SOLUÇÃO COMPUTACIONAL PARA PREVENIR ACIDENTES AERONÁUTICOS CAUSADOS POR ESTEIRAS DE TURBULÊNCIA USANDO MACHINE LEARNING

Daniel Valério Leite
Departamento de Ciências da Computação (CIC)
Laboratório de Transportes Aéreos da Universidade de Brasília (TransLab-UnB)
Campus Darcy Ribeiro - CEP 70910-900 - Asa Norte, Brasília – DF
dan.valerio@hotmail.com

Geraldo P. Rocha Filho
Departamento de Ciências da Computação (CIC)
Laboratório de Transportes Aéreos da Universidade de Brasília (TransLab-UnB)
Campus Darcy Ribeiro - CEP 70910-900 - Asa Norte, Brasília – DF
geraldoprfilho@gmail.com

Li Weigang
Departamento de Ciências da Computação (CIC)
Laboratório de Transportes Aéreos da Universidade de Brasília (TransLab-UnB)
Campus Darcy Ribeiro - CEP 70910-900 - Asa Norte, Brasília – DF
weigangbr@gmail.com

RESUMO

Um problema fatal para muitas aeronaves é a esteira de turbulência reconhecida pela primeira vez como de extremo perigo em 1960. Diversos acidentes e incidentes ocorreram no mundo devido a aeronaves adentrarem a esteira de turbulência de uma aeronave maior. As aeronaves tem a capacidade de enxergar as outras ao seu redor graças a um equipamento chamado ADS-B que se comunica com o ADS-B de outras aeronaves e tanto recebe quanto transmite sua a posição, velocidade, altitude, identificação etc. Com o uso de critérios de separação segura para esteira de turbulência (fluxos de ar gerados e que giram a partir das pontas das asas de um avião e que permanece por minutos no ar) de aeronaves e utilizando técnicas de Machine Learning será possível agregar ao sistema ADS-B alertas precisos ao piloto. Tais alertas informaram o perigo de se aproximar de um vórtice gerado por uma aeronave categoria super, por exemplo, Airbus A380. A metodologia por meio de Machine Learning será classificar qual aeronave está voando ao seu redor e a partir dessa informação de imediato saber qual a sua respectiva esteira de turbulência. A solução para o problema é justamente usar o ADS-B para detectar uma aeronave a quilômetros de distância em sua trajetória e alertar o piloto por meio sonoro e visual, pois o ADS-B atualmente não realiza tal solução proposta. Tais informações são suficientes para o piloto manter as devidas separações para com a outra aeronave e assim evitar um acidente aeronáutico, pois é sabido que esteiras de turbulência de aviões categoria pesada e super são de extremo perigo. Sendo assim, o piloto em caso de não ser avisado do perigo pelo Controlador de Tráfego Aéreo por qualquer motivo que seja, poderá ter sua própria tomada de decisão dentro da sua cabine para evitar um vórtice de uma aeronave maior.

Keywords: Esteira de Turbulência, Aeronave, Avião, ADS-B, Machine Learning.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo das décadas acidentes aeronáuticos aconteceram devido a aeronaves ingressarem em esteiras de turbulência muito fortes e visando prevenir tais acidentes é que foi pensado em separações e um tempo seguro para pouso e decolagem. Com o uso do ADS-B é possível obter informações de altitude, velocidade, posição de outras aeronaves a milhas de distância. Será apresentado nesse trabalho técnicas de Machine Learning (área de Inteligência Artificial, com a finalidade de desenvolver técnicas computacionais capazes de adquirir conhecimento de forma automática) utilizando as regras de separação segura por distância e de tempo para com as esteiras de turbulência de outras aeronaves possibilitando perfeitamente a geração de alertas audiovisuais ao piloto em sua própria cabine. Um perigo, uma ameaça real que aparece invisível no céu e provoca desastres sempre sem avisos.

Em 12/06/2016, uma aeronave Piper Saratoga que tem esteira de turbulência categoria leve cruza abaixo da trajetória de um Boeing 737. A aeronave leve se despedaça no ar devido a ter adentrado a violenta à esteira de turbulência do Boeing 737 ser muito violenta. O piloto e o passageiro morreram.

O Manual de Informação Aeronáutico recomenda que o piloto liberado a seguir uma aeronave e tenha aceitado realizar aproximação visual para pouso, é de sua responsabilidade manter a distância segura e manter uma trajetória para o pouso ou decolagem que evite adentrar a esteira de turbulência.

Alguns casos de acidentes/incidentes relatados em relatórios de investigação no mundo:

- Bombardier Challenger 604, sobre o Mar Arábico. Diversos passageiros se machucaram, um deles gravemente. A aeronave ficou muito danificada e, consequentemente, inservível, 2017.
- E170, en-route, Ishioka Japan, 2014.
- Um C-130J-30, da Força Aérea Indiana, se acidentou perto de Gwalior, Índia, morreram todas as 5 pessoas abordo, 2014.
- Robin DR 400. Três morreram e um ficou gravemente ferido, 2012.
- P28A / S76, Humberside UK 2009
- A319 / B744, en-route near Oroville WA USA, 2008
- A320, en-route, North East Spain 2006
- A306, vicinity JFK New York USA, 2001
- B733, en-route, Santa Barbara CA USA, 1999
- B735, en-route, North East of London UK, 1996
- C185, Wellington New Zealand, 1997
- WW24, vicinity John Wayne Airport Santa Ana CA USA, 1996.

Atingir uma esteira de turbulência no momento do pouso ou decolagem pode ser fatal. O piloto muitas das vezes não tem noção do que lhe espera ou não tem a precisão necessária para tomar a melhor manobra evasiva para evitar o vórtice de uma aeronave. Por isso, que este trabalho traz uma solução computacional usando Machine Learning para prover alertas e orientações que possam agregar mais informações de forma automática ao piloto.

A de se destacar que o avião é considerado um meio de transporte muito seguro, mas nem por isso acidentes aéreos deixam de acontecer.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura será dividida em três subseções sobre a área de Inteligência Artificial, sendo a primeira sobre Machine Learning, a segunda sobre Naive Bayes e a última sobre Rede Neural Multi-layer Perceptron.

2.1 Machine Learning

A classificação de esteiras de turbulência pode ser automatizada utilizando uma técnica de inteligência artificial chamada aprendizado de máquina.

Neste trabalho, inicialmente os exemplos são classificados como perigosos, para as esteiras de turbulências identificadas como super e pesadas.

A classificação é uma subcategoria de aprendizagem supervisionada. A classificação consiste em atribuir um rótulo para a saída a

partir de determinada entrada. Sistemas de classificação são usados geralmente quando as previsões são de natureza distinta, ou seja, um simples “sim ou não”. Exemplo: Mapeamento de uma categoria de esteira de turbulência e classificação como super, pesada, leve e média.

2.2 Naive Bayes

É uma técnica de classificação baseado no teorema de Bayes com uma suposição de independência entre os preditores. Possui uma velocidade relativamente alta e precisa de apenas poucos dados para realizar a classificação, o Naive Bayes pode ser utilizado para previsões em tempo real. Além disso, o Naive Bayes só precisa de um pequeno número de dados de teste para concluir classificações com uma boa precisão para concluir que se é perigosa ou não se aproximar de uma esteira de turbulência.

2.3 Rede neural multi-layer perceptron

O Perceptron produz uma única saída com base em várias entradas de valor real, formando uma combinação linear usando os pesos (e às vezes passando a saída através de uma função de ativação não linear): perigoso ou não para determinada esteira de turbulência.

3. ACIDENTES ENVOLVENDO ESTEIRAS DE TURBULÊNCIA

O problema a ser solucionado está relacionado a acidentes aeronáuticos que já aconteceram devido a aeronaves se cruzarem muito próximas no espaço aéreo. Por exemplo, um jato Chalenger 600 em 2017, acabou entrando na esteira de turbulência gerada por um Airbus A380, o que ocasionou em perda de altitude do jato em espiral no ar e o piloto só retomou o controle do avião cerca de mais de 10.000 pés abaixo da altitude que se encontrava, o jato teve perda total e os passageiros ficaram feridos.

A componente de alta pressão que passa pela parte de baixo da asa desloca-se para a ponta da asa para encontrar a componente de baixa pressão que passa pela parte de cima da asa, ocorrendo o surgimento de vórtices rotativos que recebem o nome de esteira de turbulência. O vórtice da asa direita possui rotação no sentido anti-horário e o vórtice da asa esquerda possui rotação no sentido horário, observando-se por trás. (Hünecke, 2001)

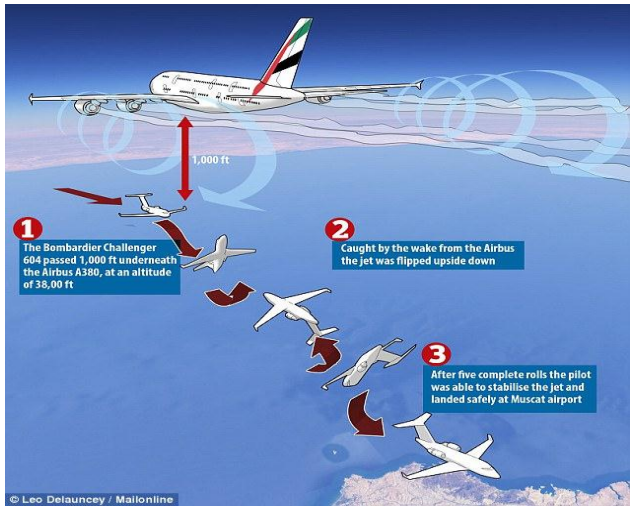


Figura 1: Jato em queda livre após cruzar esteira de turbulência de Airbus A380. Site(https://www.aviationcv.com/aviation-blog/2017/private-jet-flipped-upside-down-and-fell)

Os três principais efeitos da turbulência de esteira na aeronave que se segue são o rolamento induzido, a perda de altitude ou de velocidade de subida. Quando do encontro com a esteira turbulenta ocorre na área de aproximação, seu perigo é maior, já que a aeronave que se segue está então em uma fase crítica com respeito à velocidade, impulso, altitude e tempo de reação.



Figura 2: Situação no interior do jato após entrar na esteira de turbulência. Site(https://ops.group/blog/inside-the-cabin-before-and-after-the-wake-turbulence-encounter/)

Cabe ao Controlador de Tráfego Aéreo avisar ao piloto para aumentar a separação vertical para 1.000 pés em casos de uma aeronave de categoria inferior cruzar um avião categoria super. No caso desse acidente relatado acima o piloto não foi orientado a aumentar a

distância e nem sabia que um A380 passaria por cima de seu jato.

Outro acidente fatal em 2008 causado por esteira de turbulência se trata do LearJet 45, de matrícula XC-VMC. A aeronave voava atrás de um Boeing 767-300 e acima de um helicóptero pesado. Os pilotos do Learjet não foram avisados do tipo de aeronave em que se aproximavam, nem orientados a manter a separação segura. (Isso foi confirmado pelo Governo Mexicano através do Luiz Tellez, então Ministro de Comunicações do México.)

O Learjet de categoria de esteira de turbulência média se aproximou demais e entrou na esteira de turbulência categoria pesada do Boeing 767-300 perdendo seu controle em uma descida descontrolada e caindo sobre vários carros, ferindo 40 pessoas em uma avenida muito movimentada próximo ao aeroporto Internacional da Cidade do México antes mesmo de iniciar para o pouso. As nove pessoas no avião morreram e outras cinco vítimas fatais que passavam na avenida no momento da queda.

Alguns fatores contribuintes:

1. Falta de treinamento adequado da tripulação no Lear Jet 45.
2. Atraso da tripulação de voo na redução da velocidade.
3. Falta de controle de tráfego aéreo para corrigir a velocidade de aproximação excessiva da aeronave.
4. Provável fadiga acumulada pelo controlador de tráfego aéreo.

A separação entre o 767 e o Learjet deveria ser de 5 NM, os dois estavam apenas 4,15 NM. Fica evidente a importância de aprimoramentos de técnicas de Inteligência Artificial para prover alertas ao piloto de forma automática e evitar acidentes e mortes.



Figura 3: Destroços da queda da aeronave. Site(https://www.transponder1200.com/diosito-a-10-anos-del-impacto-del-learjet-45-en-ciudad-de-mexico/)

Outros eventos de acidentes envolvendo esteiras de turbulência de espalham pelo mundo e este artigo tem a intenção de trazer informações importantes para a prevenção de sinistros aéreos.

4. CATEGORIAS DE ESTEIRAS DE TURBULÊNCIA DE AERONAVES

Tabela 1: Categorias de Esteiras de Turbulência de aeronaves

CATEGORIAS DE ESTEIRA DE TURBULÊNCIA/ PESO MÁXIMO DE DECOLAGEM DA AERONAVE SUPER(J) Airbus A380 e o Antonov 225		
PESADA (H) - 136.000 kg (300.000 libras) ou mais;	**EMPRESA**	**PESO DE DECOLAGEM (kg)**
A300B4-200	Airbus	165000
A340-200	Airbus	275000
A340-300	Airbus	276500
A340-500	Airbus	380000
A340-600	Airbus	380000
A380-800	Airbus	560000
An-124-100	Antonov	392000
An-124-100M-150	Antonov	402000
An-225	Antonov	640000
BOEING 707-320C	Boeing	152407
BOEING 767-300	Boeing	163747

MÉDIA (M) -acima de 7.000 quilos, mas menor do que 136 000 kg (300. 000 libras)	EMPRESA	PESO DE DECOLAGEM (kg)
AIRBUS A318-100	Airbus	68000
A319-100	Airbus	75500
A320-200	Airbus	77000
A321-200	Airbus	93500
An-148-100B	Antonov	41950
An-148-100E	Antonov	43700
An-158***	Antonov	43700
An-168***	Antonov	43700
An-12	Antonov	61000
717-200	Boeing	54885
727-200	Boeing	95254
727-200/W	Boeing	95254
737-200	Boeing	58332
737-300	Boeing	62823
737-300/W	Boeing	62823
737-400	Boeing	68039

LEVE (L) - 7000 kg (15.500 libras) ou menos.	EMPRESA	PESO DE DECOLAGEM (kg)
ANTONOV An-2	Antonov	5500
An-3	Antonov	5800
An-28	Antonov	6500

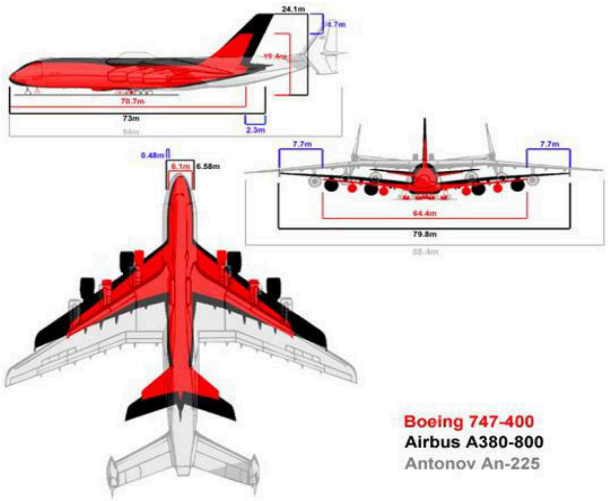


Figura 4: Dimensões de aeronaves categoria pesada e super. Site https://tacairnet.com/2016/08/31/china-aims-to-build-a-second-an-225-cossack-in-cooperation-with-antonov/an225-81/

A metodologia de separação por categoria de esteira de turbulência começou a ser empregada na década de 70 e foi criada com o intuito de evitar o risco de a aeronave seguidora enfrentar dificuldades de controle ao entrar na esteira de turbulência da aeronave líder, tendo essas preocupações aumentadas à medida que as aeronaves se tornaram mais rápidas, maiores e com maior peso de decolagem.

Em uma pesquisa realizada pela NTSB (National Transportation Safety Board) mostrou que entre os anos de 1983 e 1993 ocorreram pelo menos 51 acidentes e incidentes nos Estados unidos que foram resultado de possíveis encontros com esteiras de turbulência, causando 27 mortes e elevados danos a aeronaves. A pesquisa apontou que os acidentes e incidentes causados pela esteira de turbulência foram mais frequentes durantes as aproximações para pouso e no pouso do que em qualquer outra fase do voo pelo fato dos aviões estarem voando em baixa velocidade e altura, tendo efeitos do fenômeno sido sentidos de forma abrupta e sem aviso prévio (FAA 2005).

Portanto, após realizar análises e pesquisas ficou constatada a necessidade de produzir alertas na tela do ADS-B para orientar o piloto que uma aeronave que gera um vórtice muito grande está a sua frente ou está por passar por cima ou por baixo de seu avião.

5. SOLUÇÕES RELACIONADAS E DESENVOLVIMENTO DE UMA SOLUÇÃO

A esteira de turbulência não é um fenômeno natural, mas sim um vórtice gerado pela própria aeronave. Algumas soluções foram criadas como:

1 – Sensores para captar turbulências;

2 – A Boeing está desenvolvendo um detector a laser que ficará no nariz do avião para captar adversidades meteorológicas;

3 – Captação de condições meteorológicas por satélite. Nenhum trabalho foi encontrado usando o ADS-B como solução para prover informações suficientes para que o piloto não adentre uma esteira de turbulência.

Sensores, lasers e imagens por satélite podem informar turbulências que são fenomenos naturais. A esteira de turbulência gerada por um avião cria um fluxo de ar que

pode durar alguns minutos em baixas altitudes e muitos minutos em altas altitudes, onde a sua dissipação é mais demorada devido ao ar ser mais rarefeito.

O ADS-B se comunica constantemente com as outras aeronaves e conseguem trocar informações, mas não informa ao piloto qual categoria de esteira de turbulência está em sua direção. Na aviação a redundância para problemas é muito forte e nunca podemos usar apenas uma tecnologia, mas várias são usadas para garantir o perfeito funcionamento.

O uso do ADS-B é uma medida preventiva para mitigação e evitar acidentes aeronáuticos. Introduzindo técnicas de Inteligência Artificial é possível de maneira rápida, precisa e automática fornecer ao piloto qual aeronave está ao seu redor e consequentemente saber a sua esteira de turbulência. Automaticamente proverá orientações ao piloto do que fazer para não ser atingido ou não adentrar uma esteira de turbulência muito forte com antecedência de centenas de quilômetros.

Atualmente o ADS-B não informa ao piloto quais as categorias de esteiras de turbulência das aeronaves que estão ao seu redor. Diante desse vazio de informações é que foi pensado em usar técnicas de Machine Learning para prover informações precisas de forma inteligente. Sabendo os critérios de separação radar e do tempo mínimo para decolagem e pouso é possível criar métodos computacionais no CDTI do ADS-B para alertar o piloto a manter a separação segura e lhe informar o tempo correto de decolar e pousar sem o perigo de entrar em uma esteira turbulência muito forte. Ensinar ao sistema a alertar o piloto de maneira oral e visual quando o mesmo não respeitar os critérios de separação radar e de tempo em relação à categoria de esteira de turbulência.



Figura 5: Aeronave adentrando esteira de turbulência da aeronave a sua frente. Site (https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/agencia-europeia-emite-alerta-sobre-riscos-da-esteira-de-turbulencias-de-superjumbos_3596.html)



Figura 6: Maiores aeronaves. Categoria J (Super). Site (http://www.ie-wallpapers.com/antonov-225.html)

6. DADOS DE TEMPO E DISTÂNCIA PARA OBTENÇÃO DE RESULTADOS

Tabela 2: Critérios de tempo para pouso e decolagem de aeronaves e distância de separação radar em voo. ICA 100-37, Serviços de Tráfego Aéreo - 2018

AERONAVES	POUSO	DECOLAGEM	DISTÂNCIA	PERIGO
MÉDIA ATRÁS DE UMA PESADA	2 MINUTOS	2 MINUTOS	5NM (9,26 km)	SIM
LEVE ATRÁS DE UMA PESADA	3 MINUTOS	2 MINUTOS	6NM (11,1 km)	SIM
LEVE ATRÁS DE UMA MÉDIA	3 MINUTOS	2 MINUTOS	5NM (9,26 km)	SIM
MÉDIA ATRÁS DE UM SUPER	3 MINUTOS	3 MINUTOS	7NM (12,96 km)	SIM
LEVE ATRÁS DE UM SUPER	4 MINUTOS	3 MINUTOS	8NM (14,8 km)	SIM
PESADA ATRÁS DE UM SUPER	2 MINUTOS	2 MINUTOS	6NM (11,1 km)	SIM
SUPER/PESADA ATRÁS DE UM SUPER			NÃO REQUERIDO	NÃO
PESADA ATRÁS DE UMA PESADA			4NM (7,40 km)	NÃO
PESADA ATRÁS DE UMA MÉDIA			3NM (5,55 km)	NÃO
MÉDIA ATRÁS DE UMA MÉDIA			3NM (5,55 km)	NÃO
PESADA ATRÁS DE UMA LEVE			3NM (5,55 km)	NÃO
MÉDIA ATRÁS DE UMA LEVE			3NM (5,55 km)	NÃO
LEVE ATRÁS DE UMA LEVE			3NM (5,55 km)	NÃO

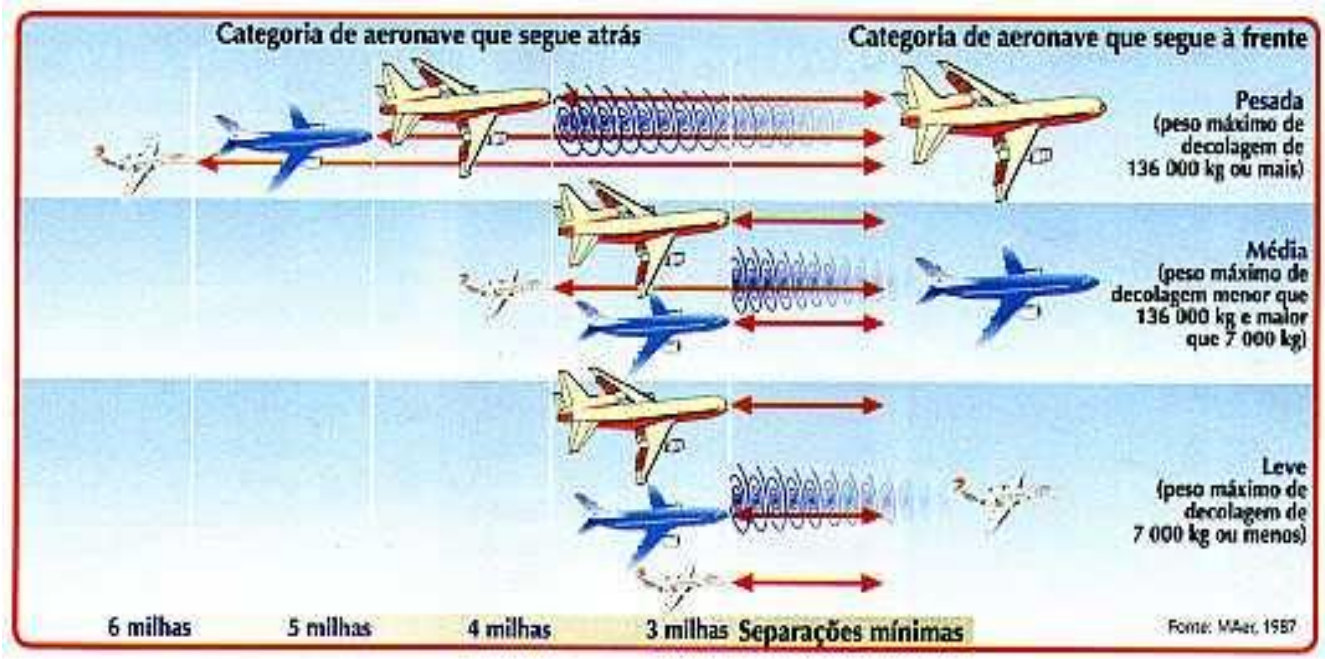


Figura 7: Separação devida para se evitar entrar na esteira de turbulência da aeronave à frente. Site (https://www.aviacaofederal.com.br/2009/12/esteiras-de-turbulencia-o-risco-dos.html)

Fisicamente, a esteira apresenta o comportamento inicialmente de se mover para baixo e depois manter-se nivelada. Ela nunca é encontrada no mesmo nível, nem abaixo de 300 metros que a aeronave geradora. Geralmente, os vórtices apresentam uma razão de descida de 100 a 150 metros por minuto, nos primeiros 30 segundos. A razão de descida diminui, atingindo zero entre 150 a 300 metros abaixo da linha de voo. A velocidade da aeronave irá determinar a força e o movimento inicial do vórtice.

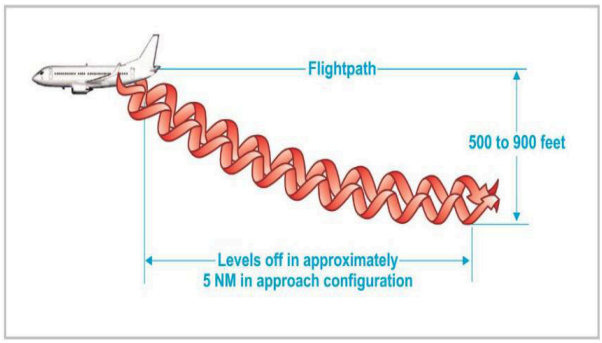


Figura 8: Esteira de Turbulência de um avião. (Fonte: Fonte: FAA AC 90-23G - Aircraft Wake Turbulence)

Portanto, a melhor maneira da aeronave seguidora evitar a esteira de turbulência é voando acima do nível de voo da aeronave líder.

7. COMUNICAÇÕES ENTRE AS AERONAVES

Aeronaves possuem atualmente o ADS-B (Automatic dependent surveillance-broadcast) que permite ao piloto ter informações de posição, velocidade e altitude de outras aeronaves.

O ADS-B out transmite a cada segundo para outras aeronaves suas informações de identificação, posição, altitude e velocidade, por meio de um transmissor a bordo.

Para a recepção dessas informações em tempo real faz se presente o ADS-B in. O ADS-B consegue enxergar aeronaves tanto no ar quanto em solo a quilômetros de distância.

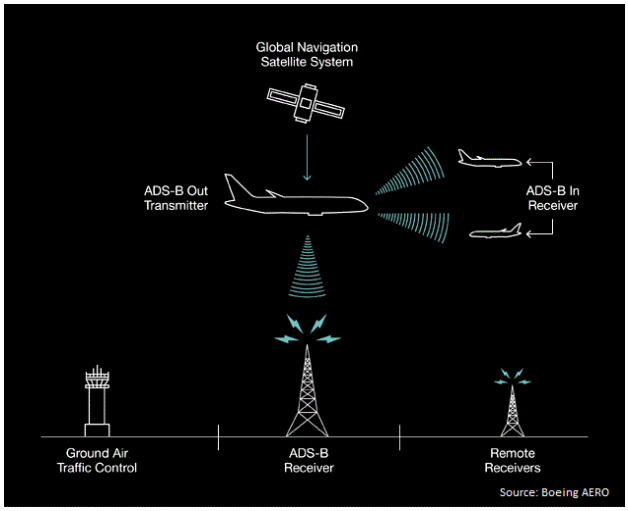


Figura 9: Aeronaves se comunicando pelo ADS-B. Site (https://www.suasnews.com/2015/08/new-survey-on-ads-b-tracking-for-small-drones/)

Através do CDTI (Cockpit Display of Traffic) o piloto tem em sua própria cabine tais informações do ADS-B.



Figura 10: Tela do CDTI de uma aeronave. Site(https://blog.csdn.net/emperior/article/details/80741031)



Figura 11: Comunicação via ADS-B/Satélites de aeronaves. Site(https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2011-11-21/committee-ads-b-not-currently-justified)

8. CENÁRIOS

Vários cenários foram simulados usando as técnicas de Aprendizagem de maquina e os dados da tabela 2.

Na figura 12, temos o primeiro cenário de tempo de espera para uma aeronave decolar após outra aeronave ter decolado primeiro. Fazendo com que o sistema informe ao piloto que o tempo de espera já passou e que o mesmo pode executar a decolagem com segurança.

Para decolar é necessário esperar no mínimo de 2 a 3 minutos dependendo da categoria de esteira de turbulência da aeroanave à frente.



Figure 12 – Aeronave decolando e gerando uma sua esteira de turbulência. Site (http://www.formula1dictionary.net/drag.html)

Na figura 13, temos o cenário 2 que apresenta o sistema informando ao piloto que o tempo e a distância de realizar o pouso sem que seja atingido pelo vórtice é seguro e que poderá executar o pouso com segurança. Para pousar é necessário esperar no mínimo de 2 a 4 minutos dependendo da categoria de esteira de turbulência da aeroanave à frente.



Figure 13: Pouso de aeronave e geração de sua esteira de turbulência.
Site (https://www.military.com/video/commercial-aviation/civil-aviation/emirates-777-wake-vortex-landing/2630275674001)

Na figura 14, temos o terceiro cenário que apresenta a distância segura de uma aeronave para outra em voo. O sistema informa ao piloto para manter a distância segura e que o mesmo não seja atingido pela esteira de turbulência.

Em voo a aeronave deve manter uma distância de no mínimo de 5 a 8 milhas dependendo da categoria de esteira de turbulência da aeronave à frente.



Figure 14: Esteira de turbulência de avião. Site https://www.reddit.com/r/aviation/comments/lozfm/757_with_wake_vortex/)

9. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados foram obtidos através da ferramenta Weka, utilizada como forma de validar a base de dados criada para este projeto. Foi utilizado três algoritmos classificadores no weka para validar a base de dados: a rede neural *multi-layer perceptron (grupo functions)*, árvore j48 (grupo trees) e o método de naive bayes (grupo bayes).

Foi carregado o dataset com 5 atributos, 13 instâncias e duas classes para termos uma visão geral no Weka dos resultados.

Uma comparação é feita entre os algoritmos usados na Tabela 3. Nela são apresentadas a precisão média de cada algoritmo, sua taxa média de Falsos Positivos (FP), taxa média de Verdadeiros Positivos (TP) e a *f-measure*. O Weka detalha para cada classificador resultados de desempenho.

No diagrama 1, é apresentado um diagrama do processo de indução de um classificador e, posteriormente, a sua utilização. Primeiro, o conjunto de treinamento, no qual os rótulos das classes dos exemplos são conhecidos, é utilizado por um algoritmo de aprendizado para construir um modelo. Após a

construção, esse classificador pode ser aplicado para predizer os rótulos das classes dos exemplos do conjunto de teste, ou seja, exemplos cujas classes são desconhecidas.

Utilizando as métricas apresentadas é perfeitamente solucionável o problema de esteiras de turbulência, pois com a geração de informações por meio de alertas e culminando em orientações orais ao piloto é mais que suficiente evitar que a aeronave seguidora ou que cruzará uma aeronave maior sofra com o impacto que a esteira de turbulência provoca.

Os testes de acordo com os cenários foram para alinhar os algoritmos de Inteligência Artificial em um contexto real da aviação tripulada. Tal sistema é importante para qualquer procedimento que evite adentrar uma esteira de turbulência, embora as especificidades de altitude em que as aeronaves voam apresentem uma duração de seu vórtice por tempos diferentes. A implementação atual para o ADS-B é um passo destacável para a segurança da aviação.

Os classificadores MLP e o Naive Bayes apresentaram uma média de verdadeiros positivos de 0,923 para ambos. Para os falsos positivos apresentam respectivamente uma média de 0,066 para ambos.

O J48 apresentou uma média de verdadeiros positivos de 0,846. Para os falsos positivos apresentou uma média de 0,156.

Na comparação os classificadores se mostraram com resultados bem satisfatórios utilizando os dados da tabela 3. O classificador MLP e o Naive Bayes apresentaram os melhores resultados, com uma média de precisão de mais de 93%. Sendo que o classificador J48 teve uma média de precisão de mais de 84%.

Tabela 3: Resultados obtidos no WEKA

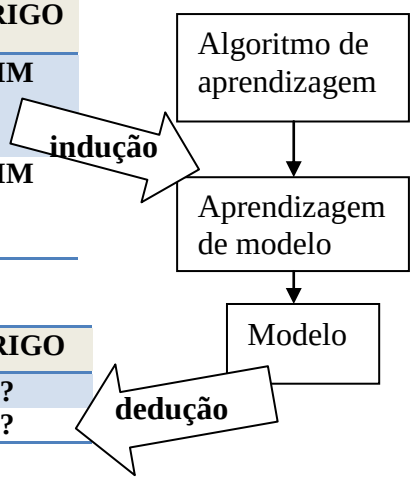
Classificador	Precisão Média %	F-Measure Médio	TP Médio	FP Médio
Rede Neural MLP	0,934	0,923	0,923	0,066
J48	0,846	0,846	0,846	0,156
Naive Bayes	0,934	0,923	0,923	0,066

Fonte: Elaborado pelos autores

Diagrama 1: Indução de classificação de esteiras de turbulência e dedução das classes para novas amostras

AERONAVES	POUSO	DECOLAGEM	DISTÂNCIA	PERIGO
LEVE ATRÁS DE UM SUPER	4 MINUTOS	3 MINUTOS	8NM (14,8 km)	SIM
LEVE ATRÁS DE UMA LEVE			3NM (5,55 km)	SIM

AERONAVES	POUSO	DECOLAGEM	DISTÂNCIA	PERIGO
XY	4 MINUTOS	3 MINUTOS	8NM (14,8 km)	?
YX			3NM (5,55 km)	?



Fonte: Elaborado pelos autores

10. CONCLUSÃO

A melhoria a se ter no CDTI do ADS-B é pensada com o intuito de aprimorar as informações fornecidas e utilizando técnicas de classificação dentro da Inteligência Artificial foi possível prestar um sistema robusto que aponte o nível de perigo de uma esteira de turbulência e com isso evitar incidentes, sinistros aéreos e consequentemente mortes.

11. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Primeiro Centro Integrado de defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA I) e ao Translab-UnB que possibilitaram conhecimentos para realização desse projeto.

12. REFERÊNCIAS

ICA 100-37. Instruções do Comando da Aeronáutica (Serviços de Tráfego Aéreo). Disponível em: <https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4993>. Acessado em 25 de maio de 2019.

OPSGROUP. Dentro da cabine - Antes e Depois de Encontrar Esteira de Turbulência. Disponível em: <(https://ops.group/blog/inside-the-cabin-before-and-after-the-wake-turbulence-encounter/>. Acessado em 29 de maio de 2019.

AVIATIONCV. "Jato em queda livre após cruzar esteira de turbulência de um Airbus A380. Disponível em: <(https://www.aviationcv.com/aviation-blog/2017/private-jet-flipped-upside-down-and-fell>. Acessado em 29 de maio de 2019.

TRANSPONDER1200. Destroços da queda de aeronave. Disponível em: <(https://www.transponder1200.com/diosito-a-10-anos-del-impacto-del-learjet-45-en-ciudad-de-mexico/>. Acessado em 04de junho de 2019.

TACAIRNET. Categoria pesada e super. Disponível em: <https://tacairnet.com/2016/08/31/china-aims-to-build-a-second-an-225-cossack-in-cooperation-with-antonov/an225-81/>. Acessado em 19 de junho de 2019.

PAMPLONA, Daniel Alberto. Impactos na capacidade aérea através da recategorização da esteira de turbulência das aeronaves(Hünecke,2001). Disponível em: <https://www.academia.edu/12480774/impactos_na_capacidade_a%c3%89rea_atrav%c3%89s_da_recategoriza%c3%87%c3%83o_da_esteira_de_turbul%c3%8ancia_das_aeronaves>acessado em 10 de julho de 2019.

CSDN. Tela do CDTI/ADS-B de uma aeronave. Disponível em:<https://blog.csdn.net/emperior/article/details/80741031> Acessado em 10 de julho de 2019.

FLIGHTZONA. Esteira de Turbulência. Disponível em: <https://www.flightzona.com/2017/03/17/terbang-1-000-kaki-di-bawah-a380-challenger-634-dihantam-turbulensi-dahsyat/>. Acessado em 10 de julho de 2019.

SUASNEWS. Comunicação ADS-B. Disponível em: <https://www.suasnews.com/2015/08/new-survey-on-ads-b-tracking-for-small-drones/>. Acessado em 19 de julho de 2019.

AEROMAGAZINE. Aeronave adentrando esteira de turbulência da aeronave a sua frente. Disponível em:< https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/agencia-europeia-emite-alerta-sobre-riscos-da-esteira-de-turbulencias-de-superjumbos_3596.html>. Acessado em 10 de julho de 2019.

FORMULA1. Aeronave decolando e gerando uma sua esteira de turbulência. Disponível em: <http://www.formula1dictionary.net/drag.html>. Acessado em 10 de julho de 2019.

AOPA. Acidentes aeronáuticos. Disponível em: http://www.aopa.org/asf/epilot_acc/chi06fa154.html. Acessado em 24 de julho de 2019.

ANAC. Esteira de Turbulência. Disponível em:<https://www.anac.gov.br/assuntos/setor-regulado/profissionais-da-aviacao-civil/meteorologia-aeronautica/condicoes-meteorologicas-adversas-para-o-voo/turbulencia#esteira>. Acessado em 24 de julho de 2019.

AINONLINE. Comunicação via ADS-B/Satélites de aeronaves.Disponível em:<https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2011-11-21/committee-ads-b-not-currently-justified>. Acessado em 24 de julho de 2019.

WALLPAPERS. Antonov 225. Disponível em: <http://www.ie-wallpapers.com/antonov-225.html>. Acessado em 24 de julho de 2019.