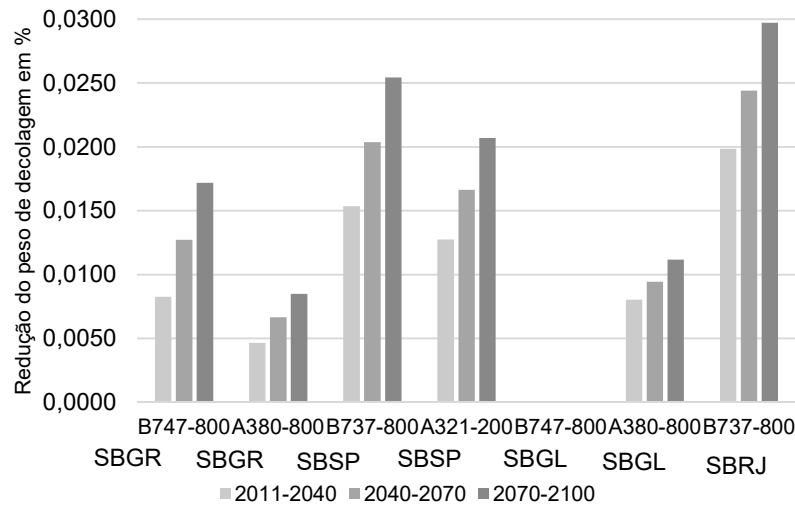
	RCP4.5					
	2011-2040		2040-2070		2070-2100	
	Tref. (C°)	Fator de correção	Tref. (C°)	Fator de correção	Tref. (C°)	Fator de correção
SBGR	31	1,059	32	1,069	33	1,079
SBSP	31	1,062	32	1,072	33	1,082
SBGL	35	1,051	36	1,061	37	1,071
SBRJ	35	1,050	36	1,060	37	1,070

Tabela 5: Temperaturas de referências para os períodos indicados e seus respectivos fatores de correção para o cenário RCP8.5.

	RCP8.5					
	2011-2040		2040-2070		2070-2100	
	Tref. (C°)	Fator de correção	Tref. (C°)	Fator de correção	Tref. (C°)	Fator de correção
SBGR	32	1,069	34	1,089	37	1,119
SBSP	32	1,072	34	1,092	37	1,122
SBGL	36	1,061	37	1,071	40	1,101
SBRJ	36	1,060	37	1,070	40	1,100

Observa-se que os maiores fatores de correção estão relacionados ao terceiro horizonte temporal, no intervalo de 2070 a 2100. Tais valores interferem diretamente no peso de decolagem, pois são responsáveis pela redução do comprimento de pista de decolagem ao analisar os ábacos dos fabricantes.

a)



b)

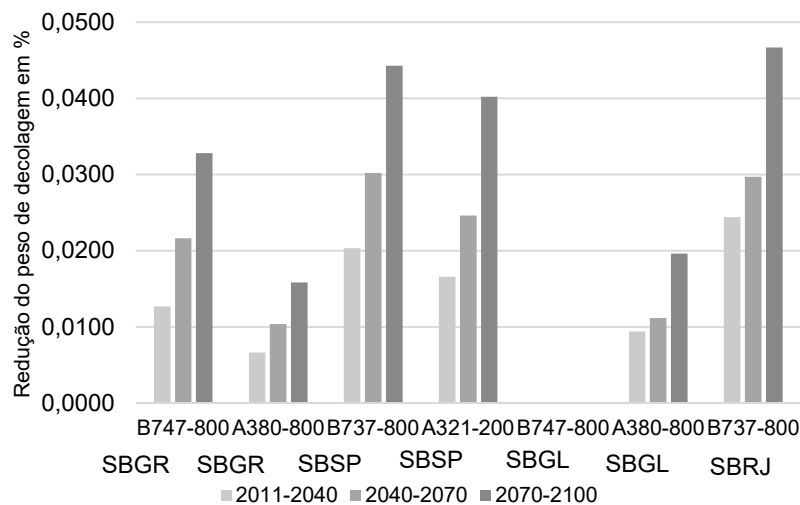


Figura 1: Redução em porcentagem do peso máximo de decolagem dos aeroportos e aeronaves selecionadas para o cenário RCP4.5 (a) e RCP8.5 (b), respectivamente.

A Figura 1 indica os resultados obtidos em porcentagem de redução de peso de decolagem para o cenário RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente.

Nota-se que, diante do intervalo de tempo mais longo, 2070 a 2100, as reduções de peso de decolagem são maiores. O aeroporto SBGL poderá operar o B747-800 sem restrições, contudo, a aeronave A380-800 poderá sofrer restrições de peso.

O aeroporto mais impactado em termos de restrição de peso foi o SBRJ, podendo sofrer redução próximas a 0,05% em relação ao peso máximo de decolagem nas condições atuais. Em segundo lugar, o aeroporto SBSP, que poderá sofrer maiores restrições em relação aos outros aeroportos.

Observa-se que as aeronaves da Boeing analisadas sofrem reduções maiores de peso em relação às aeronaves da Airbus. Para o aeroporto SBGR, a aeronave B747-800 exige reduções até 2,1 vezes reduções de peso do modelo A380-800. Esse valor é reduzido 1,2 vez quando são comparadas às aeronaves B737-800 e A321-200 no aeroporto SBSP.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse estudo buscou-se indicar a provável redução do peso de decolagem em função do aumento da temperatura em dois cenários de mudanças climáticas, o RCP4.5 e RCP8.5 para quatro aeroportos brasileiros.

Observou-se que as reduções são maiores no horizonte de tempo compreendido entre 2070 e 2100. Além disso, o cenário RCP8.5, o mais pessimista, apresentou valores de redução maiores, variando de 1,6 a 1,9 vezes o valor de redução de peso de decolagem do cenário RCP4.5.

Este estudo limita-se às temperaturas máximas que podem ocorrer em três intervalos de tempo de 30 anos e não considera a frequência de ocorrência destas temperaturas, indicando que o impacto das elevadas temperaturas na restrição de peso pode ser esporádico, e pode não afetar em grande escala a operação nos aeroportos.

Outro efeito possível das mudanças climáticas é o aumento da quantidade de eventos extremos, como ondas prolongadas de calor, que podem afetar de maneira mais contundente as operações aeronáuticas. Além disso, as reduções de peso de decolagem foram calculadas a partir dos ábacos fornecidos pelo fabricante e indicam uma aproximação, uma vez que são valores obtidos através de interpolações gráficas. Além dos impactos das temperaturas elevadas, as operações podem ser afetadas por eventos como nevoeiros e tempestades decorrentes de mudanças climáticas. Tal consideração, no entanto, não fez parte do escopo deste estudo. Portanto, mais pesquisa é necessária para analisar o efeito das mudanças climáticas na performance de decolagem de aeronaves, de modo a diminuir a incerteza contida nas considerações.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIP BRASIL (2018) AMDT. Departamento De Controle Do Espaço Aéreo. Instituto De Cartografia Aeronáutica. Rio de Janeiro.
- ANAC (2017). Agência Nacional de Aviação Civil. RBAC 154. Projeto de Aeródromos .Brasília: [s.n.].
- Anderson J. D. (2015). Introduction to flight. McGraw-Hill Education (8ª Edição), Nova York. (928 pp).

- BOEING (2018). 787 Airplane Characteristics for Airport Planning. Boeing Commercial Airplanes. Seattle. 2018. (D6-58333. Rev M Março de 2018).
- Coffel E. D., Horton R. (2015): Climate change and the impact of extreme temperatures on aviation. *Weather, Climate and Society*, v. 7, pp. 94-102.
- Coffel E. D., Thompson T. R., Horton R M. (2017): The impacts of rising temperatures on aircraft takeoff performance. *Climatic Change*, v.144 (80): pp.1-8.
- IPCC (2015). AR5 Climate Change 2014 Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Lyra A., Tavares P., Chou S., Sueiro G., Dereczynski C., Sondermann M., Silva A., Marengo J. e Girolla A. (2017). Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 132, pp. 663-682.
- Pal J. S, Eltahir E. A. B. (2015). Future temperature in southwest Asia projected to exceed a threshold for human adaptability. *Nature Climate Change*, v. 6.
- Zhou T., Ren L., Liu H., Lu, J. (2018a). Impact of 1.5°C and 2.0°C Global Warming on Aircraft Takeoff Performance in China. *Science Bulletin*, v. 63
- Zhou, Y., Zhang N. Li C., Li Y. E Huang P. (2018b). Decreased takeoff performance of aircraft due to climate change. *Climatic Change*, v. 151, pp. 463-472.