

Universidade Federal do Ceará  
Campus de Quixadá  
Curso de Sistemas de Informação

Avaliação de Desempenho de Algoritmos de Previsão  
de Colisão Entre Aeronaves em Espaço Aéreo

Projeto de Pesquisa

Felipe da Silva Pinho

Orientador:  
Arthur de Castro Callado

Quixadá  
Julho, 2016

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
3.1	Objetivo Geral	4
3.2	Objetivos específicos	4
<b>4</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>4</b>
4.1	Monitoramento Aéreo Brasileiro	4
4.2	Radares	5
4.3	Tecnologia ADS-B	6
4.4	Análise e Detecção de Colisão em Grande Escala	6
4.4.1	Primeira Solução: Raio Mínimo com Memorização	7
4.4.2	Segunda Solução: Divisão do Espaço Aéreo em Áreas	8
<b>5</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>9</b>
5.1	Revisão bibliográfica	9
5.2	Estudar os algoritmos e definir os objetivos	9
5.3	Determinar os resultados oferecidos pelo experimento	10
5.4	Selecionar métricas de avaliação e fatores	10
5.5	Realizar a avaliação e obter os resultados	10
5.6	Analisar e interpretar os resultados	10
5.7	Cronograma de Execução	10
<b>6</b>	<b>RESULTADOS ESPERADOS</b>	<b>11</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>12</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Administração Federal de Aviação dos Estados Unidos (FAA) está evoluindo para a próxima geração de sistemas de transporte aéreo com uma atualização completa de seus sistemas e tecnologias visando reduzir os atrasos, economizar combustível, diminuir a emissão de carbono e aumentar a segurança dos voos. Essa iniciativa integra novas e existentes tecnologias, incluindo a navegação por satélite e comunicações digitais avançadas (FAA, 2015).

Essa necessidade de ampla atualização surge por ainda se operar mundialmente com vários sistemas e técnicas de monitoramento aéreo ultrapassados. As atuais tecnologias para evitar colisões entre aeronaves, por exemplo, estão se tornando inadequadas. O sistema mais comum para esse fim, Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS), foi desenvolvido há bastante tempo e não é capaz de acompanhar as métricas previstas para a nova geração. É necessário, portanto, que algumas tecnologias sejam revistas e novas soluções sejam adotadas (CHAMLOU; LOVE; MOODY, 2008).

A decisão para a implementação do TCAS foi anunciada em 23 de Junho de 1981. O sistema consiste em três elementos: TCAS I, TCAS II e TCAS III. O sistema TCAS I, primeira geração da tecnologia, monitora o tráfego ao redor da aeronave em um raio de 65 km e oferece informações de direção e altitude de outras aeronaves. Esta versão oferece ao piloto alertas de colisão na forma Traffic Advisory (TA), que emite um alerta sonoro sobre a proximidade de outra aeronave. Cabe ao piloto a resolução do conflito. O TCAS II, usado na maioria dos equipamentos da aviação comercial atual, opera de forma sincronizada entre as aeronaves fornecendo sugestões de mudança de rota aos pilotos para evitar a colisão. O sistema TCAS III se encontra em desenvolvimento e fará parte da nova geração de sistemas, permitindo aos pilotos manobras horizontais, além das verticais presentes nas outras versões (WILLIAMSON; SPENCER, 1989).

Colisões entre aeronaves são um grande problema para os sistemas de monitoramento aéreo. Segundo o Escritório de Registros de Acidentes Aéreos<sup>1</sup> (ACRO), no período de 1918 até 2016 foram registrados 23.670 acidentes aéreos com 146.726 mortes, dos quais 7.625 foram causados por falha humana. Isso tende a se agravar com o aumento do tráfego de aeronaves de pequeno porte, Very Light Aircrafts (VLA), pertencentes a empresas pequenas e que operam em aeroportos secundários. Um tráfego aéreo mais denso traz a necessidade de sistemas e algoritmos mais robustos, que possam gerenciar muitas aeronaves simultaneamente.

Os algoritmos computacionais mais comuns para esse propósito são formulados como problemas de otimização e a convergência para uma solução não é garantida em um intervalo de tempo finito e determinístico. Isso significa que o algoritmo se comporta de

---

<sup>1</sup> <http://www.baaa-acro.com>

formas diferentes para uma mesma situação de entrada de dados e não é possível prever seu tempo de execução, comportamento exigido por um sistema de controle em tempo real (CARBONE *et al.*, 2006).

No Brasil não é diferente. Sistemas antigos ainda operam no país, embora já existam alternativas mais baratas e confiáveis. Grande parte do nosso sistema de monitoramento aéreo ainda é baseado em radares. Assim, a eficiência do monitoramento é sujeita a falhas e a prevenção contra colisão de aeronaves é potencialmente problemática.

Para auxiliar o sistema aéreo brasileiro a acompanhar os avanços tecnológicos da FAA, um grupo de pesquisa da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Quixadá está desenvolvendo o Sistema de Monitoramento do Espaço Aéreo Radar Livre<sup>2</sup>, uma solução mista de hardware e software baseada na tecnologia Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B). Trata-se de uma tecnologia moderna e acessível desenvolvida para auxiliar o atual sistema baseado em radares no monitoramento de aeronaves civis. O sistema já conta com alguns de seus módulos em funcionamento, como a coleta de dados de aeronaves, um banco de dados online com as informações coletadas e um site, onde as mesmas podem ser acessadas. Dentre suas propostas, destaca-se o desenvolvimento de um sistema de previsão de colisão entre aeronaves e entre aeronaves e acidentes geográficos.

Além de um algoritmo de detecção de colisão eficaz e eficiente, o sistema necessita de alternativas para aplicá-lo em grande escala, ou seja, com milhares de aeronaves simultaneamente. O presente trabalho nasce com o intuito de propor e avaliar o desempenho de soluções para aplicação em grande escala de um algoritmo de detecção de colisão entre aeronaves no espaço aéreo, o qual fará parte do futuro sistema de previsão de colisão do sistema de monitoramento Radar Livre.

## 2 TRABALHOS RELACIONADOS

Em seu trabalho, Carbone *et al.* (2006) apresentam um algoritmo para detecção e tratamento de colisões utilizando-se de geometria tridimensional. O mesmo é apresentado como uma alternativa aos algoritmos existentes até então, que não operavam rápido o suficiente. No método, as aeronaves são tratadas como vetores tridimensionais. Uma das aeronaves, considerada como um referencial, é o centro de uma esfera que define um volume de segurança em torno da mesma. Se uma outra aeronave cruzar essa fronteira, estará na iminência de uma colisão. Por ser simples e direto, o algoritmo pode ser executado rapidamente adequando-se a aplicações de tempo real. O método não considera, no entanto, possíveis variantes na orientação e velocidades das aeronaves, o que o torna pouco preciso.

<sup>2</sup> Ressalta-se que o sistema possui coletores em funcionamento apenas no estado do Ceará, os quais capturam dados de uma pequena quantidade de aeronaves diariamente. O site do sistema Radar Livre está disponível em [www.radarlivre.com](http://www.radarlivre.com)

Gariel, Kunzi e Hansman (2011) apresentam uma solução que considera variantes de orientação e velocidade da aeronave, além de protocolos que determinam o funcionamento dos alertas aos pilotos. Por considerar mais variantes, esse algoritmo é mais complexo e seu processamento é menos eficiente que o de Carbone *et al.* (2006). A solução de Gariel, Kunzi e Hansman (2011), no entanto, produz resultados mais precisos e portanto, foi a escolhida para este trabalho.

Os dois algoritmos focam no conflito de duas aeronaves em particular, não abordando o problema de análise de colisão entre vários aviões de forma rápida e escalável. Este trabalho se diferencia por analisar o desempenho do algoritmo de Gariel, Kunzi e Hansman (2011) em grande escala, ou seja, envolvendo centenas ou até milhares de aeronaves simultaneamente.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Geral**

Avaliar o desempenho de duas soluções para aplicação em grande escala do algoritmo de previsão de colisão selecionado.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- a) Selecionar em trabalhos existentes um algoritmo para detecção de colisão entre aeronaves no espaço aéreo, o qual fará parte do sistema Radar Livre.
- b) Formular duas alternativas para utilização do algoritmo escolhido em grande escala, visto que o sistema irá monitorar uma grande quantidade de aeronaves simultaneamente.
- c) Fazer uma avaliação de desempenho das soluções apresentadas.

### **4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **4.1 Monitoramento Aéreo Brasileiro**

Próximo aos aeroportos, os aviões são monitorados visualmente pelos controladores de voo e por radares auxiliares. Após cerca de 10 quilômetros, a aeronave passa a ser monitorada por radares de controle de aproximação (APP), que garantem uma distância mínima entre as aeronaves e previnem possíveis colisões. Fora do alcance do APP, a aeronave passa a ser monitorada pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), até chegar ao seu destino. (DECEA, 2015).

O DECEA tem por objetivo gerenciar as atividades no espaço aéreo brasileiro. Sua estrutura conta com quatro Centros Integrados de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA). A unidade CINDACTA I é responsável pelo espaço aéreo do Distrito Federal, Goiás, parte do Mato Grosso e Região Sudeste; a unidade CINDACTA II é responsável pela Região Sul, Mato Grosso do Sul e parte sul e oeste de São Paulo; a unidade CINDACTA III é responsável pela Região Nordeste, parte de Minas Gerais, parte do Tocantins e área oceânica que separa o Brasil da África e da Europa; e a unidade CINDACTA IV se responsabiliza pela Região Amazônica. O DECEA também conta com três subdepartamentos de supervisão, um Serviço Regional de Proteção ao Voo (SRPV), cinco Centros de Controle de Área (ACC), 47 Controles de Aproximação (APP), 59 Torres de Controle de Aeródromo (TWR), 79 Destacamentos de Controle do Espaço Aéreo (DTCEA), além das mais de 90 Estações de Telecomunicações Aeronáuticas e diversas divisões de apoio por todo o País (DECEA, 2015).

## 4.2 Radares

Quando estão fora do alcance dos controladores de voo, as aeronaves são monitoradas por radares. Estes aparelhos são divididos em dois tipos: os primários e os secundários. Os radares primários emitem ondas eletromagnéticas à atmosfera que retornam ao refletirem em algum obstáculo. Através da medição do tempo de ida e volta das ondas, pode-se medir a distância e posição do objeto. No entanto, radares primários não capturam dados de altitude e elevação. Os radares secundários funcionam enviando mensagens às aeronaves, que respondem com informações da posição, velocidade, altitude, etc. Para isso, é necessário que a aeronave tenha um transreceptor (aparelho capaz de receber e enviar mensagens). Caso o avião não possua esse aparelho, o radar secundário será incapaz de encontrá-lo. Muitas aeronaves em funcionamento não possuem um transreceptor a bordo e, portanto, não são identificadas por radares secundários. Assim, a maioria dos aeroportos são equipados com os dois tipos de radar (SMAAL, 2010).

Radares ainda são largamente utilizados, mas são aparelhos caros e, apesar de cumprirem bem o seu trabalho, barreiras físicas e condições atmosféricas desfavoráveis podem atrapalhar seu funcionamento. A atualização do posicionamento do avião ocorre apenas a cada 30 segundos, o que dificulta a eficiência na prevenção contra acidentes e leva à necessidade de se dispor de um método de monitoramento aéreo mais confiável e acessível. Para resolver tais problemas do sistema atual de monitoramento aéreo, foi criado o sistema CNS/ATM (Comunicação, Navegação, Vigilância e Gerenciamento de Tráfego Aéreo), que usa a tecnologia ADS-B para o compartilhamento de informações das aeronaves.

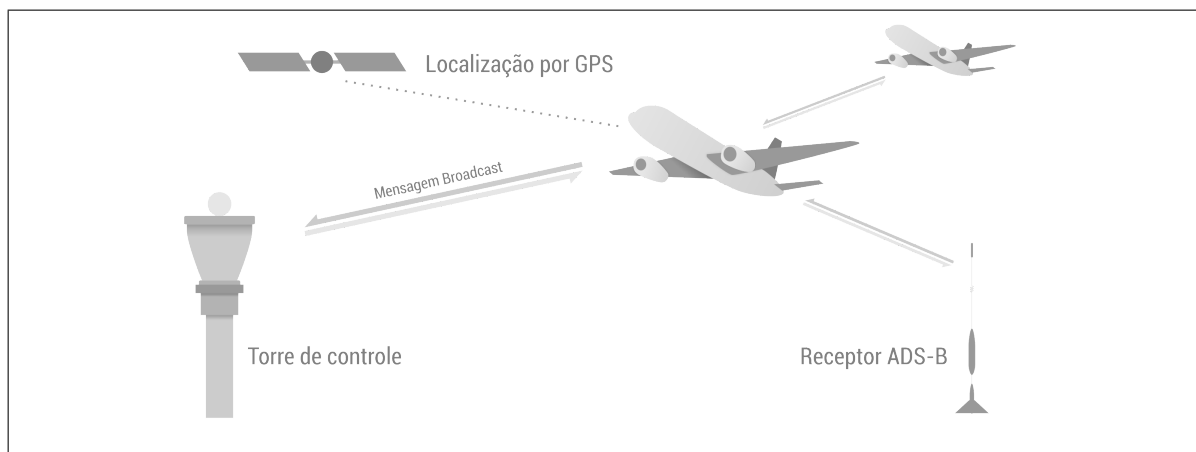
### 4.3 Tecnologia ADS-B

O sistema CNS/ATM pretende dar fim aos complexos e caros sistemas baseados em radares, substituindo-os pela a tecnologia de Vigilância Segura Automática por Radiodifusão (ADS-B).

A tecnologia ADS-B baseia-se em sistemas modernos de geolocalização para detecção do posicionamento das aeronaves. Após serem coletados, os dados da aeronave são codificados em mensagens de 112 bits em formato hexadecimal e enviados em um intervalo configurável entre 0,5 e 2 segundos em todas as direções. As mensagens podem ser coletadas e propagadas por outras aeronaves, receptores posicionados no solo ou torres de controle, desde que possuam um receptor ADS-B. Mesmo que uma aeronave esteja distante de qualquer torre de controle, suas mensagens serão propagadas por outras aeronaves até chegar em algum receptor. Dessa forma, esse formato de compartilhamento aumenta consideravelmente o alcance e a precisão do monitoramento.

Apesar de ser mais barata e simples, a tecnologia ADS-B é totalmente dependente do bom funcionamento dos sistemas de geolocalização, o que os tornam elementos críticos do sistema.

Figura 1 – Funcionamento do compartilhamento de mensagens ADS-B



Fonte: Elaborada pelo autor

### 4.4 Análise e Detecção de Colisão em Grande Escala

Segundo o site Flightradar<sup>3</sup>, onde podemos acompanhar aeronaves em tempo real, às 9h30min do dia 24 de Maio de 2016 eram registradas pouco mais de 12.500 aeronaves em funcionamento ao redor do mundo. Uma aeronave está segura se e apenas se não estiver em rota de colisão com qualquer outra, o que nos força a analisar todas as possibilidades de

<sup>3</sup> [www.flightradar24.com](http://www.flightradar24.com)

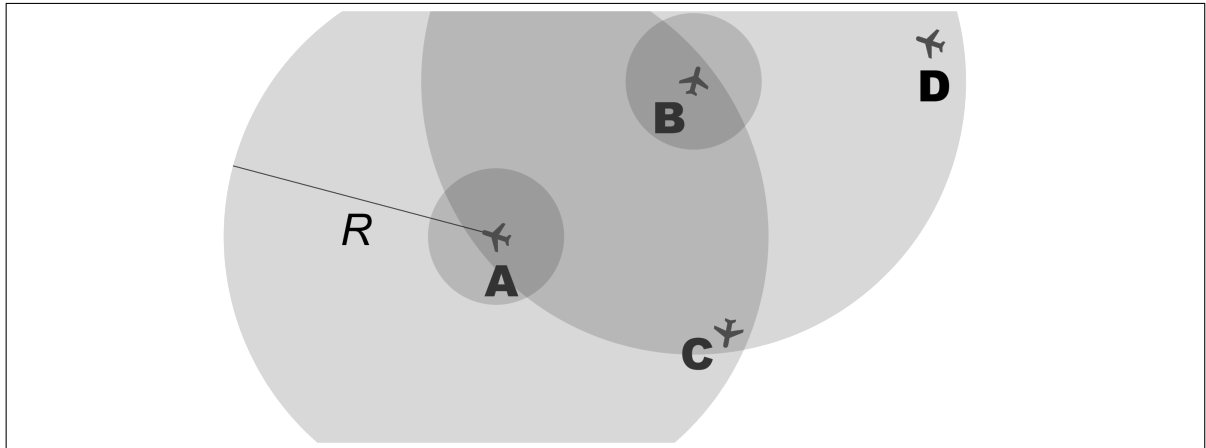
colisão. Em um espaço aéreo pequeno cruzado por três aviões A B e C, por exemplo, para detectar com segurança todas as possíveis colisões seria necessário analisar um possível conflito entre os aviões A e B, entre B e C e entre A e C, totalizando 3 verificações. Em uma espaço aéreo com 12.500 aeronaves, seriam necessárias 78.118.750 verificações. Se considerarmos que para se ter um monitoramento preciso devemos atualizar todas as previsões a cada 2 segundos, e que em média 12.500 aeronaves sobrevoam simultaneamente a qualquer hora, chegaremos a 337.730.000.000 verificações diárias e o problema de escalabilidade fica claro. É necessário, no entanto, uma análise de desempenho para avaliar precisamente o custo computacional necessário, e se o tempo de processamento é adequado a uma aplicação de tempo real. A seguir, são apresentadas duas soluções para utilização do algoritmo em larga escala, que serão avaliadas neste trabalho.

#### 4.4.1 Primeira Solução: Raio Mínimo com Memorização

Utilizando uma técnica de Raio Mínimo com Memorização, cada aeronave será processada pelo algoritmo. Na Fig. 2, durante o processamento da aeronave *A*, por exemplo, a mesma receberá o nome de *centro* e será considerada o centro de um círculo de raio *R*. O valor de *R* não está decidido, e sua especificação não fará parte deste trabalho. Qualquer aeronave que esteja dentro do círculo definido, ou seja, toda aeronave *X* tal que a distância entre *X* e *A* seja menor que *R*, será uma possível interceptadora de *A*, e será chamada de *invasora*. Toda aeronave *centro* será analisada em relação a todas as suas potenciais *invasoras* em busca de possíveis colisões. A aeronave *A* será analisada em relação a *B* e *C*, pois estão dentro de seu raio de alcance. A aeronave *invasora D*, no entanto, não será verificada agora, pois é considerada distante demais, e uma colisão é bastante improvável a médio prazo. Mais tarde, quando *B* for a aeronave *centro*, será analisada em relação às aeronaves *A*, *C* e *D*, que estão em seu raio de alcance. Ressalta-se que a verificação das aeronaves *A* e *B* será feita duas vezes, uma quando *A* for o centro, e a segunda quando *B* for o centro. Para que isso não aconteça, será utilizada uma técnica de memorização em que todos os resultados serão armazenados. Assim, quando a verificação entre *A* e *B* for realizada pela segunda vez, usará o resultado da primeira, evitando refazer todos os cálculos.



Figura 2 – Demonstração da solução Raio Mínimo com Memorização



Fonte: Elaborada pelo autor

Esta solução diminui o tempo de execução da aplicação, pois o algoritmo é aplicado apenas a aeronaves vizinhas. Entretanto, a simples verificação de distância entre os aviões deve ser realizada em todos os pares de aeronaves possíveis, o que nos leva novamente ao problema de complexidade do algoritmo.

#### 4.4.2 Segunda Solução: Divisão do Espaço Aéreo em Áreas

A segunda solução é semelhante a primeira, no sentido de que seu objetivo é não realizar verificações desnecessárias de aeronaves que estão muito distantes. Mas, nesse caso, o espaço aéreo será dividido em áreas, como pode ser visto na Fig 3, e apenas os aviões de cada área serão relacionados entre si nas verificações. Com isso surge um problema com as aeronaves que estiverem nas bordas dessas áreas. Duas aeronaves em áreas vizinhas que estiverem próximas da borda podem estar em rota de colisão sem que sejam verificadas pelo algoritmo. Isso pode ser resolvido se as áreas tiverem uma região de intersecção com as vizinhas. A decisão do tamanho adequado das áreas e regiões de intersecção não fazem parte deste trabalho.

Figura 3 – Demonstração da solução Divisão do Espaço Aéreo em Áreas



Fonte: Elaborada pelo autor

Embora também evite cálculos desnecessários, a segunda solução exige que todas as aeronaves sejam verificadas e classificadas nas respectivas áreas, o que pode exigir um custo computacional extra.

## 5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os passos a serem seguidos neste trabalho estão listados abaixo.

### 5.1 Revisão bibliográfica

Neste trabalho, buscamos avaliar duas soluções de escalabilidade para aplicação de um algoritmo de detecção de colisão, ou seja, com várias aeronaves simultaneamente. O algoritmo escolhido é apresentado no trabalho de Gariel, Kunzi e Hansman (2011). As palavras-chave utilizadas na pesquisa para selecionar o algoritmo e conhecer mais sobre o tema são: monitoramento aéreo, detecção de colisão de aeronaves no espaço aéreo, tecnologia ADS-B.

### 5.2 Estudar os algoritmos e definir os objetivos

Com base no estudo do algoritmo, foram apresentadas duas soluções para aplicação do mesmo em grande escala que serão utilizadas no experimento. As soluções são: *Raio Mínimo com Memorização* e *Divisão do Espaço Aéreo em Áreas*, ambas detalhadas anteriormente.



## 6 Resultados Esperados

O algoritmo selecionado e uma das duas soluções de escalabilidade farão parte do módulo de detecção de colisão do sistema de monitoramento aéreo Radar Livre. Após a análise de desempenho, poder-se-á calcular precisamente os recursos de hardware e software necessários para a execução do algoritmo sob as duas soluções. Espera-se, que uma destas apresente um consumo de recursos em níveis adequados ao sistema. É necessário, por exemplo, que o consumo de memória RAM seja moderado, pois este é um recurso caro e uma grande necessidade de memória tornaria o sistema inviável. Outra métrica importante a se considerar é o tempo de execução do algoritmo, o qual deve se adequar a um sistema de tempo real. Caso nenhuma das soluções se mostre viável para o sistema, será necessária a formulação de outras que se adequem às métricas exigidas pelo sistema. Este trabalho se propõe a analisar as soluções propostas anteriormente.

## REFERÊNCIAS

- CARBONE, C.; CINIGLIO, U.; CORRARO, F.; LUONGO, S. A novel 3d geometric algorithm for aircraft autonomous collision avoidance. **Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control**, IEEE, San Diego, CA, p. 1580 – 1585, dez. 2006. ISSN 0191-2216. Acessado em: 10 abr. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4177282>>.
- CHAMLOU, R.; LOVE, W. D.; MOODY, C. Exploration of new algorithms for airborne collision detection and avoidance to meet nextgen capabilities. **2008 IEEE/AIAA 27th Digital Avionics Systems Conference**, IEEE, St. Paul, MN, p. 2.D.5-1 – 2.D.5-13, out. 2008. ISSN 2155-7195. Acessado em: 3 abr. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4702789>>.
- DECEA. **Departamento de Controle do Espaço Aéreo**. 2015. Página WEB. Acessado em: 11 mai. 2016. Disponível em: <[www.decea.gov.br](http://www.decea.gov.br)>.
- FAA. **Office of NextGen**. 2015. Página WEB. Acessado em: 20 mai. 2016. Disponível em: <[www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ang](http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ang)>.
- GARIEL, M.; KUNZI, F.; HANSMAN, R. J. An algorithm for conflict detection in dense traffic using ads-b. **Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2011 IEEE/AIAA 30th**, IEEE, Seattle, WA, p. 4E3-1 – 4E3-12, out. 2011. ISSN 2155-7195. Acessado em: 10 abr. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6095916>>.
- SMAAL, B. **Tecnologia no controle de tráfego aéreo**. 2010. Página WEB. Acessado em: 20 mai. 2016. Disponível em: <<http://www.tecmundo.com.br/3908-tecnologia-no-controle-de-trafego-aereo.htm>>.
- WILLIAMSON, T.; SPENCER, N. A. Development and operation of the traffic alert and collision avoidance system (tcas). **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 77, p. 1735

– 1744, nov. 1989. ISSN 0018-9219. Acessado em: 10 mai. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=47735>>.