PLANEJAMENTO DE VOO SOB CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS ADVERSAS: UM SISTEMA DE APOIO A DECISÃO

Iuri Souza Ramos Barbosa
Li Weigang
Universidade de Brasília
Departamento de Ciência da Computação
Yaeko Yamashita
Universidade de Brasília
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

RESUMO
Uma aeronave em voo detecta a presença de condições meteorológicas adversas em sua rota através de seu radar meteorológico de bordo, e de posse dessa informação, o piloto toma a decisão de realizar ou não um desvio das células convectivas (nuvens *cumulonimbus*) a sua frente. No entanto, o radar meteorológico da aeronave possui limitações quanto ao alcance da detecção de células convectivas no espaço aéreo. Dessa forma, os procedimentos que o piloto pode realizar ficam limitados à precisão deste dispositivo. Este trabalho desenvolve um sistema inteligente voltado ao planejamento de voo num espaço aéreo sob condições meteorológicas adversas utilizando duas fontes de dados: uma de rastreamento de aeronaves em voo com a utilização de um algoritmo de *clustering* para delimitar as aerovias do espaço aéreo e outra fonte para rastreamento de ocorrências de células convectivas via radares meteorológicos terrestres para acompanhar as condições meteorológicas adversas no espaço aéreo. A solução proposta contribui para a otimização do fluxo de tráfego aéreo, redução do atraso de aeronaves, redução do consumo de combustível, etc., representa um fator de impacto positivo no Gerenciamento de Tráfego Aéreo.

ABSTRACT
Aircraft detect the existence of adverse weather conditions on their way with the help of their onboard weather radar. Knowing the location of convection cells (*cumulonimbus* clouds), the pilot then decides whether or not to change the course of the aircraft. However, the onboard weather radar has some limitations related to the detection range of convection cells in the airspace. Therefore, the course of actions that the pilot can perform is limited to the accuracy of this device. The proposed work builds an intelligent system for flight planning under adverse weather conditions. The system mainly uses two data sources. On the one hand, it consumes flight tracking information in combination with a clustering algorithm to delimit the boundaries of airways. On the other hand, it consumes weather information on convection cells obtained from ground-based weather radars in the airspace. The proposed solution contributes to the optimization of air traffic flow, reduction of aircraft delay, reduction of fuel consumption, etc., in other words, has a positive impact factor in Air Traffic Management.

1. INTRODUÇÃO

No Gerenciamento de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Management, ATM*), dependendo das condições meteorológicas no momento do voo, situações atípicas podem acontecer como: aeronaves podem ser obrigadas a desviar de suas rotas aéreas pré-determinadas (aerovias), aeronaves podem ser redirecionadas para pouso em outro aeroporto, voos podem ser cancelados, aeroportos podem ser fechados por um determinado período, etc. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta um sistema de suporte voltado ao planejamento de voo sob condições meteorológicas adversas.

Uma aeronave em voo detecta condições meteorológicas adversas (representada por células convectivas ou nuvens *cumulonimbus*) em sua rota através de seu radar meteorológico de bordo (REDEMET, 2019a). De posse das informações provenientes do radar, o piloto toma a decisão de desviar ou não da célula convectiva detectada. No entanto, o radar meteorológico da aeronave possui limitações quanto ao alcance e extensão na detecção de células convectivas no espaço aéreo, limitando assim, a quantidade de ações e procedimentos que o

piloto pode realizar.

Ao mesmo tempo, informações relativas às posições de células convectivas no espaço aéreo também podem ser obtidas através de radares meteorológicos terrestres, como o Sistema de Tempo Severo Convectivo (STSC) (REDEMET, 2019b). Estes radares por sua vez oferecem uma maior riqueza de informações sobre a localização, tamanho, abrangência e deslocamento das células convectivas no espaço aéreo, colaborando assim para uma tomada de decisão antecipada e preventiva por parte dos pilotos, como o desvio antecipado de rota.

O problema de planejamento de voo sob condições meteorológicas adversas é normalmente abordado no contexto de predição de trajetória de aeronaves no espaço aéreo. Schilke e Hecker (2014) propuseram um sistema de otimização de trajetórias de aeronaves sob tempo severo convectivo, onde é utilizada informações sobre condições meteorológicas atualizadas advindas de radares terrestres. No trabalho, o espaço aéreo é modelado como um grafo e transições para regiões compostas por células convectivas têm seus custos elevados de forma a desincentivar que as trajetórias passem por estas regiões. Dessa forma, o problema é abordado como um *shortest path problem* e a proposta utiliza o algoritmo de busca *Theta** para calcular de forma iterativa a trajetória da aeronave em cada etapa intermediária, onde as condições meteorológicas são novamente estimadas a fim de manter a trajetória prevista anteriormente ainda válida. O trabalho proposto pressupõe que as aeronaves possuem máxima liberdade na escolha de trajetória entre aeroporto de origem e destino (*free-flight*). No entanto, voos comerciais no Brasil operam por *Instrument Flight Rules* - *IFR* sobrevoando regiões pré-definidas pelo Controle de Tráfego Aéreo, que são as aerovias.

A proposta neste trabalho pode ser subdividida essencialmente em duas etapas: 1) dados de rastreamento de posições de voo de aeronaves são utilizados na identificação das fronteiras que delimitam as aerovias no espaço aéreo com a utilização de algoritmos de clustering. 2) as fronteiras das aerovias obtidas na etapa anterior são comparadas com as localizações das células convectivas obtidas por radares meteorológicos terrestres em busca de interseções entre as mesmas. As informações sobre as interseções identificadas podem ser, então, utilizadas na fase de planejamento de voo pelas partes interessadas em ATM, contribuindo assim para o processo de tomada de decisão. Os resultados obtidos no estudo de caso são promissores, na medida em que foi possível: 1) delimitar as fronteiras das aerovias conectando determinados aeroportos através de transformações feitas em posições de voo inicialmente rastreadas (processos de normalização de posições de voo e de delimitação de aerovias); e 2) encontrar interseções entre células convectivas no espaço aéreo e as aerovias geradas nas etapas anteriores.

2. GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO AÉREO NO TRANSPORTE AÉREO

A navegação aérea via *Instrument Flight Rules* (IFR), onde cartas de navegação são seguidas com auxílio de instrumentos aeronáuticos, é composta pelas seguintes fases de voo (Canino-Rodríguez et al., 2015): 1) fase pré-voo, composta por ações de planejamento; 2) taxiamento, onde a aeronave se posiciona na cabeceira da pista; 3) decolagem, quando a aeronave tem sua decolagem autorizada; 4) ascendência, a aeronave ganha altitude e dá entrada na aerovia indicada em seu plano de voo; 5) cruzeiro, quando a aeronave prossegue sua rota na aerovia pré-estabelecida; 6) descida inicial, onde a aeronave desce gradativamente ao aeroporto de destino; 7) aproximação final, é quando a aeronave realiza procedimento de descida na pista de aterrissagem; 8) taxiamento, onde a aeronave é conduzida ao pátio até sua parada total.

A fase de cruzeiro é aquela mais extensa do procedimento acima, e é por onde a aeronave ajusta sua altitude, velocidade e direção na aerovia definida em seu plano de voo (documento contendo informações a respeito do voo emitido para os órgãos responsáveis). As aerovias são rotas aéreas pré-determinadas por onde as aeronaves são permitidas para trafegar no espaço aéreo onde são delimitadas principalmente em largura, onde podem chegar a 80 km, e em altura variando entre 7,5 km e 12,5 km, para a maioria dos voos comerciais (DECEA, 2019a). As aerovias são também divididas verticalmente em níveis de voo, que são separadas a uma distância vertical mínima para garantir que várias aeronaves possam sobrevoar uma mesma aerovia ao mesmo tempo (DECEA, 2019b).

As condições meteorológicas adversas são caracterizadas principalmente por nuvens *cumulonimbus*, que são células convectivas de forte desenvolvimento vertical atingindo mais de 15 km de altura. São comumente associadas a graus severos de turbulência e correntes de ventos, sendo assim, motivo de preocupação para pilotos (REDEMET, 2019a). A detecção destas células convectivas pelo radar meteorológico de bordo das aeronaves, permite que pilotos realizem o seu desvio em tempo hábil. Este desvio de rota é normalmente realizado com a mudança de direção da aeronave, ao contrário de uma mudança em altitude, dada a grande extensão vertical de células convectivas.

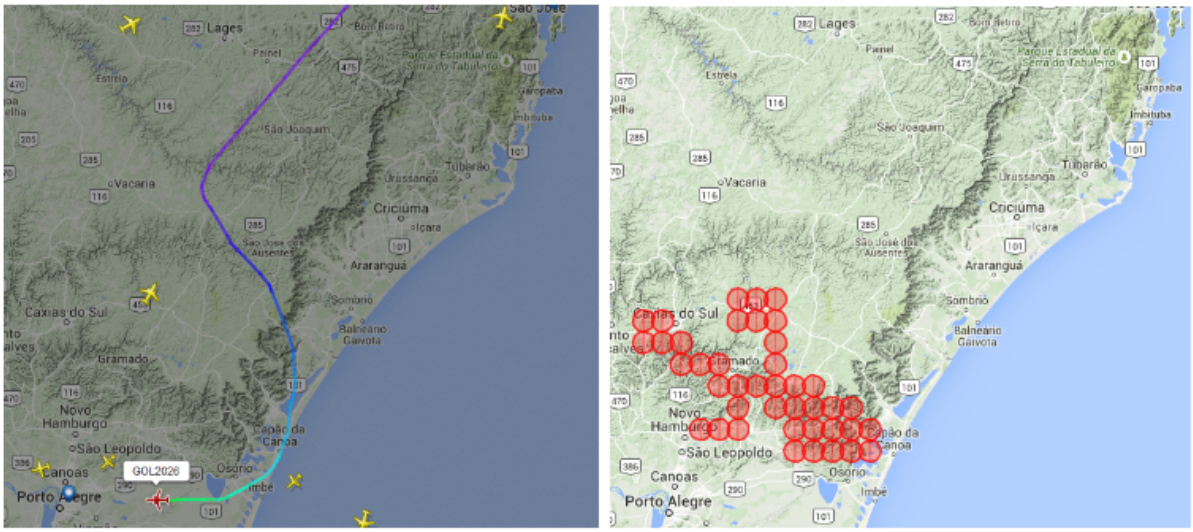

Figura 1: Trajetória do voo *GOL2026* (esquerda) e células convectivas detectadas via Sistema de Tempo Severo Convectivo - STSC (direita) (REDEMET, 2019a).

Na Figura 1, informações registradas em 26 de janeiro de 2015 às 18:08 GMT-3, está representada a trajetória de um voo sob influência de condições meteorológicas adversas (linha roxa) e as células convectivas identificadas pelo Sistema de Tempo Severo Convectivo - STSC (círculos em vermelho). Observa-se ainda que o piloto redirecionou a aeronave para desviar das células convectivas identificadas pelo radar meteorológico de bordo com somente acesso a informações do radar meteorológico de bordo, ainda sem as informações sobre células convectivas identificadas a partir de radares meteorológicos terrestres, conforme a Figura 1 (direita). De modo que, caso estas informações fossem utilizadas no processo de tomada de decisões, seria possível detectar a interseção entre a aerovia utilizada pela aeronave e as células convectivas rastreadas, resultando numa mudança de rota antecipada, e consequentemente, num menor tempo de voo, redução do consumo de combustível, aumento da segurança, etc.

3. DESENHO DA ARQUITETURA: PROPOSTA DE SOLUÇÃO

As abordagens estudadas compartilham o objetivo comum de resolver o problema de planejamento de rota de aeronaves (*trajectory prediction*) levando em consideração informações sobre as condições meteorológicas do espaço aéreo. Em geral estas abordagens se diferenciam entre si no que se refere aos parâmetros otimizados e às informações meteorológicas utilizadas (Girardet et al., 2013, Majumder e Prasad, 2016, Cheung, 2018). No trabalho proposto, são utilizados dados de rastreamento de aeronaves e de posições de células convectivas no espaço aéreo. Mais especificamente, é utilizado o Sistema de Tempo Severo Convectivo (STSC) para rastreamento de células convectivas no espaço aéreo brasileiro. A solução proposta é uma consequência direta dos dados disponíveis, que foram obtidos de forma gratuita (posições de voo em tempo real e posições geográficas de células convectivas).

A proposta se concentra principalmente na fase c*ruzeiro* de voo, onde a aeronave navega em aerovias no espaço aéreo, onde é mais suscetível a influências de condições meteorológicas adversas. A solução proposta visa prover às partes interessadas, informações relevantes quanto à posição de células convectivas monitorando se estas intersectam as aerovias do espaço aéreo. Isto é, pretende servir como interface de apoio fornecendo informações meteorológicas de forma oportuna aos *stakeholders* em ATM para o processo de tomada de decisões, como antecipar e/ou evitar os procedimentos de desvio de rota.

3.1 Visão geral da arquitetura do sistema

No que se refere à arquitetura da solução conforme a Figura 2, o sistema recebe como entrada: informações de rastreamento de voo, informações meteorológicas em tempo real e os aeroportos de origem e destino; e produz como saída uma lista contendo as células convectivas que intersectam em alguma aerovia conectando os aeroportos de origem e destino. A Figura 2 ilustra os componentes/processos do sistema, onde as informações de entrada / saída estão em tons de verde, o armazenamento de dados em rosa claro, os dados recuperados / temporários estão em azul e os algoritmos propostos estão coloridos em rosa escuro.

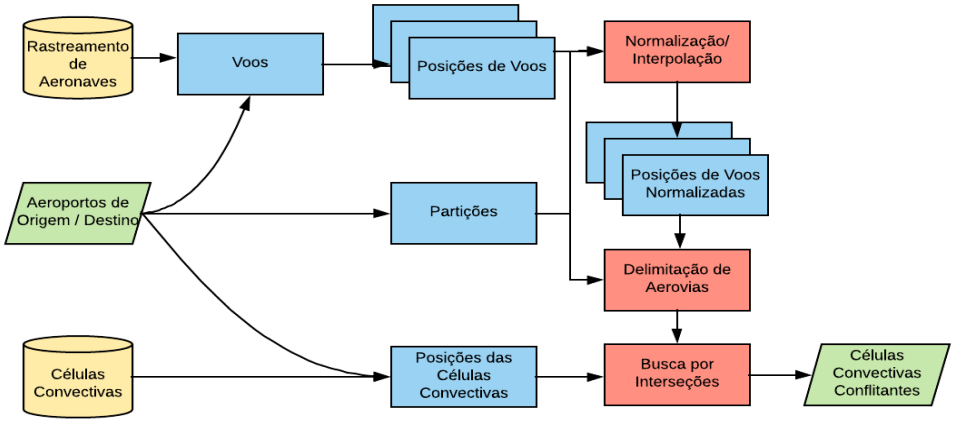

Figura 2: Visão geral da arquitetura do sistema.

Assim a solução proposta segue as seguintes etapas para medir o impacto do tempo severo convectivo nas operações ATM:

- Fontes de dados: rastreamento das posições de voo de aeronaves sobrevoando o espaço aéreo e rastreamento das ocorrências das células convectivas no espaço aéreo;
- Normalização de posições: normaliza as posições de voo utilizando Interpolação Linear;

- Delimitação de aerovias: identificação de um conjunto de posições que delimitam as fronteiras das aerovias utilizando algoritmos *clustering* das posições de voo normalizadas;
- Identificação de interseções: identificação de interseções entre aerovias e células convectivas através da comparação entre as posições que delimitam as fronteiras das aerovias com as posições das células convectivas no espaço aéreo.

3.2 Fontes de dados

As posições de voo de aeronaves podem ser rastreadas utilizando plataformas disponíveis no mercado formadas por redes distribuídas e de colaboração coletiva de receptores ADS-B. *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* (ADS-B) que é uma tecnologia de vigilância automática e cooperativa para rastreamento de aviões em tempo real. Aeronaves determinam suas posições através de navegação via satélite e transmitem os dados coletados através de uma frequência de rádio, que por sua vez podem ser recebidos por receptores ADS-B dentro de determinado alcance (DECEA, 2019c, 2019d). Estas redes distribuídas de receptores ADS-B são capazes de rastrear grande parte das aeronaves no espaço aéreo a depender da quantidade e posições dos receptores que compõem a rede. Provêm as seguintes informações como entradas do sistema: 1) status do voo (número do voo ou *callsign*, aeroportos de origem e destino, horário estimado de partida, etc.); 2) detalhes da aeronave (identificador, modelo, etc.); 3) detalhes do voo (posições de voo da aeronave em latitude, longitude e altitude, velocidade, direção, etc.).

Para rastreamento de células convectivas, é utilizado o Sistema de Tempo Severo Convectivo -STSC, que destaca as áreas de ocorrências de tempo severo convectivo, composto por nuvens cumulonimbus. O sistema produz seus resultados com base no processamento e análise dos dados do Sistema de Radares Meteorológicos e do Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas (REDEMET, 2019a, 2019c). No STSC cada célula convectiva é representada por um círculo, sendo dessa forma, definido pela posição de seu centro e a medida de seu raio. O sistema fornece para cada célula convectiva: posição geográfica de seu centro (latitude e longitude), raio da célula convectiva, horário e fonte originadora (Radar e/ou DEA - Descargas Elétricas Atmosféricas) (REDEMET, 2019d).

3.3 Normalização de posições de voo

O processo de normalização consiste na produção de um novo conjunto de posições de voo, a partir do conjunto de posições de voo rastreadas. Este novo conjunto de posições de voo, também chamadas de posições de voo normalizadas, será utilizado no processo de delimitação de aerovias (descrito na seção 3.4), utilizado na identificação do conjunto de pontos delimitando as aerovias no espaço aéreo. O processo de normalização representa, portanto, um pré-processamento ao processo de delimitação de aerovias.

Seja um voo *F* partindo do aeroporto de origem *A* em direção ao aeroporto de destino *B* com posições de voo *rastreadas* $FP = [p_0, p_1, \ldots, p_n]$. O processo de normalização *transforma* o conjunto de posições de voo *FP* no conjunto de posições de voo *normalizadas* $NFP = [p'_0, p'_1, \ldots, p'_m]$tal que qualquer posição de voo normalizada tem seu valor de longitude pertencente ao conjunto $LON = [L_0, L_1, \ldots, L_i, L_{i+1}, \ldots, L_k]$em que L_0é a longitude do aeroporto de origem *A*; L_k é a longitude do aeroporto de destino *B*; e $L_{i+1} - L_i = LONDIST$é a diferença entre quaisquer longitudes consecutivas e é *constante* e igual a *LONDIST*.

Sendo o conjunto de posições de voo *FP* uma amostragem da *trajetória* do voo *F*, o conjunto de posições de voo normalizadas *NFP* é *também uma amostragem (estimada*) da mesma trajetória que possui valores de longitude de suas posições de voo pertencentes a *LON*, isto é, $p'_i.longitude \in LON$, onde p'_ié uma posição de voo normalizada e $p'_i.longitude$é seu valor de longitude. Dado um valor de longitude qualquer *lon* pertencente ao conjunto *LON,* é calculada uma posição de voo normalizada *p'* utilizando o processo de *interpolação linear* (Phillips, 2003), onde seus valores de longitude, latitude e altitude são calculados pela Equação 1, 2 e 3, respectivamente:

$$p'.longitude = lon \quad (1)$$

$$p'.latitude = p_1.lat + (p_2.lat - p_1.lat)\times(lon - p_1.lon) \div (p_2.lon - p_1.lon) \quad (2)$$

$$p'.latitude = p_1.alt + (p_2.alt - p_1.alt)\times(lon - p_1.lon) \div (p_2.lon - p_1.lon) \quad (3)$$

Em que:

lon: elemento do conjunto *LON*;

p': posição de voo normalizada;

p_1 *e* p_2: as posições de voo rastreadas com valores de longitude *mais próximos em valor absoluto* à longitude *lon*, isto é, $|p_1.lon - lon| \leq |p_i.lon - lon|$ para qualquer $p_i \in FP$e também $|p_2.lon - lon| \leq |p_i.lon - lon|$ para qualquer $p_i \in FP - \{p_1\}$;

$p_1.lon$ *e* $p_2.lon$: notação simplificada para os valores de longitude das posições de voo p_1 *e* p_2, respectivamente;

$p_1.lat$ *e* $p_2.lat$: notação simplificada para os valores de latitude das posições de voo p_1 *e* p_2, respectivamente;

$p_1.alt$ *e* $p_2.alt$: notação simplificada para os valores de altitude das posições de voo p_1 *e* p_2, respectivamente.

Dessa forma, a partir dos conjuntos *FP* e *LON,* realizando o procedimento acima para *todos* os valores de longitude *lon* pertencentes a *LON,* são obtidas as posições de voo normalizadas *NFP*, que como mencionado anteriormente, representam uma segunda amostragem da trajetória do voo em questão possuindo valores de longitude pertencentes ao conjunto *LON*.

3.4 Delimitação de aerovias

O processo de delimitação de aerovias visa produzir um conjunto finito de posições de voo *DELIM* que representará as aerovias conectando aeroportos de origem e destino. Em outras palavras, as aerovias como regiões contínuas no espaço aéreo são agora representadas por um conjunto finito de posições de voo pertencentes a estas regiões. O problema de delimitação de aerovias passa a ser: como identificar o conjunto de posições de voo *DELIM* a partir do conjunto de posições rastreadas e/ou normalizadas.

Seja *TRACK* o conjunto de todas as posições de voo rastreadas dos voos com aeroporto de origem *A* e aeroporto de destino *B*. Se estes voos *não* sofressem desvios de suas trajetórias do aeroporto *A* ao aeroporto *B* (seja devido à presença de células convectivas, seja devido a qualquer outro tipo de obstáculo), o conjunto *DELIM* poderia ser definido como $DELIM = TRACK$.Esta condição é realisticamente impossível de ser satisfeita para um número significativo de voos rastreados entre aeroportos *A* e *B* uma vez que desvios invariavelmente podem acontecer. No entanto, um subconjunto das posições de voo rastreadas *TRACK* ainda poderia ser utilizado para representar o conjunto *DELIM.*

Seja também *NORM* o conjunto de todas as posições normalizadas dos voos de aeroportos de origem *A* e destino *B*. O mesmo raciocínio desenvolvido anteriormente para *TRACK* pode ser

aplicado para *NORM* ao passo que também podemos representar o conjunto *DELIM* como um subconjunto de *NORM.* O processo de delimitação de aerovias consiste, então, em *filtrar* as posições de voo normalizadas *NORM* que são pertencentes ao conjunto *DELIM.* É utilizado o conjunto de posições normalizadas *NORM* em vez do conjunto de posições rastreadas *TRACK,* pois a partir daquela é possível remover as posições de voo não pertencentes a *DELIM,* também chamadas de *outliers,* com a utilização de algoritmos de *clustering.*

As posições de voo normalizadas *NORM* podem ser divididas em grupos de posições de voo que compartilham o mesmo valor de longitude. Estes grupos são chamados de partições, onde a quantidade de partições é a quantidade de elementos do conjunto *LON* de valores de longitude compartilhados entre posições de voo normalizadas *NORM.* Cada partição, representada por um valor de longitude $lon \in LON$ e composta por posições de voo normalizadas com mesmo valor de longitude $p_i'.longitude = lon$, pode ser subdividida em subgrupos, chamados de *clusters,* com a utilização de um algoritmo de *clustering.* As posições de voo que não pertencerem a nenhum *cluster* são chamadas de *outliers*. As posições de voo normalizadas pertencentes a algum *cluster* que compõem o conjunto *DELIM*, que é formado por todas estas posições de *todas* as partições disponíveis.

Na Figura 3 cada segmento de reta horizontal representa a trajetória de um voo do aeroporto de origem *A* ao aeroporto de destino *B* enquanto que os segmentos de reta verticais representam as partições obtidas. Os pontos em vermelho representam posições de voo rastreadas enquanto que os pontos em azul representam posições de voo normalizadas. As posições de voo normalizadas somente podem ser separadas em partições (segmento de reta vertical), que por sua vez, podem ser separadas em *clusters*, representados por *elipses* na figura. Como ilustrado na figura, a utilização de um algoritmo de *clustering* em cada partição faz a separação das posições de voo entre dois *clusters* e um *outlier.* As posições de voo pertencentes aos *clusters* são posições de voo pertencentes a *DELIM*, composto pela união dessas posições de voo normalizadas. A identificação de dois *clusters* na primeira e segunda partições *indica* a presença de duas aerovias conectando aeroportos *A* e *B.* No entanto, a quantidade de aerovias não é relevante para o método proposto já que o interesse é identificar as posições de voo de *DELIM* para o processo de intersecção entre aerovias e células convectivas.

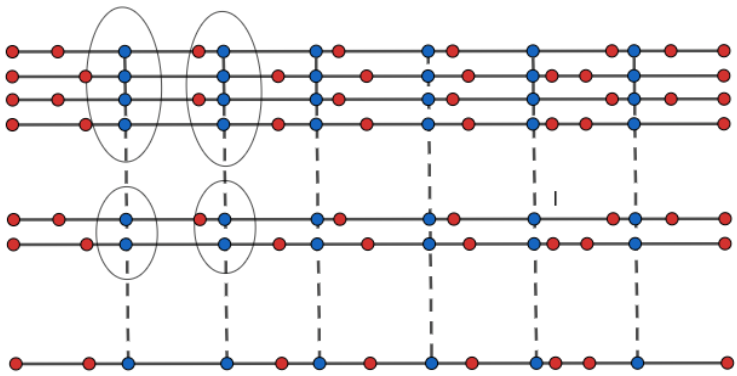

Figura 3: Representação do processo de delimitação de aerovias.

Vale ressaltar alguns pontos importantes do processo de delimitação de aerovias. Primeiramente, *qualquer algoritmo* de *clustering* pode ser utilizado para fazer a separação

entre em *clusters* de cada partição *desde que* possa fazer a separação entre dados pertencentes a *clusters* e *outliers*. Neste trabalho será utilizado um algoritmo de *clustering* baseado em densidade chamado *Density-Based Clustering Based on Connected Regions with High Density* (DBSCAN) (Ester *et al.*, 1996).

DBSCAN separa o conjunto de dados em regiões de alta densidade e de baixa densidade. Este algoritmo recebe como entrada dois parâmetros: ϵ responsável em definir a ϵ −*vizinhança* de um objeto e *min_pts* definido como o *threshold* que separa regiões de baixa e alta densidades (Han *et al.*, 2011). Dado um objeto qualquer, objetos que estão a uma distância menor ou igual a ϵ do objeto inicial fazem parte da ϵ −vizinhança deste objeto. Se a quantidade de objetos nesta vizinhança é maior ou igual a *min_pts*, *todos* os objetos desta vizinhança fazem parte de uma região de alta densidade. Dessa forma, o algoritmo de DBSCAN realiza a análise da ϵ −vizinhança de cada objeto a fim de separar objetos de regiões de alta densidade, que compõem *clusters,* de objetos de baixa densidade, classificados como *outliers* (Han *et al.*, 2011).

Um conceito diretamente utilizando pelo algoritmo de *clustering* é o conceito de distância entre dois objetos. A medida utilizada neste trabalho para se mensurar a distância entre duas posições de voo é a fórmula de *Haversine* (Veness, 2019). A fórmula de *Haversine* mede a distância entre dois pontos de uma esfera (neste caso a Terra é definida como uma esfera perfeita de raio igual a 6.371 km) a partir dos valores de latitude e longitude dos pontos em questão. Uma observação importante é que, apesar de estar sendo analisado a distância entre duas posições de voo, essa medida de distância não se limita somente a este caso específico. Como será visto na seção 3.4, a fórmula de *Haversine* também é utilizada para medir a distância entre uma posição de voo e uma célula convectiva.

3.5 Interseção entre aerovias e células convectivas

O processo de identificação de interseções entre células convectivas e aerovias utiliza os resultados obtidos durante o processo de delimitação de aerovias, isto é, as posições de voo pertencentes a clusters DELIM. As interseções entre células convectivas e aerovias são identificadas verificando se há interseções entre estas células e o conjunto de posições de voo DELIM. Isto é, se a distância entre qualquer uma dessas posições e uma célula convectiva é menor ou igual à medida do raio da célula convectiva, a célula convectiva em questão intersecta a aerovia que possui esta posição de voo em sua composição.

Para se medir a distância entre a célula convectiva e uma posição de voo normalizada pertencente a *DELIM* é utilizada a fórmula de *Haversine* (explicada na seção 3.3). A Equação 4 apresenta a condição que deve ser satisfeita para que ocorra uma interseção entre uma célula convectiva c e as aerovias conectando aeroportos A e B (representada pelas posições de voo pertencentes a *DELIM*, $p_j \in DELIM$):

$$haversine\ (p_i, p_j)\ \leq\ c.radius \tag{4}$$

em que $haversine$: função que implementa a fórmula de *Haversine*;
c: célula convectiva definida por $(c.longitude, c.latitude, c.radius)$;
p_i: posição geográfica da célula convectiva $p_i = (c.longitude, c.latitude)$;
$c.radius$: raio da célula convectiva;
p_j: posição de voo qualquer de *DELIM*.

Procedendo a operação acima para todos os *pares* de células convectivas e posições de voo pertencentes a *DELIM*, são encontradas todas as células convectivas que *intersectam* as aerovias no espaço aéreo que conectam aeroporto de origem *A* e aeroporto de destino *B*.

4. ESTUDO DE CASO E SUA ANÁLISE

No estudo de caso, uma aplicação foi implementada segundo a arquitetura proposta na seção 3. A plataforma *OpenSky Network* de redes distribuídas de receptores ADS-B (OPENSKY NETWORK, 2019) é a fonte de dados utilizada para rastreamento de voos enquanto que o STSC (REDEMET, 2019d) é utilizado para rastreamento de posições de células convectivas.

Na pesquisa original, foram escolhidos como estudo de caso os principais aeroportos brasileiros. Será apresentado o trecho com aeroporto de origem *Presidente Juscelino Kubitschek* (Brasília) e aeroporto de destino Congonhas (São Paulo). Escolhi Brasília e Congonhas por dois motivos: 1) são cidades distantes o suficiente uma da outra (o que facilita na delimitação de aerovias entre as duas cidades) e 2) possuem voos recorrentes entre as duas cidades, e por consequência, mais dados estão disponíveis. Entre 05 de maio de 2019 e 27 de maio de 2019, foram rastreadas 48.346 posições de voo no trecho Presidente JK-Congonhas. Também, entre 03 de maio de 2019 e 13 de maio de 2019, foram rastreadas um total de 69 células convectivas na região delimitada pelos aeroportos Presidente JK e Congonhas. Os parâmetros utilizados nos processos da arquitetura proposta são listados a seguir:

- **Normalização de posições de voo**: o parâmetro *LONDIST* que representa a distância entre partições foi definido como $LONDIST = 0{,}03º$;
- **Delimitação de aerovias**: os parâmetros de entrada ϵ e *min_pts* para o algoritmo de *clustering* DBSCAN foram definidos como $\epsilon = 100\ (em\ metros)\ e\ min_pts = 25$.

Os resultados e discussões relativas ao *cenário de teste Presidente JK-Congonhas* são apresentados nas subseções seguintes segundo cada processo da arquitetura proposta.

4.1 Normalização de posições de voo

A partir do conjunto de posições de voo rastreadas *TRACK*, onde $\#TRACK = 48.346$, o processo de normalização produziu o conjunto de posições de voo normalizadas *NORM*, em que $\#NORM = 28.809$. As Figura 4 e 5 mostram as posições de voo normalizadas do voo *TAM3173* (em 21-05-2019 às 06:14) segundo suas latitudes e longitudes e suas altitudes, respectivamente (onde a seta apontando à direita representa o aeroporto de origem, a seta à esquerda o aeroporto de destino, os pontos em vermelho representam as posições de voo rastreadas enquanto que os pontos em azul posições de voo normalizadas).

Das Figura 4 e 5, é possível constatar que existem *pontos cegos* no processo de rastreamento de aeronaves, onde não foi possível determinar suas posições de voo. Isso se deve à qualidade dos dados que são fornecidos pela plataforma de redes distribuídas de receptores ADS-B utilizada. Como se pode observar, o processo de normalização estima novas posições de voo que acompanham a trajetória das posições de voo rastreadas sem reduzir ou aumentar significativamente a quantidade de posições inicialmente rastreadas (a quantidade de posições normalizadas representa aproximadamente 60% a quantidade de posições rastreadas).

4.2 Delimitação de aerovias

Nas figuras 4, 5 e 6, o que parecem retas (azul e vermelha) é o efeito da sobreposição de diversos pontos (azuis e vermelhos), que indicam a posição geográfica das aeronaves (figuras

4 e 5) e a delimitação de suas rotas aéreas (figura 6). A Figura 6 mostra os resultados obtidos pelo processo de delimitação de aerovias, onde a seta apontando à direita representa o aeroporto de origem, a seta à esquerda o aeroporto de destino e os pontos em vermelho representam as posições de voo pertencentes ao conjunto *DELIM*.

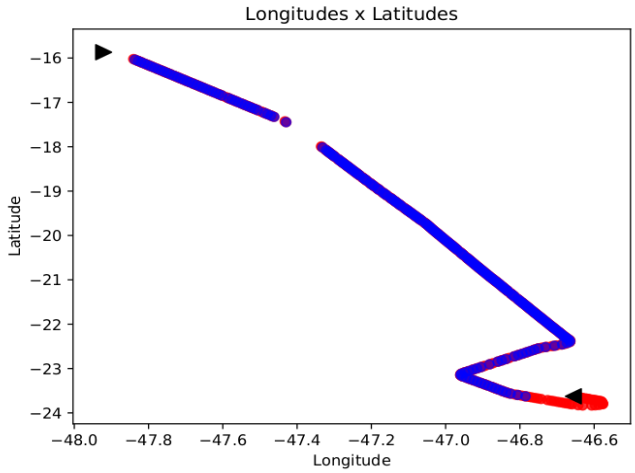

Figura 4: Posições do voo *TAM3173* em longitudes e latitudes.

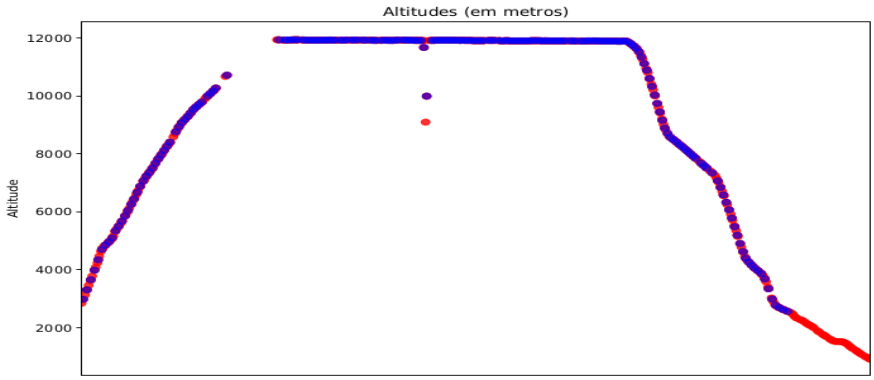

Figura 5: Altitudes das posições do voo *TAM3173* ao longo do tempo.

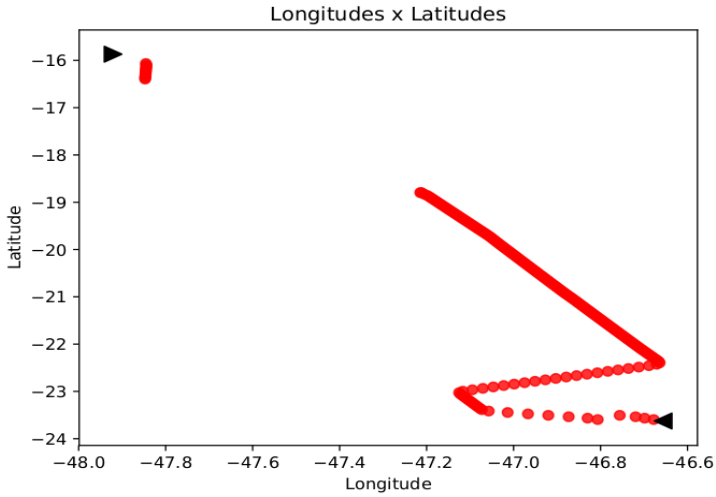

Figura 6: Aerovia resultante do processo de delimitação de aerovias.

As posições de voo pertencentes a *DELIM*, ilustradas na Figura 6, são compatíveis com a

trajetória percorrida pelo voo *TAM3173* (e também os outros voos que sobrevoaram o mesmo trecho), ilustrado na Figura 4. O algoritmo DBSCAN em conjunto com a seleção de seus parâmetros de entrada foram capazes delimitar as fronteiras das aerovias do trecho *Presidente JK-Congonhas* com sucesso. Também é possível identificar *pontos cegos*, que da mesma forma que o processo de normalização, foram obtidos da falha do processo de rastreamento.

4.3 Interseção entre aerovias e células convectivas

Uma vez finalizado o processo de delimitação de aerovias, é possível monitorar as interseções entre as células convectivas rastreadas e as aerovias resultantes do processo anterior. Das 69 células convectivas rastreadas na região que delimita os aeroportos Presidente JK e Congonhas, apenas 5 células convectivas resultaram numa interseção com as aerovias obtidas, o que representa aproximadamente 7% do total. Uma observação importante é que a quantidade de células convectivas, e consequentemente suas interseções com aerovias, varia com a época do ano uma vez que células convectivas estão diretamente relacionadas com épocas de chuva.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Gerenciamento de Tráfego Aéreo, dependendo das condições meteorológicas no momento do voo, situações atípicas podem acontecer como: aeronaves podem ser obrigadas a desviar de suas rotas aéreas pré-determinadas (aerovias), aeronaves podem ser redirecionadas para pouso em outro aeroporto, voos podem ser cancelados, aeroportos podem ser fechados por um determinado período, etc. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta um sistema de suporte voltado ao planejamento de voo sob condições meteorológicas adversas. Após a conclusão do presente trabalho, é possível listar de forma objetiva as contribuições do estudo realizado, dentre elas estão:

- Proposição de uma metodologia computacional para o problema de planejamento de voo sob condições meteorológicas adversas;
- Desenvolvimento de uma arquitetura segundo a metodologia proposta, que possui como componentes: rastreamento de posições de voo, normalização de posições de voo, delimitação de aerovias através da utilização de algoritmos de clustering, rastreamento de células convectivas, e interseção entre aerovias e células convectivas;
- Desenvolvimento de um sistema seguindo a arquitetura proposta com a implementação dos componentes projetados; sistema configurável segundo os modelos e parâmetros utilizados;
- Identificação de modelos e parâmetros ótimos para os componentes da arquitetura proposta através da comparação das simulações realizadas a partir dos diversos experimentos em diferentes cenários de teste, onde se chegou à conclusão.

Os resultados obtidos no estudo de caso são promissores, na medida em que foi possível: 1) delimitar as fronteiras das aerovias conectando determinados aeroportos através de transformações feitas em posições de voo inicialmente rastreadas (processos de normalização de posições de voo e de delimitação de aerovias); e 2) encontrar interseções entre células convectivas no espaço aéreo e as aerovias geradas nas etapas anteriores.

No entanto, foram percebidas limitações do processo de rastreamento utilizado, onde os resultados finais dependem diretamente da qualidade das posições de voo rastreadas. Assim sendo, a efetiva utilização do sistema concebido requer o aperfeiçoamento da solução proposta, como a utilização de uma melhor fonte para rastreamento de dados, a revisão das

limitações encontradas na arquitetura proposta, etc., de forma a auxiliar à tomada de decisões no planejamento de voo sob condições meteorológicas adversas. Além do mais, a utilização de outros algoritmos de *clustering* no processo de delimitação de aerovias no espaço aéreo também é interessante para fins de comparação com o método DBSCAN.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Canino-Rodríguez, J. M.; J. G. Herrero, J. A. B. Portas; A. G. Ravelo-García, C. M. Travieso-González e J. B. A. Hernández; (2015): Human computer interactions in next-generation of aircraft smart navigation management systems: Task analysis and architecture under an agent-oriented methodological approach. Sensors, 15(3):5228–5250, https://doi.org/10.3390/s150305228.

DECEA (2019a) Qual distância mínima um avião deve manter ao voar acima de outro? - DECEA. https://www.decea.gov.br/blog/?tag=aerovia.

DECEA (2019b) Highways do céu: por dentro do fantástico mundo das aerovias - DECEA. https://www.decea.gov.br/blog/?p=319.

DECEA (2019c) Vigilância Aérea - DECEA. https://www.decea.gov.br/?i=atividades&p=vigilancia-aerea.

DECEA (2019d) Entenda os benefícios do ADS-B, sistema de vigilância aérea a ser utilizado em breve no País - DECEA. https://www.decea.gov.br/blog/?p=418.

Ester, M.; H. P. Kriegel; J. Sander; X. Xu; (1996) A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96), vol. 96, no. 34, pp. 226-231.

Han, J.; M. Kamber e J. Pei (2011) Data Mining: Concepts and Techniques. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.

OPENSKY NETWORK (2019) OpenSky Network. https://opensky-network.org/.

Phillips, G. M. (2003) Interpolation and Approximation by Polynomials. Springer-Verlag, New York.

REDEMET (2019a) Sistema de Tempo Severo Convectivo. https://www.redemet.aer.mil.br/stsc/public/produto#.

Girardet, B.; L. Lapasset; D. Delahaye, C. Rabut e Y. Brenier; (2013) Generating optimal aircraft trajectories with respect to weather conditions. Em ISIATM 2013, 2nd International Conference on Interdisciplinary Science for Innovative Air Traffic Management, Toulouse, France, 2013.

Majumder, S.; M. S. Prasad; (2016) Flight path optimization based on obstacles and weather updates. Em 2016 3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), pp. 425–430, 2016.

Cheung, Jacob C. H.; (2018) Flight planning: node-based trajectory prediction and turbulence avoidance. Meteorological Applications, 25(1):78–85, 2017, ISSN 1469-8080. http://dx.doi.org/10.1002/met.1671.

REDEMET (2019b) Cúmulo-Nimbo. https://www.decea.gov.br/sirius/index.php/2011/06/14/cb-cumulo-nimbo/.

REDEMET (2019c) Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica. https://www.redemet.aer.mil.br/.

REDEMET (2019d) Sistema de Tempo Severo Convectivo. https://www.redemet.aer.mil.br/index.php?i=produtos&p=descargas-atmosfericas.

Schilke C. e P. Hecker (2014) Dynamic route optimization based on adverse weather data. Proceedings of the SESAR innovation days (SIDs 2014). https://www.sesarju.eu/sites/default/files/SID_2014-13.pdf.

Veness C. (2019) Calculate distance and bearing between two Latitude/Longitude points using haversine formula in JavaScript. https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html.

[1]Iuri Souza Ramos Barbosa (iuri.srb@gmail.com),
[1]Li Weigang (weigang@unb.br),
[2]Yaeko Yamashita (yaekoyamashita@gmail.com),
[1]Departamento de Ciência da Computação, Universidade de Brasília,
[2]Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília,
Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte - Brasília, DF, Brasil.