



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Faculdade de Engenharia

Departamento de Ciências Aeroespaciais

**Prevenção de Colisões Aéreas Baseada no
Controlo Preditivo Pseudo-espectral**

Paulo Machado

Tese para obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Aeronáutica
(3º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Kouamana Bousson

Covilhã, Julho de 2014

Aos meus pais, António Machado e Ilza Machado

Agradecimentos

Talvez o espaço destinado a este item seja demasiadamente exíguo para conter aquilo que seriam todos os agradecimentos merecidos e devidos a todos, que de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente, para a elaboração deste trabalho nos últimos quatro anos. Sabendo de antemão a injustiça de não referir todos aqueles que desejaria, agradeço a todos os que privaram comigo através de conversas, reflexões, discussões e argumentações.

No entanto, penso que seja um imperativo referir alguns devidos agradecimentos naqueles que tiveram uma participação mais estrita na realização deste trabalho. Assim é merecido todo o meu agradecimento à Universidade da Beira Interior que de há uns anos a esta parte me acolheu, e que de forma transversal, desde funcionários a professores e aqui especialmente ao Departamento de Ciências Aeroespaciais e ao LAETA, que nunca deixaram de prestar o seu auxílio.

Todavia, a dedicação exclusiva ao trabalho aqui apresentado só possível, devido ao financiamento da FCT, a esta não só agradeço o financiamento mas também a amabilidade e prontificação dos seus funcionários em esclarecer e solucionar qualquer dúvida ou problema.

Chegado o momento de agradecer aos meus pais, não fazendo disto uma pró-forma antes sim um imperativo, por mais esforços e eloquentes reflexões na tentativa de dirigir-lhes um agradecimento, este será sempre inglório e insignificante, na medida em que nunca conseguirei reunir uma semântica suficientemente expressiva para lhes simplesmente dizer o quanto agradecido lhes estou por serem meus pais.

À minha namorada, amiga e companheira, Vanessa Carvalho, que está e esteve comigo nestes anos, não só lhe agradeço apenas pelo facto de laboriosamente me ajudar a rever o trabalho, mas também ter partilhado comigo alegrias, tristezas e que incondicionalmente apoiou-me em todos as minhas decisões, a ela um imensurável beijo de gratidão.

Por fim, como é normal nestas coisas, diz o protocolo que deve se agradecer ao orientador. Porém, não é por força de nenhum protocolo, e nem de longe nem de perto que este agradecimento será meramente formal. Ao Prof. Bousson, tenho realmente de lhe prestar todo o meu agradecimento pois, de uns anos a esta parte, tem-me introduzido aquilo que hoje é uma das minhas grandes paixões e que talvez será uma das minhas maiores perdições, a matemática ou se quisermos a arte de pensar matemática. Já há alguns anos, mas mais durante o período deste trabalho, o Prof. Bousson, tentou-me sempre inculcar, mais do que transmitir-me conhecimento científico específico (nas nossas reuniões que acabavam sempre numa discussão das mais variadas temáticas), a independência de pensamento, mostrou-me que podemos ser livres de fazer qualquer escolha e que para alcançar uma determinada verdade não é sempre necessário percorrer uma estrada régia, muitas vezes o caminho é simples e comum. Desta forma, por nunca me ter confinado o pensamento, ter exigido percorrer este ou aquele caminho, deixando-me entregue ao meu anarquismo, até provocando ainda mais, permitindo-me na atualidade uma visão ampla da realidade, lhe sinceramente agradeço.

Resumo

Com o rápido crescimento do tráfego aéreo e com a cada vez mais tendência de inclusão de aeronaves não tripuladas neste mesmo, uma das maiores preocupações das autoridades é o problema de prevenção de colisões aéreas. Bastantes esforços têm vindo a ser feitos para desenvolver um sistema que seja capaz de prevenir colisões aéreas em tempo real, no entanto, na atualidade este tema é ainda matéria de estudo. Deste modo, pretende-se aqui contribuir com um método sistemático para servir de suporte à resolução do problema de prevenção de colisões. Assim, um Sistema Autónomo de Prevenção de Colisões (SAPC) aéreas global é proposto no âmbito deste trabalho.

Com a preocupação de uma possível implementação real deste sistema, um método, o qual se baseia em conceitos geométricos, foi desenvolvido bem como uma abordagem para gerar e prever trajetórias em $4D$ de forma a controlar as colisões. Os métodos geométricos, utilizam conceitos como o cone de colisão, os quais tendo em conta o posicionamento espacial das aeronaves e suas respetivas velocidades permitem formular de forma intuitiva e generalizada o problema, podendo-se identificar, *a posteriori*, o conjunto de soluções. Deste modo, foi possível encontrar uma solução algorítmica para o problema global de prevenção de colisões aéreas.

Devido à sua flexibilidade, o método desenvolvido poderá ser facilmente integrado num SAPC. Por isso, foram discutidas duas arquiteturas genéricas de possíveis SAPCs e um método baseado nas técnicas pseudo-espectrais para projetar trajetórias em $4D$ de forma a assegurar um controlo global das colisões. As trajetórias em $4D$, possibilitam que o sistema tenha um comportamento preditivo em relação às colisões, tornando-o mais robusto e mais flexível.

Uma implementação computacional dos métodos propostos foi desenvolvida, para que fosse possível verificar e analisar a performance computacional. As simulações em cenários extremos revelaram que o método poderá servir de base a um sistema autónomo de prevenção de colisões, pois é possível encontrar de forma eficiente a solução global do problema de colisões.

Palavras-Chave

Prevenção de Colisões Aéreas, Prevenção de Colisões Global, Métodos Geométricos, Cone de Colisão, Controlo Preditivo.

Abstract

With the rapid growth of the air traffic and the possible inclusion in that of the unmanned aircraft, one of the major concerns of authorities is the problem of preventing traffic collisions. Substantial work has been made to develop a system that is able of preventing traffic collisions in real time, however, today this issue still an open matter. Thus, the aim of this work is to contribute to a systematic method to provide support for solving the problem of collision avoidance. So, an Autonomous Collision Avoidance System (ACAS) for global collision avoidance is proposed in this work .

With the concern of a possible real implementation of this system, a method which is based on geometric concepts was developed and also an approach to design and predict trajectories $4D$ in order to control collisions. The geometric methods use concepts like the collision cone which taking into account the spatial positioning of the aircraft and its respective speeds allow formulate intuitively the problem and as result identify the set of solutions. Therefore, it was possible to find an algorithmic solution to the problem of global collision avoidance .

Due to its flexibility, the developed method can be easily take part of an ACAS. Therefore, two generic architectures were discussed of possibles ACAS and a method based on pseudospectral techniques to design $4D$ trajectories to ensure overall control of collisions. Existing $4D$ trajectories allow the system to have a predictive behavior in relation to the collision, making it more robust and flexible.

A computer implementation of the proposed methods has been developed to verify and analyze the computational performance. Simulations in extreme scenarios showed that the method could form the basis of a system autonomous collision avoidance, since it is possible to find efficiently the solution to the global problem of collisions .

Keywords

Collision Avoidance, Global Collision Avoidance, Geometric Approach, Collision Cone, Predictive Control.

Conteúdo

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Algoritmos	xv
Lista de Acrónimos	xvii
Lista de Símbolos	xix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Métodos de Prevenção de Colisões	4
1.2.1 Abordagem Probabilística	6
1.2.2 Abordagem Segundo Processos de Otimização	7
1.2.3 Abordagem Geométrica	9
1.3 Problema a Abordar	10
1.4 Estrutura da Tese	12
2 Conceitos Gerais de Prevenção de Colisões Aéreas	13
2.1 Generalidades Sobre Prevenção de Colisões	13
2.1.1 Definição de Conceitos e Sistemas	15
2.2 Prevenção de Colisões em UAVs	18
3 Modelação e Algoritmos do Problema de Prevenção de Colisões	21
3.1 Formulação do Problema	22
3.1.1 Geometria do Cone de Colisão	23
3.1.2 Generalização do Problema de Prevenção de Colisões	28
3.1.2.1 Análise Dinâmica do Problema de Prevenção de Colisões	30
3.2 Solução do Problema	32
3.2.1 Algoritmos	34
3.3 Projeto de Trajetórias	37
3.3.1 Sistema Dinâmico de Navegação	41
3.3.1.1 Solução do Sistema	42
3.3.1.2 Aplicação do Método Pseudo-espectral	43
Fundamentos Matemáticos	44
Aplicação	46
3.4 Prevenção de Colisões Baseada no Controlo Preditivo	47
	xi

4	Arquiteturas do Sistema de Prevenção de Colisões	57
4.1	Projeto da Arquitetura do Sistema	57
4.2	Arquiteturas Propostas	59
4.2.1	Topologia Descentralizada	61
4.2.2	Topologia Centralizada	62
4.3	Considerações Gerais	62
5	Implementação e Simulação do Sistema de Prevenção de Colisões	65
5.1	Ambiente de Implementação	65
5.2	Arquitetura de Implementação	66
5.3	Simulações	67
5.3.1	Simulação I	68
5.3.2	Simulação II	77
5.3.3	Simulação III	86
5.3.4	Simulação IV	92
5.3.5	Simulação V	97
6	Conclusão e Discussão	103
6.1	Contribuição	104
6.2	Perspetivas Futuras	105
	Bibliografia	107

Lista de Figuras

1.1	Estrutura Genérica da Resolução do Problema de Prevenção de Colisões	5
3.1	Sistema Objeto-Objeto	22
3.2	Esfera de Colisão	24
3.3	Cone de Colisão	25
3.4	Sistema Objeto-Multi Objeto	29
3.5	Cones de Colisão num Sistema Objeto-Multi Objeto	30
3.6	Variação dos vetores velocidade $\Delta\vec{V}$ na direção \hat{e}	33
3.7	Computação da variação do vetor velocidade $\Delta\vec{V}$ quando dentro do Cone de Colisão	35
3.8	Computação da variação do vetor velocidade $\Delta\vec{V}$ quando fora do Cone de Colisão	36
3.9	Estrutura da Simulação de Tempo Real Proposta	51
3.10	Posicionamento das aeronaves no tempo t	52
3.11	Posicionamento das aeronaves no tempo $t + H$	53
3.12	Posicionamento das aeronaves no tempo $t + 2H$	54
3.13	Posicionamento das aeronaves no tempo τ	55
4.1	Estrutura Interna dos Objetos Aeronave e SAPC	57
4.2	Estrutura Interna do Objeto Aeronave	60
4.3	Estrutura Interna do Objeto SAPC	60
4.4	Topologia Descentralizada	61
4.5	Topologia Centralizada	62
4.6	Simulador de Tempo Real Proposto	64
5.1	Diagrama da Implementação do Software	66
5.2	Tempo máximo de computação em relação ao número de aeronaves e direções de procura da solução	68
5.3	Projeção Terrestre das Trajetórias Planificadas para a Simulação I	70
5.4	Gráfico das Distâncias entre Pares com menor distância para a Simulação I	72
5.5	Gráfico da Longitude em relação ao Tempo da Simulação I	73
5.6	Gráfico da Latitude em relação ao Tempo da Simulação I	73
5.7	Gráfico da Altitude em relação ao Tempo da Simulação I	74
5.8	Gráfico da Projeção Terrestre da Simulação I	74
5.9	Gráfico da Velocidade em relação ao Tempo da Simulação I	75
5.10	Gráfico do Ângulo de Trajetória em relação ao Tempo da Simulação I	75
5.11	Gráfico do Rumo em relação ao Tempo da Simulação I	76
5.12	Projeção Terrestre das Trajetórias Planificadas para a Simulação II	78
5.13	Gráfico das Distâncias entre Pares com menor distância para a Simulação II	81
5.14	Gráfico da Longitude em relação ao Tempo da Simulação II	82
5.15	Gráfico da Latitude em relação ao Tempo da Simulação II	82
5.16	Gráfico da Altitude em relação ao Tempo da Simulação II	83
5.17	Gráfico da Projeção Terrestre da Simulação II	83
5.18	Gráfico da Velocidade em relação ao Tempo da Simulação II	84
5.19	Gráfico do Ângulo de Trajetória em relação ao Tempo da Simulação II	84
5.20	Gráfico do Rumo em relação ao Tempo da Simulação II	85
5.21	Gráfico das Distâncias entre Pares com menor distância para a Simulação III	87
5.22	Gráfico da Longitude em relação ao Tempo da Simulação III	87
5.23	Gráfico da Latitude em relação ao Tempo da Simulação III	89
5.24	Gráfico da Altitude em relação ao Tempo da Simulação III	89

5.25 Gráfico da Projeção Terrestre da Simulação III	90
5.26 Gráfico da Velocidade em relação ao Tempo da Simulação III	90
5.27 Gráfico do Ângulo de Trajetória em relação ao Tempo da Simulação III	91
5.28 Gráfico do Rumo em relação ao Tempo da Simulação III	91
5.29 Gráfico das Distâncias entre Pares com menor distância para a Simulação IV	93
5.30 Gráfico da Longitude em relação ao Tempo da Simulação IV	93
5.31 Gráfico da Latitude em relação ao Tempo da Simulação IV	94
5.32 Gráfico da Altitude em relação ao Tempo da Simulação IV	94
5.33 Gráfico da Projeção Terrestre da Simulação IV	95
5.34 Gráfico da Velocidade em relação ao Tempo da Simulação IV	95
5.35 Gráfico do Ângulo de Trajetória em relação ao Tempo da Simulação IV	96
5.36 Gráfico do Rumo em relação ao Tempo da Simulação IV	96
5.37 Gráfico das Distâncias entre Pares com menor distância para a Simulação V	98
5.38 Gráfico da Longitude em relação ao Tempo da Simulação V	98
5.39 Gráfico da Latitude em relação ao Tempo da Simulação V	99
5.40 Gráfico da Altitude em relação ao Tempo da Simulação V	99
5.41 Gráfico da Projeção Terrestre da Simulação V	100
5.42 Gráfico da Velocidade em relação ao Tempo da Simulação V	100
5.43 Gráfico do Ângulo de Trajetória em relação ao Tempo da Simulação V	101
5.44 Gráfico do Rumo em relação ao Tempo da Simulação V	101

Lista de Tabelas

5.1	Plano de Voo para o Exemplo I	70
5.2	Dinâmica das Aeronaves para o Exemplo I	71
5.3	Distância Mínima de Separação em Metros Orbitda para o Exemplo I	72
5.4	Plano de Voo para o Exemplo II	77
5.5	Dinâmica das Aeronaves para o Exemplo II	79
5.6	Distância Mínima de Separação em Metros Orbitda para o Exemplo II	80
5.7	Plano de Voo para o Exemplo III	86
5.8	Distância Mínima de Separação em Metros Orbitda para o Exemplo III	88
5.9	Distância Mínima de Separação em Metros Orbitda para o Exemplo IV	92
5.10	Distância Mínima de Separação em Metros Orbitda para o Exemplo V	97

Lista de Algoritmos

3.1	Algoritmo Geral de Prevenção de Colisões	38
3.2	Algoritmo de Prevenção de Colisões numa Topologia Descentralizada	39
3.3	Algoritmo de Prevenção de Colisões numa Topologia Centralizada	40
3.4	Algoritmo de Computação da Trajetória de Evasão	47

Lista de Acrónimos

ACAS	Airborne Collision Avoidance System
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance Broadcast
ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management
AuCAS	Automatic Collision Avoidance System
CAD	Closest Approach Distance
CPA	Closest Point of Approach
CTAS	Center-TRANCON Automation System
DA	Descent Advisor
EN	East North
ENU	East North Up
ETA	Estimated Time Arrival
FAA	Federal Aviation Administration
FAST	Final Approach Spacing Tool
FL	Flight Level
GMC	Ground Movement Control
GMP	Ground Movement Planner
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
ICAO	International Civil Aviation Organization
IFR	Instrument Flight Rules
MPC	Model Predictive Control
NAS	National Airspace System
NextGen	Next Generation Air Transportation System
OAT	Operational Air Traffic
PBN	Performance Based Navigation
RA	Resolution Advisory
RNAV	Area Navigation
RNP	Required Navigation Performance
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RTNSim	Real Time Navigation Simulator
S&A	Sense and Avoid
SAPC	Sistema Autónomo de Prevenção de Colisões
SESAR	Single European Sky ATM Research

SMR	Surface Movement Radar
SSR	Secondary Surveillance Radar
STA	Scheduled Time Arrival
STCA	Short Term Conflict Alert
TA	Traffic Alert
TCAS	Traffic Alert Collision Avoidance System
TMA	Traffic Management Advisor
TRACON	Terminal Radar Approach CONTROL
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UVS	Unmanned Vehicle System
VFR	Visual Flight Rules
VS	Vertical Speed

Lista de Símbolos

δ	Ângulo de Abertura de um Cone de Colisão
$\Delta\vec{V}$	Varição do Vetor Velocidade Relativa
δ_{CAD}	Metade do ângulo de abertura do Cone de Colisão
$\dot{\gamma}$	Varição Temporal Ângulo de Trajetória
$\dot{\lambda}$	Varição Temporal Longitude
$\dot{\Psi}$	Varição Temporal Ângulo entre a projeção da trajetória no plano EN do referencial ENU
$\dot{\varphi}$	Varição Temporal Latitude
\dot{h}	Varição Temporal Altitude
\dot{V}	Varição Temporal Módulo da Velocidade
γ	Ângulo de Trajetória
\hat{e}	Vetor Direção de Procura Normalizado
\hat{n}	Vetor Normal
\hat{r}	Vetor Distância Relativa Normalizado
\hat{V}	Vetor Velocidade Relativa Normalizado
\hat{V}^{proj}	Vetor Velocidade Relativa Projetado Normalizado
λ	Longitude
Ψ	Ângulo entre a projeção da trajetória no plano EN do referencial ENU
τ	Tempo Final
φ	Latitude
\vec{e}	Vetor Direção de Procura
\vec{r}	Vetor Distância Relativa
\vec{r}_{CAD}	Vetor de Distância de Segurança
\vec{V}	Vetor Velocidade Relativa
\vec{V}^{proj}	Vetor Velocidade Relativa Projetado
C_j^N	Função Cardinal
D_{ji}^N	Derivada da Função Cardinal
H	Horizonte Temporal
h	Altitude
R	Raio da Terra
t	Variável de Tempo
t_j	Pontos de Gauss-Lobatto
T_n	Polinômios de Chebyshev
V	Módulo da Velocidade

Esperança

Se quiseres partir amanhã
eu paro o mundo
com facilidade assim
com esta mão
e então descobriremos
o mais profundo fundo que há no mundo
que é no irmos fundo às coisas
que há razão
de verdades consumadas me consomem
de falácias bem montadas me alimentam
mas meu filho mora o reino do futuro
que é mais duro
e não vai ser com palavras
que o contentam

Se a morte lenta te rebenta sob a pele
a cada dia
e se no teu braço apenas sentes a força
de um cansaço organizado
mas manténs na tua frente a dúvida
e o gosto pelo longe e a maresia
e se sentes no teu peito de criança
a alma de um sonho amordaçado
se quiseres partir amanhã
eu paro o mundo
com facilidade assim
com esta mão
e então descobriremos o mais profundo
fundo que há no mundo
que é no irmos fundo às coisas que há razão

*iste mundus furibundus falsa prestat gaudia
quia fluunt et decurrunt ceu campi lilia
Laus mundana vita vana vera tillit premia
nam impellit et submergit animas in tartara**

Pedro Barroso Lp "Roupas de Pátria, Roupas de Mulher", 1987

*retirado da versão original de Carmina Burana

Capítulo 1

Introdução

Nos dias de hoje, de uma maneira geral, o espaço aéreo pode ser sobrevoado por aeronaves sujeitas ou não a determinadas regras de voo. É no espaço aéreo controlado que essas regras estão bem definidas e são constantemente supervisionadas graças às normas do ATC (Air Traffic Control) .

No que diz respeito ao espaço aéreo civil as autoridades de aviação, nomeadamente a ICAO (International Civil Aviation Organization) [41], estão em constante discussão, pois questões como a divisão do espaço aéreo, eficiência e aplicabilidade das regras, fiabilidade (no sentido da segurança) dos sistemas envolvidos são só algumas (e complexas) das muitas temáticas que ocupam de forma transversal as autoridades idóneas.

Todavia, é de consenso geral que a tentativa de homogeneizar o espaço aéreo mundial, ou pelo menos parte dele, permitirá resolver muitas das questões até então por resolver e dará suporte para a resolução de outras. Porém, a solução não é tão expedita pois os espaços aéreos estão agregados aos respetivos estados soberanos e qualquer tentativa de homogeneização terá de ser mais que uma ideologia e partir de um conjunto de vontades. Por exemplo, nos EUA a autoridade nacional é a FAA (Federal Aviation Administration) [37], já na Europa é a EUROCONTROL que estabelece regras e políticas para o bom funcionamento do sistema de ATM (Air Traffic Management) entre os vários estados membros.

Esta tentativa de homogeneização do espaço aéreo, poderá parecer numa primeira análise, uma abordagem muito vaga ou então pouca exaustiva para colmatar aquilo que são os desafios do futuro ATM. Na verdade, problemas relacionados, por exemplo, com a sustentabilidade, operacionalidade, impacto ambiental do ATC, podem de uma maneira ou de outra, no seu todo ou em alguma parte, serem confinados ou relacionados com questões de navegação aérea.

Basicamente, a Navegação Aérea é o processo segundo o qual um veículo aéreo se desloca de um ponto espacial para outro através do espaço (céu). É claro que hoje em dia, o ato de navegar no céu não pode ser reduzido somente a problemas de orientação, pois navegar no céu implica mais do que saber onde o veículo aéreo se encontra num determinado momento e para onde se dirige relativamente ao globo terrestre, mas também que esse ato ou processo de navegar não ponha em risco (no sentido da segurança) outros veículos aéreos que se encontram também naquele momento sob processos idênticos. De salientar ainda, são os dois principais conjuntos de regras a que aeronaves/pilotos estão submetidos durante processo de navegação, a saber, IFR (Instrument Flight Rules) e/ou VFR (Visual Flight Rules). No primeiro o piloto serve-se de instrumentos a bordo da aeronave que lhe permitem identificar o seu posicionamento e daí proceder em conformidade, no segundo o piloto serve-se de referências visuais exteriores para identificar o seu posicionamento.

Num espaço aéreo controlado, a navegação aérea é condicionada também, por supervisores/controladores que monitorizam constantemente o posicionamento e intenções das aeronaves, ordenando alterações de navegação a estas caso bem entendam, e ao que estas deverão

cumprir categoricamente.

Neste sentido, e porque sobretudo o principal desafio do atual e do futuro ATM é lidar com o contínuo aumento do número de aeronaves quer nos aeroportos, quer nas zonas terminais, quer de maneira geral no espaço aéreo, que implicam problemas estruturais, como falhas de segurança, problemas ambientais, elevados custos de operação com possíveis impactos severos na economia a nível global, levou a que as principais autoridades mundiais comesçassem a elaborar planos e medidas de ação que fossem de encontro àqueles problemas. E como se isto por si só não bastasse, juntou-se a possibilidade da inclusão no ATM de aeronaves não tripuladas UAV (Unmanned Aerial Vehicle), o que aumentaria substancialmente a complexidade de sistemas e procedimentos do ATM. Pois, os UAVs são uma tecnologia fundamental a nível militar que cada vez mais tem aplicação no mundo civil, desde ações a nível da prevenção, segurança, entre outros. Deste modo, as autoridades competentes, num ato de sinergia, começaram em 1999 a estudar e a tentar desenvolver uma solução para os problemas da tendência futura do ATM, ao que em 2007 a ICAO dá a conhecer o manual PBN (Performance Based Navigation) num estado maduro. Este manual vai de encontro à homogeneização do espaço aéreo, através de uma mudança de filosofia do ATM em que as principais alterações residem numa nova abordagem para os, até então estabelecidos, procedimentos de navegação aérea.

A navegação aérea num espaço aéreo controlado é bastante restritiva, as aeronaves têm planos de voo bem delineados os quais são avaliados pelo sistema de ATC, e ao que as aeronaves, em geral, não tem muitos graus de liberdade para escolherem as suas próprias rotas aéreas. Isto deve-se sobretudo ao facto de que assim, a segurança ou o risco de um hipotético acidente possa ser melhor monitorizado e atuado, dentro da tecnologia existente. O sistema de ATC, dependendo dos serviços fornecidos, poderá supervisionar/controlar todas as movimentações das aeronaves no aeroporto, descolagem, aterragem e durante as rotas.

Devido ao referido facto, do constante aumento de aeronaves, e da navegação aérea ser tão restritiva num espaço aéreo controlado, obviamente que por questões de segurança, é que o manual PBN introduz um novo conceito que dará maior flexibilidade e uma maior liberdade quer a aeronaves/pilotos quer a controladores na escolha de rotas ou mudanças de navegação, esse conceito é chamado *free-flight* [4, 29, 55]. Este conceito é relativamente simples na sua forma, pois basicamente permite que pilotos, operadoras e controladores possam a todo o tempo alterar as trajetórias das aeronave consoante as suas razões, como, minimizar custos de operacionalidade, otimizar distâncias e calendarizações, minimizar impactos ambientais e acima de tudo assegurar que a segurança nunca seja posta em risco. É claro, que por si só, aplicar na prática este conceito não é uma tarefa tão simples como o simples conceito possa fazer transparecer, como irá ser visto mais à frente.

Em Março de 2007 é publicado o manual PBN, onde estão descritas as linhas de orientação e requisitos para implementação do novo conceito de navegação [56], e é então que as duas maiores autoridades governamentais no contexto aeronáutico mundial iniciam os seus ambiciosos projetos tendo em vista a implementação de um novo sistema de PBN. A FAA inicia o NextGen (Next Generation Air Transportation System) [57], já a EUROCONTROL [35] através do SESAR (Single European Sky ATM Research) [65] dá início a uma nova era do ATM no plano Europeu. Os desafios destes novos programas passam por desenvolver novos sistemas e procedimentos ou melhorar os já existentes para irem de encontro às necessidades exigidas.

1.1 Motivação

É dentro do contexto que foi exposto, que o presente estudo pretende-se inserir. Porém, seria demasiadamente prepotente tentar abordar todos os problemas relacionados com o futuro ATM, ao que, nem de perto nem de longe seria exequível no tempo de estudos deste trabalho, mais ainda, muitos dos desafios e problemas a serem resolvidos estão fora do âmbito da competência do autor. No entanto, existe um conjunto de problemas, que merecem uma atenção especial, a todos de forma transversal. São eles, os problemas ou o problema relacionado com a prevenção de colisões aéreas, que na sua essência é a base para alcançar a segurança aérea.

Os controladores aéreos, agregados ao sistema de ATC, são uns dos principais responsáveis na prevenção de colisões aéreas, e fazem-no com a ajuda ou não de sistemas auxiliares, quer de monitorização, quer de computação. É claro que os pilotos, são também eles parte fundamental ao evitar possíveis colisões entre aeronaves, para isso servem-se da sua experiência e da perceção visual bem como do sistema, obrigatório nas aeronaves de linha aérea, que deteta e aconselha resoluções de conflitos entre aeronaves, o TCAS.

No entanto, tanto controladores aéreos, tanto pilotos, bem como seus sistemas auxiliares, na atualidade e, segundo a tendência tecnológica num futuro próximo (pelo menos relativo à data deste trabalho), apenas lidam com o problema de prevenção de colisões a um nível local. Isto é, a prevenção de colisões aéreas é tratada localmente, os conflitos existentes bem como a sua posterior resolução é feita entre pares de aeronaves, quanto muito entre algumas. O TCAS, resolve conflitos entre pares de aeronaves, já um controlador aéreo poderá conseguir, mediante a sua habilidade ou mediante os sistemas auxiliares à sua disposição, resolver conflitos entre algumas aeronaves.

Para que o conceito de free-flight seja aplicado na sua totalidade, *a priori*, será mais difícil se a filosofia de prevenção for local, pois, imagine-se um conflito entre duas aeronaves, a aeronave A e a aeronave B, resolvido o conflito entre A e B poderá ser induzido um novo conflito com uma aeronave C. Deste modo, um sistema de prevenção global de colisões aéreas deverá corresponder melhor aos requisitos do conceito de free-flight, pois no caso do conflito das aeronaves A e B, a resolução do conflito não induzirá um conflito com uma aeronave C. Contudo, desenvolver um sistema de prevenção global de colisões aéreas que consiga atuar em tempo real, até à data deste trabalho, ainda não foi possível. Mais ainda, não se prevê nos próximos anos, o aparecimento de um tal sistema pelo que, tanto o programa SESAR como o NextGEN não aplicará um conceito de free-flight na sua totalidade.

O desenvolvimento de um sistema autónomo de prevenções de colisões aéreas seria um requisito basilar, pelo menos numa grande escala, para aplicação de uma filosofia de ATM assente no conceito de free-flight, pois, é pouco verosímil que um conjunto considerável de colisões seja humanamente resolvido em tempo real. É claro, que esse sistema deverá resolver os conflitos globalmente, caso contrário poderá perder o controlo em situações exigentes.

Neste sentido, achou-se a propósito abordar a temática da prevenção de colisões global, na medida em que, irá ser desenvolvida uma formulação matemática que poderá servir de base a um futuro Sistema Automático de Prevenção de Colisões. A formulação bem como a resolução que irá ser proposta, foi concebida, sempre com a preocupação de uma possível aplicação real, assim, não só foi contemplado o rigor matemático exigido, mas também o facto

da sua implementação computacional poder ser aplicável a um sistema real. Com isto quer-se dizer, que não basta resolver ou achar a solução para um problema de prevenção de colisões global, mas que essa solução seja encontrada num tempo admissível para que seja aplicada com sucesso.

1.2 Métodos de Prevenção de Colisões

O problema de prevenção de colisões tem vindo a ser objeto de estudo há mais de quarenta anos a esta parte, por parte da indústria, academia e autoridades governamentais. No que concerne à parte civil, a condução desses estudos e desenvolvimentos têm em vista essencialmente o melhoramento do ATM, de forma global.

Nesta secção irão ser expostos e revistos alguns desses estudos e desenvolvimentos realizados pela comunidade científica, com o intuito de esclarecer e fundamentar as opções tomadas ao longo da exposição deste trabalho. O enfoque desses estudos será confinado àqueles, cujos objetivos são contribuir para a modelação e resolução do problema de prevenção de colisões, na medida em que poderão ser integrados em sistemas computacionais, auxiliares ou autónomos, relativamente àqueles cujo objeto de estudo recai sobre procedimentos dos operadores/controladores para resolução de conflitos aéreos.

Apesar de poder transparecer que a temática de prevenção de colisões aéreas é um problema singular, o que não deixará de estar correto, é normalmente abordado pelos investigadores nas suas partes. Um trabalho exaustivo de revisão em [47], acerca do problema geral de prevenção de colisões é abordado dividindo, legitimamente, o problema em duas partes principais, a saber, o problema de deteção de conflitos e o problema de resolução de conflitos. Porém, temas relacionados com estimação e modelação do tráfego aéreo, definição de métricas que melhor se enquadram na deteção e resolução de conflitos, também se inserem na temática de prevenção de colisões.

Uma outra clivagem, patente numa grande parte dos estudos realizados, que de certa forma direciona o desenvolvimento do estudo, é o tipo de sistemas de aquisição e monitorização de tráfego aéreo que são tidos em conta. Trabalhos realizados em que a latência da aquisição do posicionamento do tráfego aéreo é maior, usam normalmente modelos probabilísticos [26, 27] para preverem o comportamento das trajetórias e daí analisarem a possibilidade de eventuais conflitos por sua vez, quando a latência do posicionamento é menor poderão ser usados modelos nominais uma vez que os dados estão a ser constantemente atualizados. É claro que, se a previsibilidade do modelo for bastante precisa, mesmo na presença de um sistema com maior latência, existe a possibilidade de utilizar modelos nominais para prever trajetórias.

A análise e categorização que irá ser feita de seguida ao problema de prevenção de colisões, será um pouco diferente daqueles [47] que analisam e o categorizam com base nas várias etapas de modelação. Aqui abordar-se-á, desde já, o trabalho tendo em conta a sua capacidade de detetar e resolver conflitos entre pares ou entre múltiplas aeronaves, como se poderá constatar no diagrama (1.1) que pretende esquematizar as metodologias mais utilizadas para a resolução do problema de prevenção de colisões.

Assim, a forma com que foi abordado o problema, centra-se primeiramente se os estudos, no

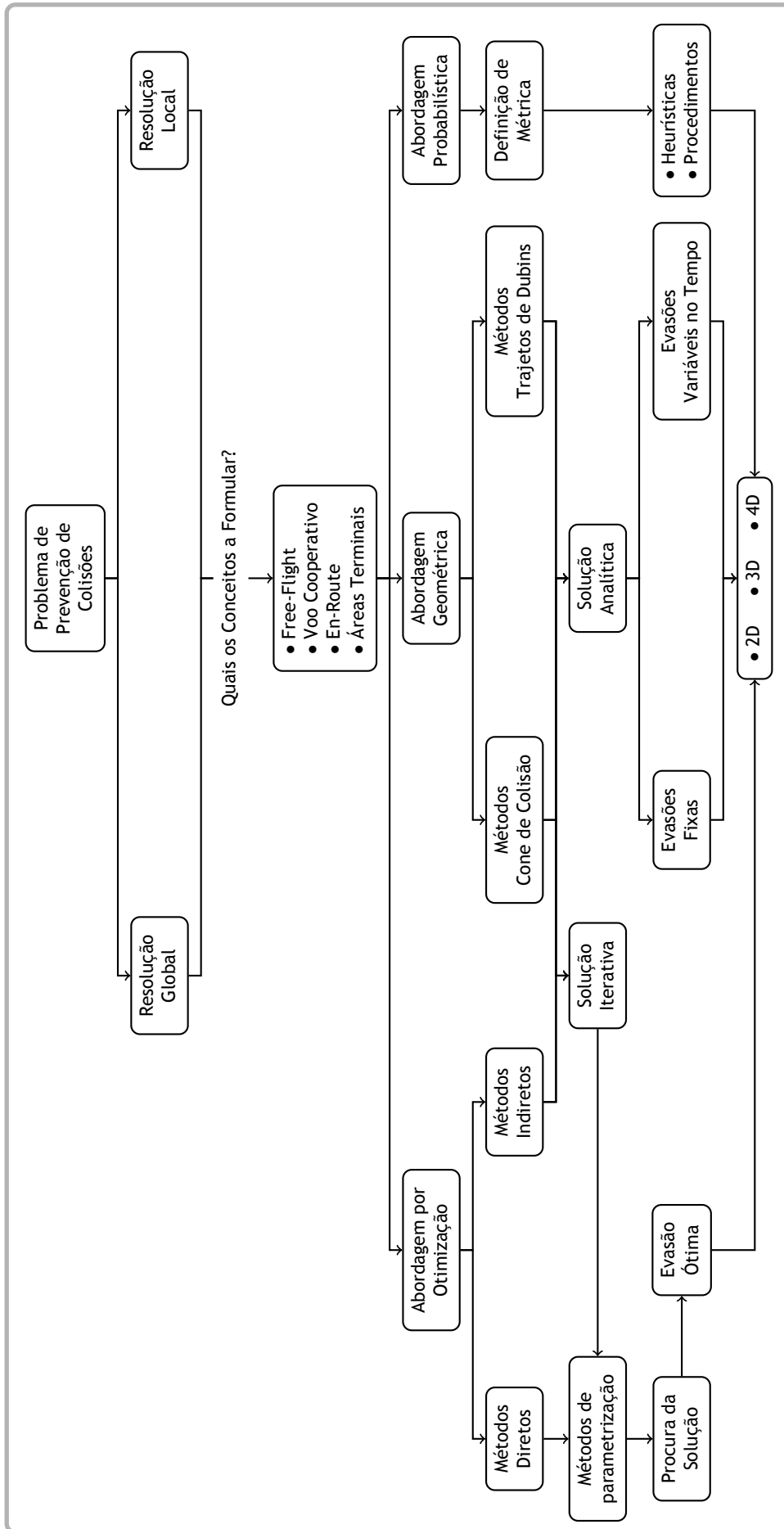


Figura 1.1: Estrutura Genérica da Resolução do Problema de Prevenção de Colisões

seu âmbito, resolvem o problema de prevenção de colisões local ou globalmente [2, 10, 40, 43, 52, 61, 64, 69]. Após isto, surge a questão de em que situações o problema se insere. Independentemente do objetivo do problema ser confinado a uma situação local ou global, o conjunto de situações ou cenários em que o problema se insere poderá ou não facilitar a resolução, por exemplo, caso se queira resolver o problema num cenário de en-route (corredores aéreos), mesmo sendo requerido uma prevenção global será, *a priori*, mais fácil que num cenário de uma zona terminal. Desta forma, poderá ser apenas desejado resolver o problema, numa situação terminal, em en-routes, em situações de voo cooperativo, tendo em conta obstáculos terrestres, na condição de free-flight num espaço aéreo restrito, ou em todas as situações possíveis.

Posto isto, o próximo passo será formular e modelar o enquadramento escolhido. As opções poderão ser de variadíssimas formas, no entanto, aqui serão apresentadas aquelas mais utilizadas pela comunidade científica. Então, dividiu-se em três as opções para formular e modelar uma situação de prevenção de colisões, através de uma abordagem probabilística, geométrica ou ótima. É claro que, numa abordagem probabilística poderão ser usadas formulações geométricas ou até mesmo com base em formulações ótimas, o mesmo se passa com as formulações geométricas que a todo tempo, poderão ser traduzidas para um processo de otimização. Redutoramente, qualquer problema de prevenção de colisões poderá ter a sua formulação descrita do ponto de vista geométrico, uma vez que de uma forma ou de outra, o objetivo será sempre assegurar uma distância de segurança entre aeronaves, mas não é isso do que aqui se trata. Aqui pretende-se, analisar como é que o problema foi pensado ou abordado, segundo aquelas formulações.

1.2.1 Abordagem Probabilística

Quando o problema de prevenção de colisões aéreas é abordado do ponto de vista probabilístico, uma das ideias subjacentes é a análise do tráfego aéreo com base na recolha dos dados reais [31, 33, 34, 58, 59]. Esta, é no fundo, a abordagem ao problema de prevenção de colisões com mais sucesso, pois faz parte de sistemas reais como o Center-TRACON [32], entre outros. O seu sucesso resulta do facto, de ainda não haver sistemas cuja previsibilidade seja bastante precisa, tendo em conta os mais variados fatores, como os meteorológicos.

Normalmente, após a recolha e análise dos dados do tráfego aéreo, nas situações em que o problema se enquadra, poderão ser calculados indicadores tais como a probabilidade de conflito [17, 45, 58, 59]. Esta probabilidade, poderá ser determinada tendo em conta vários parâmetros, a exemplo, poderá ser baseada na estimação do posicionamento e velocidade atual das aeronaves, planos de voo e correções de vento. As probabilidades de conflito, podem ser computadas com base nas trajetórias estimadas quer as aeronaves tenham similares ou dissimilares erros de posicionamento [16, 18, 19], este problema põe-se porque diferentes aeronaves têm diferentes comportamentos dinâmicos.

A referida probabilidade de conflito, na verdade, terá de ser um parâmetro com mais informação, isto é, para resolver um problema de prevenção de colisões é necessário especificar uma métrica para que se consiga fazer algo com ela, assim, ter-se-á de definir a probabilidade de conflito, por exemplo, por hora, por milha náutica, por voo entre outras. Porém, dependendo do enquadramento do problema, poderá existir outras métricas que satisfaçam melhor

os requisitos, por exemplo, a probabilidade de conflito (de sobreposição de trajetória) [18] relacionada com tamanho das aeronaves será melhor empregue em situações fora das zonas terminais [19], uma probabilidade de conflito dos volumes de segurança talvez seja melhor empregue numa zona terminal. Outras probabilidades de conflito, como a probabilidade de conflito vertical ou horizontal poderão se ajustar, às mesmas ou a outras situações.

Definida a métrica ou as métricas mais apropriadas, que indicam a probabilidade de existir um conflito, pretende-se agora resolver o possível conflito. Aqui põe-se o problema, de quando iniciar a trajetória e que manobra efetuar, a altura em que se inicia uma determinada trajetória de evasão pode ter de satisfazer determinadas condições. Pode-se pensar que quanto mais cedo melhor, no entanto, por questões da performance de voo, como o consumo de combustível, o momento em que a trajetória de evasão é iniciada poderá estar envolvido com algum processo de otimização, minimizando ou maximizando algum critério relacionado também com a probabilidade de colisão. Quanto à manobra evasiva, nesta categoria de abordagem ao problema, os processos centram-se em executar manobras durante um certo período de tempo, as quais já se sabe à partida, que são dinamicamente possíveis para a execução das aeronaves e a probabilidade de deixar de haver conflito, findado um certo período de tempo, é alta [58, 59]. Este processo de execução de manobras evasivas, pode estar relacionado e modelado, por exemplo, com processos de decisão Markovianos [44-46, 70], que após serem resolvidos, por exemplo, por Programação Dinâmica, são convertidos em tabelas lógicas que no futuro servirão para selecionar de forma eficiente quais as manobras com menor probabilidade de conflito. Tais manobras podem ser sugeridas ou aconselhadas aos controladores aéreos ou a pilotos, e estes com base nos seus juízos, empíricos e/ou de procedimentos, selecionarão a trajetória que melhor se adapta.

Sumário

Apesar da abordagem probabilística continuar a ser bastante utilizada na implementação de sistemas reais, ela é normalmente limitada a pares de aeronaves e a enquadramentos (cenários) bastante específicos, o que faz desta abordagem, por um lado, vantajosa na previsibilidade de conflitos tendo em conta diversos fatores e parâmetros, mas por outro, carece de uma generalização para que se possa aplicar em diferentes situações, e de não disponibilizar soluções de resolução de conflitos mais globais e efetivas (no sentido de ser uma trajetória evasiva melhor definida). Assim, a abordagem probabilística torna-se vantajosa para uma aplicação real prevenção de colisões local, todavia para o problema global de prevenção de colisões a esta abordagem ainda não consegue dar resposta à complexidade do problema.

1.2.2 Abordagem Segundo Processos de Otimização

Um outro conjunto de abordagens ao problema de prevenção de colisões, realizada neste estudo, comporta um conjunto bastante vasto de abordagens ao problema. Essas abordagens, têm em comum o facto de serem formuladas e modeladas com o intuito de serem submetidas a um processo de otimização [15, 43, 63]. Pois, como irá ser explicado mais à frente, a abordagem geométrica poderá em algum momento ser transformada em programação matemática e assim tentar resolver o problema, o que não sucede com as presentes que à partida envolvem

a otimização de algum critério. Deste modo, o problema é formulado tendo em conta a minimização ou maximização de um critério, sujeito ou não a restrições, quer de igualdade quer de desigualdade. A título de exemplo, imagine-se um problema de prevenção de colisões, onde o critério é minimizar os desvios da trajetória nominal planeada de uma aeronave, sujeita a manter uma distância de separação mínima entre as outras aeronaves e cumprir também as suas restrições dinâmicas.

Em linhas gerais, existem duas formas de resolver um problema de otimização, a saber, através dos métodos diretos [2, 8, 9, 23, 28, 30] ou através dos métodos indiretos [42, 50]. Os métodos indiretos são aplicados a problemas dinâmicos, onde envolve a construção do Hamiltoniano (primeiro integral das equações Euler-Lagrange) e que através do princípio do máximo de Pontryagin é possível construir um sistema de equações que poderão ou não ter uma solução analítica. Caso o problema tenha uma solução analítica, a solução estará encontrada, caso contrário será necessário submeter o sistema de equações a um processo numérico de busca da solução [24], os quais fazem parte dos métodos diretos.

Os métodos diretos, por sua vez, lidam com os problema de otimização de forma generalizada. Enquanto que os métodos indiretos são aplicados a problemas dinâmicos, os métodos diretos tratam os problemas de otimização da mesma forma (em linhas gerais, visto que dependendo da simplicidade do problema é possível aplicar transformações mais simples). Assim, um problema de otimização é transformado num problema de Programação Não Linear (no caso geral), através de uma parametrização do problema, que depois é submetido a um programa de procura de soluções para resolver o problema, os chamados *solvers*. Relativamente ao enquadramento destes métodos no problema de prevenção de colisões, os métodos indiretos têm a sua aplicação sobretudo em situações de prevenção local, pois para algumas formulações é possível encontrar uma solução analítica cuja manobra evasiva pode ser fixa ou variável no tempo. Já os métodos diretos, podem ser também utilizados em prevenção local, no entanto devido à possibilidade de uma formulação generalista podem ser aplicados a problemas de prevenção global.

Quando o problema de prevenção de colisões é abordado do ponto de vista da otimização, encontram-se elegantes e expressivas formulações para as mais variadas situações e enquadramentos, pois o problema é concebido a partir de uma dialética matemática a qual pode compreender um número amplo de situações. Na abordagem através dos métodos indiretos, normalmente, compreendem-se formulações relativamente simples em que existe uma especial preocupação pelo comportamento dinâmico das aeronaves, no entanto, o problema é tido, na generalidade, em situações locais, porém, mesmo em situações que seja necessário um método iterativo para encontrar a solução, o processamento computacional é relativamente eficiente e poderão ser utilizados em situações de tempo real. Já nos métodos diretos, eles são empregues porque, apesar da formulação poder ser bastante generalista, como comportar índices de performance, índices de consumo de combustível, ser enquadrado em situações de prevenção global e de free-flight, a sua resolução irá depender do método de procura da solução, o que é uma dificuldade se objetivo for uma aplicação real em que o tempo de cálculo das soluções deverá ser determinístico ou pelo menos ser conhecido o pior tempo de execução, isto é, existe uma dificuldade nos problemas de otimização em garantir que a solução é encontrada num período de tempo especificado e até mesmo se existe garantia da existência da solução, este facto agrava-se o problema da escalabilidade que é o problema de prevenção de colisões global.

Sumário

Deste modo, a abordagem segundo processos de otimização torna-se vantajosa quando se pretende abordar o problema de prevenção de colisões de forma generalista, ou do ponto de vista puramente matemático. Com esta abordagem é possível expressar ou formular o problema das mais variadas formas, no entanto, a resolução do problema, normalmente fica para segundo plano, ao que uma implementação real deste tipo de abordagem apenas fica confinada a situações que envolvem poucas aeronaves. Assim até à data, os métodos de otimização aplicados ao problema de prevenção de colisões, possibilitam tratar o problema globalmente, todavia como referido, o tempo de resolução do problema continua a ser uma desvantagem na aplicação desta abordagem a tráfego denso.

1.2.3 Abordagem Geométrica

A abordagem geométrica ao problema de prevenção de colisões, destaca-se da probabilística, na medida em que, o problema é estruturado e pensado, a montante, do ponto de vista geométrico. Deste modo, o problema é desde início analisado, normalmente, tendo em conta o posicionamento espacial das aeronaves e suas respetivas velocidades e construindo uma formulação suficientemente expressiva, para modelar o problema de conflito, mas relativamente fácil de tratar, para que as soluções a uma hipotética colisão sejam de fácil obtenção.

Esta abordagem difere da probabilística, no sentido em que esta ocupa-se sobretudo do estudo da análise de conflitos, deixando para segundo plano a resolução. A abordagem geométrica, por sua vez, centra-se no processo de resolução e na solução propriamente dita, relegando para segundo plano a previsibilidade das várias medidas. Na verdade, os estudos que abordam o problema de prevenção de colisões através dos métodos geométricos, dedicam-se na sua maioria, à formulação e resolução do problema.

Uma das mais históricas abordagens que usa conceitos geométricos, não tanto para a prevenção de colisões, mas para o ato de colisão em si, é a Navegação Proporcional [66, 68] onde o objeto a colidir ou a evitar a colisão é sujeito a uma variação da sua velocidade proporcional à variação do ângulo da Linha-de-Vista [20, 39, 60]. Porém, a Navegação Proporcional pode ser enquadrada ou incluída num conjunto mais amplo de técnicas que usam conceitos relacionados com o Cone de Colisão [22, 51]. Este conceito relaciona a velocidade relativa dos objetos tendo em conta a sua distância relativa, com isto é possível construir e identificar o domínio das velocidades relativas que provocam ou não a colisão. Tal facto, é de extrema relevância, pois em mais nenhuma outra abordagem, a identificação do domínio de soluções é possível (note-se que, não se trata de definir o domínio de soluções factíveis, mas sim saber qual é o conjunto de soluções quer sejam factíveis ou não). É claro que, o cálculo ou a computação pode ser exigente, em alguns casos é possível encontrar uma solução analítica, sobretudo num problema de prevenção local, em outros, é necessário recorrer a métodos numéricos (entre os quais, os processos de otimização) para encontrar a solução. Quando a solução analítica é possível de ser calculada, surge basicamente sob duas formas, através de trajetórias de evasão fixas, onde o que indica a solução, é a variação do vetor de velocidade que naquele momento a aeronave deve aplicar para não mais estar em conflito, ou sob um funcional temporal que em cada instante de tempo indique qual a variação do vetor de velocidade a executar, durante um período de tempo finito.

Contudo, existe outro conjunto de conceitos, que podem ser inseridos no âmbito de uma abordagem geométrica ao problema de prevenção de colisões, generalizados sob a forma dos chamados trajetos de Dubins [48, 68]. Aqui, o problema é à partida formulado com base na construção de um conjunto de combinações finitas de segmentos de linha e segmentos de curva constante, com o objetivo de construir trajetórias [25, 30]. Este método, é muitas vezes utilizado no planeamento de trajetórias em que há necessidade de evitar obstáculos terrestres, porém, também pode ser utilizado na construção de trajetórias de evasão através de uma solução analítica ou através de um processo de otimização.

Apesar desta abordagem ser bastante expressiva, traduzindo de forma simples para linguagem matemática conceitos complicados, como o de prevenção de colisões, através dos conceitos de cone de colisão, ou facilmente modelar as trajetórias de evasão através da construção dos trajetos de Dubins, continua ainda a ser difícil enquadrar o problema de prevenção de colisões globalmente. Os trajetos de Dubins, são uma excelente opção para calcular e definir trajetórias previamente, já conceitos relacionados com o cone de colisão poderão ser usados para calcular em tempo real as trajetórias de evasão, no entanto, apenas localmente, pois globalmente as soluções terão de ser calculadas numericamente. Mais ainda, as soluções encontradas, utilizando os conceitos de cone de colisão, como são calculadas para um determinado instante de tempo, de forma geral, não preveem variações da dinâmica da aeronave pelo que, este método para ser realmente aplicável, terá de ser acompanhado de um estudo da previsibilidade das trajetórias das aeronaves envolvidas.

Sumário

Assim, os métodos geométricos de abordagem ao problema de prevenção de colisões, conseguem da mesma forma expressar o problema de uma forma generalista tal como os métodos sob processos de otimização, até porque, o problema formulado do ponto de vista geométrico poderá ser submetido a um processo de otimização. Todavia, através dos métodos geométricos, poderá ser possível identificar exatamente o conjunto de soluções do problema, tal como é feito na Navegação Paralela e assim facilitar o cálculo da solução.

Posto isto, através dos métodos geométricos é possível abordar o problema de prevenção de colisões global de uma forma generalizada. Dependendo como é abordado o cálculo da solução poderá ser possível elaborar uma solução computacional adequada a uma implementação real tal como nos métodos probabilísticos.

1.3 Problema a Abordar

Foram revistas, aquelas que foram consideradas, as três mais comuns abordagens ao problema de prevenção de colisões, e referenciadas as suas mais valias e limitações. Assim, no contexto atual, é a abordagem probabilística que reúne uma aplicabilidade em sistemas reais. Sistemas como o CTAS, que não só pretende ser um sistema de alerta mas também sugerir resoluções de conflito aos controladores, sistemas com o STCA que monitoriza os potenciais conflitos e alerta os controladores e sistemas como o TCAS que alertam e aconselham as tripulações para os riscos de colisões.

Em comum, todos estes sistemas, bem como outros existentes na atualidade lidam com o

problema de prevenção de colisões a nível local, isto é, entre pares de aeronaves. Até mesmo o CTAS, que é o sistema que oferece um maior nível de automação na atualidade, resolve os conflitos localmente, com base em estudos do comportamento do tráfego aéreo computa a probabilidade de colisão dando prioridade a conflitos em que aquela é maior.

Pretende-se então, no decorrer deste estudo, apresentar uma abordagem para o problema de prevenção de colisões global. Neste caso, também já existem estudos que o fazem, como foi referido anteriormente, no entanto, a eficiência computacional, ou a falta dela, poderá inviabilizar uma aplicação real dessas abordagens. Pois se o tempo de cálculo de uma resolução de conflito, demorar mais tempo que o necessário para evitar a colisão, a abordagem é inviável. O sucesso de sistemas como o CTAS e TCAS reside no facto de resolver os conflitos de uma forma computacionalmente eficiente e determinística (no pior dos casos o tempo máximo de computação).

Assim, de uma forma geral, as abordagens ao problema de prevenção de colisões utilizando processos de otimização na sua formulação, enquadram-se numa resolução global, já a abordagem probabilística e geométrica enquadram-se numa resolução local (é de salientar, como foi referido, que existem abordagens geométricas na formulação, com o intuito de resolver um problema global, mas a seu tempo podem ser transformadas num problema de otimização).

A intenção é então, abordar o problema global sob uma perspetiva geométrica, e tentar formular o problema generalizado de prevenção de colisões, onde também o conceito de free-flight é retido. Neste sentido, o caminho não será transformar o problema num processo de otimização, mas sim aproveitar o generalismo da formulação para tentar desenvolver uma solução computacionalmente eficiente. É claro, que por mais eficiente que o cálculo da solução seja, existe sempre tempo despendido, quanto mais não seja quando o número de aeronaves for elevado. Mais ainda, pode existir latência na aquisição de dados por parte de um hipotético sistema real, campo onde a abordagem probabilística toma vantagem, uma vez que, constantemente analisa a probabilidade e previsibilidade das trajetórias. Posto isto, também irá ser proposto um método, baseado na filosofia de controlo preditivo e nas técnicas pseudo-espectrais de discretização [11, 12], para gerar o comportamento das trajetórias em 4D, colmatando eventuais problemas de latência que possam existir e assegurar o cumprimento das trajetórias de evasão por parte das aeronaves.

O estudo que foi desenvolvido ao longo deste trabalho, não será aplicável, de forma direta, ao atual ATM, nomeadamente a sistemas auxiliares do ATC, pois está longe de estar completo. Como referido, irá ser desenvolvido um método matematicamente comprovado para o problema global de prevenção de colisões, que irá ser aplicada, nesta fase, a UAVs. Isto deve-se ao facto dos UAVs serem menos restritivos, em termos dinâmicos, relativamente àqueles cujas vidas humanas vão a bordo. Como se poderá depois constatar, foi criado como hipótese que cada aeronave terá uma prioridade bem definida no contexto do problema, e ao que também as soluções encontradas são baseadas nessas prioridades. O estudo das prioridades será bastante relevante, para uma implementação real do problema, mas não faz parte do âmbito deste trabalho, pois o pretendido é criar um método o mais generalizado possível, e ao que a aplicação a UAVs (numa primeira fase) preenche inteiramente esse requisito. Também é de salientar que a aplicação do método proposto a aeronaves tripuladas carecerá de um exame crítico de quem de direito. Mais se adianta, que a maior parte das questões relacionadas com a especificação e regulamentação de UAVs no espaço aéreo não segregado não serão analisadas, no entanto,

irá ser tido em conta a possibilidade do método proposto ser a base tanto para um sistema de prevenção de colisões centralizado, como para um sistema descentralizado.

1.4 Estrutura da Tese

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, inclusive o atual, com o propósito de o estruturar, traçando assim uma linha de raciocínio ao longo deste estudo.

No Capítulo 1, é introduzido o enquadramento para o problema de prevenção de colisões, onde é feita uma breve introdução ao contexto atual e explicado qual a motivação para a realização deste trabalho. Segue-se com a revisão dos métodos de prevenção de colisões e concluindo com a definição concreta do problema a abordar.

No Capítulo 2, são definidos conceitos e explicados sistemas, os quais estão conectados com a problemática de prevenção de colisões. Pretende-se com este capítulo, adquirir uma visão global do presente enquadramento do problema e quais os futuros desenvolvimentos.

No Capítulo 3, é onde o problema abordado, descrito no Capítulo 1, é resolvido. Sugere-se um método, devidamente fundamentado, com o objetivo de ser a base para resolver o problema global de prevenção de colisões. São propostos algoritmos para uma futura implementação computacional, mais ainda, propõe-se também um método para prever trajetórias de forma a colmatar problemas associados ao cumprimento imediato da solução do problema de prevenção de colisões.

No Capítulo 4, tem-se a idealização genérica da arquitetura de um possível Sistema Autónomo de Prevenção de Colisões. As topologias apresentadas, já foram introduzidas no Capítulo 3, no entanto, pretende-se aqui compreender o esquema básico de um sistema com tal finalidade, que por sua vez, irá servir de base a uma implementação computacional.

No Capítulo 5, é discutida a implementação do software, tanto do simulador de tempo real como do SAPC. É descrito em traços gerais, o procedimento de implementação bem como os recursos e ferramentas utilizadas. Por fim, com o objetivo de demonstrar a efetividade e eficiência da resolução proposta, são realizadas um conjunto de simulações em cenários extremos.

No Capítulo 6, último capítulo deste trabalho, é discutido o método apresentado, identificando problemas ainda não resolvidos e sugerido desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Conceitos Gerais de Prevenção de Colisões Aéreas

Antes mesmo de se abordar em mais detalhe o problema de prevenção de colisões, na tentativa de o resolver, irão ser discutidas algumas generalidades sobre o problema, com o intuito de o entender melhor.

No Capítulo anterior, foram revistos alguns métodos, uns com o objetivo claro de resolver o problema de prevenção de colisões, outros por sua vez, não o resolvendo diretamente disponibilizam formas de poder detetar eventuais colisões para que, *a posteriori*, possam ser devidamente tratadas. O foco agora, não será tanto discutir quais as técnicas utilizadas pela comunidade científica na prevenção de colisões, mas tentar perceber quais os princípios do processo de colisão bem como os princípios adjacentes na sua resolução. Assim, irão ser introduzidos os dois primeiros conceitos fundamentais do problema de prevenção de colisões, são eles, a separação e o conflito que não são nada mais que dois indicadores de segurança relacionados com a distância mínima exigida entre aeronaves.

2.1 Generalidades Sobre Prevenção de Colisões

Para que fosse possível garantir a segurança no espaço aéreo, houve a necessidade de pelo menos, naqueles espaços aéreos que são controlados, especificar o quanto as aeronaves devem distar. Deste modo, o conceito de separação entre aeronaves parece ser um imperativo, o qual está estritamente relacionado com o conceito de distância mínima, assim, o conceito de separação não é nada mais do que manter a distância entre aeronaves ou relativamente ao terreno, maior que a distância mínima, para que o risco de colisão seja o menor possível.

Contudo, os espaços aéreos são categorizados, e dependendo da categoria a separação pode ou não ser exigida. É claro que num espaço aéreo onde as regras de voo adotadas são IFR e as aeronaves estão sujeitas ao controlo dos ATC (Categoria A), a separação entre aeronaves é exigida, o que não acontece num espaço aéreo não supervisionado pelo serviço de ATC e em que as aeronaves voam segundo as regras de voo VFR.

Dependendo então da categoria do espaço aéreo, a separação mínima é assegurada segundo dois eixos. Assim, verticalmente é exigido que as aeronaves possuam uma separação vertical de 1000 ft (pés) até um FL290 (Flight Level) e a partir daí devem manter uma separação mínima vertical de 2000 ft (salvo em certas situações). No entanto, as aeronaves podem voar no mesmo nível de voo ou em níveis de voo em que não se verifica a separação mínima vertical, e desta forma, é com a separação horizontal que a segurança é garantida. Enquanto que a separação vertical é definida por uma distância, já a separação horizontal é definida tanto por distâncias

como por tempo. Assim, com base em sistemas ou procedimentos é estimado o posicionamento futuro das aeronaves e com isto sabe-se o tempo que as separa de um possível conflito, todavia se a separação for efetuada com auxílio do radar é possível especificar distâncias mínimas entre aeronaves, por exemplo, numa separação por radar, em que este se situa a menos de 40 milhas náuticas das aeronaves a separação horizontal é de 3 milhas náuticas, já se estiverem a mais de 40 milhas náuticas, que é o caso é o caso dos corredores aéreos fora das zonas terminais, a separação mínima é de 5 milhas náuticas.

Falta agora definir o conceito de conflito, que não é mais que uma situação em que uma ou mais aeronaves não cumprem a separação mínima, deste modo, este conceito não implica que haja risco de colisão, pois, as aeronaves podem estar a experienciar um conflito mas não estarem em colisão. Apesar da sua simplicidade, o conceito de conflito, é um dos mais importantes conceitos na prevenção de colisões, como referido no Capítulo anterior, com base neste é possível definir métricas que serão a base para definir procedimentos e desenvolver sistemas de auxílio à prevenção de colisões.

É de salientar também, que até agora e durante o restante trabalho a prevenção de colisões é referida de um modo geral, e que poderá parecer estar mais relacionada com prevenção de tráfego. Na realidade a legislação/autoridades distingue prevenção de tráfego da prevenção de colisões, pois prevenção de colisões é enquadrado com prevenção de colisões entre terreno e atividades meteorológicas. Todavia o termo prevenção de colisões, ajusta-se ao enquadramento deste trabalho e será sempre utilizado em qualquer situação, tanto para prevenção de colisões entre tráfego e as restantes situações.

Posto isto, é possível, quase que de forma categórica, afirmar que o problema de prevenção de colisões é solucionado com a conjugação destes dois conceitos. É claro que para uma aplicação eficaz de uma separação, com vista a um não conflito ou um conflito com vista a um baixo risco de colisão, é necessário entender outras questões. Pois, questões como a dinâmica das aeronaves, o momento (tempo) de atuação de uma separação, as condições meteorológicas, a minimização da criação de potenciais conflitos, são tudo condicionalismos na tentativa de solucionar o problema de prevenção de colisões. Desta forma, o problema de prevenção de colisões, ainda o é, e talvez será nas próximas décadas um problema intensivamente debatido e investigado.

Como referido no Capítulo anterior, um dos grandes desafios do atual ATM é lidar com o constante aumento de aeronaves o que, cria graves problemas de sustentabilidade do ATM, pois a sua capacidade é limitada provocando custos gravosos quer ao nível da economia, quer ao nível dos impactos ambientais. No entanto, o que condiciona em grande medida a capacidade dos ATM é sem dúvida a questão da segurança. Não é possível, introduzir mais aeronaves no espaço aéreo sem a garantia de que não haja perigo para as vidas humanas, desta forma, é crucial que o problema de prevenção de colisões seja, na medida do possível, resolvido.

Neste sentido, uma das soluções encontradas pelas principais autoridades, FAA e EUROCONTROL, foi desenvolver sistemas auxiliares, tanto de posicionamento e de comunicação de dados como o ADS-B como de implementações computacionais de algoritmos e heurísticas com vista a uma melhor agilização dos mecanismos de segurança. Na EUROCONTROL, através do programa SESAR, o objetivo é criar legislação e programas de desenvolvimento de sistemas com vista a uma homogeneização do espaço aéreo Europeu.

De seguida irão ser enunciados alguns dos conceitos e sistemas envolvidos na temática da prevenção de colisões.

2.1.1 Definição de Conceitos e Sistemas

De seguida irão apresentadas algumas explicações de conceitos, sistemas e projetos, alguns já introduzidos outros irão ser referenciados, aqui pela primeira vez.

ATM - Air Traffic Management

O sistema de ATM pode ser descrito como,

“Everything that contributes to the safe movement of air traffic” – [13]

“... the interaction between Procedures, People and Equipment ...” – [5]

Geralmente a segurança do ATM depende das ações do piloto, que são condicionadas pelo ATC ou TCAS (Traffic Alert Collision Avoidance System), cumprindo a RA (Resolution Advisory) [13, 14].

ATC - Air Traffic Control

O sistema ATC é um sistema bastante complexo, que envolve a deteção de aeronaves, sistemas de comunicação, processamento e avaliação de informações, e que no final, cabe ao controlador do ATC avaliar e tomar decisões. Assim, segundo definição,

“A service provided by controllers in ATC units to prevent collisions between aircraft and expedite orderly traffic flows” – [13]

Os serviços prestados pelo ATC podem variar de país para país, mesmo de aeroporto para aeroporto dentro de um mesmo país, contudo, o objetivo será sempre assegurar uma separação segura entre aeronaves – *assegurar a segurança*; e minimizar os custos operacionais – *otimizar recursos*.

Normalmente os serviços de ATC prestados por entidades nacionais incluem vários métodos de controlo. Desde o planeamento de voo feito por operadoras e pilotos até ao momento de desembarque, o ATC monitoriza todas as ações feitas pelas aeronaves. Assim, o sistema ATC faz uso de procedimentos bem estabelecidos e de sistemas complexos, que monitorizam e garantem a segurança. Geralmente o ATC é dividido em duas áreas de cobertura, a primeira, é enquanto a aeronave permanece no aeroporto ou perto dele, onde o chamado serviço de *Airport Control* assume liderança das operações, quando as aeronaves estão fora do âmbito aeroporto (esta distinção é feita pelas autoridades nacionais) é o serviço de *Area Control* que a segue.

Airport/Aerodrome Control

Os aeroportos são lugares onde as aeronaves iniciam e terminam os seus voos, portanto, um aeroporto, situado num espaço aéreo controlado, deverá estar equipado com sistemas de monitorização e controlo de tráfego aéreo, no local físico do aeroporto ou na sua vizinhança.

Ground Control

Ground Control também chamado de GMC (Ground Movement Control) tem como principal tarefa orientar as aeronaves enquanto estão nos aeroportos. Os controladores pertencentes a este setor, seguem os movimentos de tráfego nos taxiways, pistas inativas, entre outros. No entanto, a jurisdição que estabelece o raio de ação dos controladores de GMC é definida pelas autoridades aeroportuárias em documentação própria.

Aeroportos com bastantes movimentações podem usar o chamado SMR (Surface Movement Radar) para acompanhar as aeronaves, particularmente em más condições de visibilidade.

Air Control

O Air Control conhecido como “ Torre”, é composto por uma torre que proporciona uma visibilidade ampla. Os controladores da “Torre” são os principais responsáveis pelas ações de aterragem e descolagem, garantindo que todas condições estão reunidas, tanto quanto possível, para aterragens e descolagens seguras.

Approach Control

O controlo de aproximação é um sistema de radar amplamente utilizado hoje em dia por muitos aeroportos. A sua missão é fazer com que o tráfego se reúna ordenadamente e devidamente espaçado em zonas estabelecidas nas proximidades do aeroporto e o conduzir no cenário mais seguro possível em direção à pista de aterragem.

Nos EUA este sistema é o chamado TRACON (Terminal Radar Approach CONTROL). Neste serviço de ATC, bem como no Controlo de Área, são utilizados sistemas muito complexos para ajudar os controladores a manter a segurança encaminhando ordeiramente o tráfego aéreo. O TRACON, por exemplo, usa duas ferramentas principais, a TMA (Traffic Management Advisor) e FAST (Final Approach Spacing Tool).

O TMA é usado também pelo *Area Control*, cujo principal objetivo é calcular eficientemente os horários de chegada, STA (Scheduled Time Arrival), para cada aeronave. Estes STAs são calculados com base no tempo estimado de chegada ETA (Estimated Time Arrival) fornecida pelo DA (Descent Advisor) [33]. O FAST, por sua vez, assiste os controladores do Tracon para manter as aeronaves no tempo correto [26].

Na Europa, por exemplo, um outro sistema é utilizado, o chamado STCA (Short Term Conflict Alert). O STCA é um sistema de computador que monitoriza continuamente o SSR (Secondary Surveillance Radar) e alerta os controladores da existência de CPA (Closest Point of Approach) [14, 67].

Controlo de Área

Um outro serviço de ATC responsável pela monitorização de vastas áreas de espaço aéreo é o chamado *Controlo de Área*, não estando presente em todos os aeroportos e em alguns casos estão situados num local diferente do aeroporto principal. Os controladores deste serviço são responsáveis pelo o tráfego nos corredores aéreos.

Se o plano de voo de uma aeronave contiver o local de partida e chegada em diferentes países, o piloto possivelmente entrará em contacto com diferentes serviços de área durante o voo. Os controladores deste serviço fornecem indicações para os pilotos após a saída do controlo de

aproximação, no aeroporto de partida, até alcançar o controlo de aproximação do aeroporto de chegada.

TCAS - Traffic Alert Collision Avoidance System

O ATC baseia-se numa estrutura bem definida, os procedimentos e sua filosofia de divisão de tarefas faz com que seja um dos sistemas principais do ATM. Acontece que o fluxo de tráfego aéreo tem vindo a crescer e com o objetivo de aumentar a segurança, foram introduzidos sistemas de bordo, de prevenção e alerta de tráfego. Assim, o Traffic Alert Collision Avoidance System (TCAS) foi introduzido a partir de 1993 para todas as aeronaves comerciais e desde outubro de 2003 para todos os aviões de carga.

O TCAS, na verdade, é a abreviação de TCAS II, é uma versão comercial do que é geralmente conhecido pelo Airborne Collision Avoidance System (ACAS). Este usa um SSR transponder (Modo C ou Modo S) incluído em aeronaves e alerta o piloto com um Traffic Alert (TA), se o tempo estimado de colisão relativamente a outro avião é menor do que 40 segundos. Durante esse tempo, o piloto deve ter atenção e identificar a aeronave intrusa, após 10 a 20 segundos (se nada for feito) o TCAS avisa o piloto com um Resolution Advisory (RA) sugerindo ao piloto uma variação da trajetória vertical e ajuste da velocidade vertical (VS). Um RA no sentido oposto é emitido pelo TCAS presente na outra aeronave envolvida no conflito [7].

O TCAS II apenas aconselha os pilotos com RA no plano vertical, a nova geração de TCAS, os TCAS III e IV, são capazes de aconselhar os pilotos também no plano horizontal fazendo do TCAS um sistema cada vez mais importante no contexto do ATM.

ADS-B - Automatic Dependent Surveillance Broadcast

O ADS-B (Automatic Dependent Surveillance Broadcast) [1] é um sistema relativamente recente, em que as principais autoridades de aviação civil o querem incluir de forma transversal nos seus ATMs. O ADS-B é um sistema de vigilância que permite que aeronaves possam transmitir a sua identificação, posicionamento e outras quaisquer informações, entre aeronaves e entre estações terrestres. Uma das características principais deste sistema, é de utilizar transmissões por satélite, o que irá possibilitar uma globalização da informação e uma variedade de informação disponível. Deste modo, o ADS-B tornar-se um sistema de impacto profundo na segurança do ATM.

NextGen - Next Generation Air Transportation System

O programa NextGen (Next Generation Air Transportation System) pretende modernizar o espaço aéreo nacional dos EUA até 2025. Basicamente, o programa é uma transformação do sistema de radar do ATC para um sistema baseado em comunicações por satélite. De acordo com a FAA esta transformação vai melhorar a segurança, reduzir os impactos ambientais e reduzir os enormes custos devido a atrasos de voos. Baseado no conceito de Performance Based Navigation (PBN), o NextGen irá atribuir um papel importante à capacidade de navegação das aeronaves.

SESAR - Single European Sky ATM Research

As especificações do projeto SESAR (Single European Sky ATM Research) começaram em 2005 e a sua fase de definição terminou em 2008. A EUROCONTROL pretende concluir a fase de desenvolvimento em 2013 e ter o sistema implementado em 2020. O objetivo principal do

SESAR é desenvolver sistemas e metodologias para permitir um melhor desempenho do ATM, o qual não fica confinado apenas à melhoria da capacidade operacional do ATM mas também, a redução de custos de forma geral e contribuir para uma redução dos impactos ambientais.

PBN - Performance Based Navigation

O PBN são especificações que definem os requisitos de desempenho de navegação, os quais podem ser aplicados ao ATC. O PBN inclui tanto especificações como o RNAV e RNP, fornecendo a base para o desenvolvimento e implementação de trajetórias [56].

RNAV - Area Navigation

Navegação de Área (RNAV) permite a aeronave voar na condição de free-flight [4,55] desde que seja monitorizada pelos controladores ou possua a bordo sistemas com capacidade de executar este tipo de navegação.

RNP - Required Navigation Performance

“ A defining characteristic of RNP operations is the ability of the airplane navigation system to provide improved performance information, monitor the navigation performance it achieves and inform the crew if the requirement is not met during an operation. This onboard monitoring and alerting capability enhances the pilot’s situational awareness and can enable reduced obstacle clearance or closer route spacing without intervention by air traffic control. When values are specified, they indicate the required performance level for the operation. ”
– [56]

A navegação RNP é idêntica à navegação RNAV com a diferença que, a navegação RNP possui melhoramentos ao nível da performance e da sua monitorização, juntando a capacidade de alerta durante o voo.

2.2 Prevenção de Colisões em UAVs

De uns anos a esta parte, a indústria militar dos UVS (Unmanned Vehicle System) sofreu um rápido e crescente desenvolvimento, a qual tem inúmeras aplicações no mundo civil. Desta forma, nomeadamente os UAVs, podem ser utilizados pelo mercado civil para dar suporte a várias atividades, como vigilância aérea, deteção de poluição, combate a incêndios, reconhecimento e vigilância de infra-estruturas, relé de transmissões e muitas outras. Neste sentido, existe uma pressão constante do mercado civil e mesmo militar às autoridades que gerem os espaços aéreos civis.

Como se não bastasse, aos problemas de capacidade do ATM, junta-se a possibilidade de inclusão de UAVs tornando-o ainda mais complexo, no entanto, a EUROCONTROL iniciou em 2000 o projeto CARE (Co-operative Actions of R&D in EUROCONTROL) o qual acabou em 2009 [21]. Este projeto foi dividido em três, nos quais, o primeiro projeto CARE iniciava desenvolvimentos sobre inclusão de UAVs no ATM e no final de 2001 saiu o primeiro e último estudo preliminar [62].

Neste estudo preliminar, não se pretendia desenvolver nem investigar sistemas ou métodos de resolução para problemas de prevenção de colisões. Fazia parte do estudo, entender o contexto futuro dos UAVs, sugerindo especificações com vista a ajudar a uma futura legislação. Assim,

o relatório, não só aborda a temática de prevenção de colisões, mas muitas outras, como a categorização dos UAVs, problemas relacionados com a sua operação, entre muitas outras considerações.

Quanto ao problema da prevenção de colisões, o que há a salientar, é o facto de ser quase imprescindível o uso do mecanismo de “*See and Avoid*” ou “*Sense and Avoid*”, pois os UAVs podem ser pilotados remotamente quer sob a monitorização visual do piloto ou não, mais ainda, podem ser remotamente pilotados ou apenas guiados (no caso de serem UAVs equipados com pilotos automáticos) ou totalmente autónomos.

O “*Sense and Avoid*” é um conceito mais geral que o “*See and Avoid*”, pois este último está mais conectado com o facto do piloto humano detetar possíveis perigos e preveni-los. Já o “*Sense and Avoid*” ou S&A tem um âmbito mais lato, pois pressupõe a existência de sistemas capazes de detetar perigos e, através de sistemas automáticos ou de alerta ao piloto, prevenir situações catastróficas.

Contudo o uso de UAVs na Europa é restringido aos militares e seus espaços aéreos ou em situações especiais dentro do espaço aéreo civil, como missões de alta altitude onde os níveis de voo não são usados pela aviação civil. Para permitir o uso do espaço aéreo civil por parte dos UAVs militares, a EUROCONTROL em conjunto com outras entidades iniciou em 2007 o desenvolvimento de especificações e regulamentação e em todos os biénios desde essa data é revista a legislação [36]. Assim a última revisão data de 2012, onde o termo UAV foi substituindo por RPA (Remotely Piloted Aircraft).

O documento em causa aborda variadíssimos aspetos e requisitos que os RPA militares deverão cumprir para que possam operar no chamado OAT (Operational Air Traffic), clarificando também que os estados soberanos podem ter as suas regulamentações específicas para este tipo de aeronaves, como o caso do Reino Unido através do manual CAP 722 [3].

Como referido, o manual abrange vários aspetos, e sem dúvida que todos eles são importantes, no entanto, vão ser referidas algumas especificações que se enquadram no presente estudo. A salientar, é o facto de o documento não propor nenhum método ou sistema de prevenção de colisões¹, apenas encarrega-se de tentar construir um conjunto de normas que possam ser úteis à indústria no desenvolvimento de tais avanços.

Posto isto, a primeira especificação (RPA7) a dar ênfase, vai de encontro ao objeto do presente estudo, pois existe a necessidade dos UAVs/RPAs possuírem sistemas de S&A e em situações de falha garantirem de alguma forma a sua segurança e a do seu meio envolvente.

Specification RPA7. An RPA S&A system should enable an RPA pilot-in-command to perform those traffic avoidance and collision avoidance functions normally undertaken by a pilot in a manned aircraft, and it should perform a collision avoidance function autonomously if traffic avoidance has failed for whatever reason. The S&A system should achieve an equivalent level of safety to a manned aircraft.

Uma outra especificação bastante importante, a RPA9, sugere que um sistema de S&A que possua uma implementação tanto de prevenção de tráfego como de prevenção de colisões, minimize tanto quanto possível a influência das ações da prevenção de colisões na prevenção

¹Aqui o termo está a ser usado tanto para colisão de tráfego como colisões em geral

de tráfego. Esta especificação, é claramente, uma sobreposição do papel de cada tipo de prevenção.

Specification RPA9. Implementation of traffic avoidance and collision avoidance functions in an S&A system should as far as is reasonably practicable be independent of each other. In execution, they should avoid compromising each other.

Quanto às distâncias de separação quando é um piloto a comandar o RPA, o documento específica que devem ser mantidos pelo menos 500ft na vertical, 0.5 milhas náuticas na horizontal em relação a outro e qualquer tráfego e ainda, o piloto é o responsável principal de assegurar essa separação mínima, salvo em algumas exceções (RPA11).

Specification RPA11. Where an RPA pilot-in-command is responsible for separation, he should, except for aerodrome operations, maintain a minimum distance of 0.5nm horizontally or 500ft vertically between his RPA and other airspace users, regardless of how the conflicting traffic was detected and irrespective of whether or not he was prompted by a S&A system.

Quando a prevenção de colisões é autónoma (RPA12), o documento sugere que eventuais sistemas tenham uma implementação semelhante àqueles que são utilizados pela aviação civil, como o TCAS. O TCAS é um tipo de ACAS, o qual não utiliza o conceito de distância de separação mínima, mas sim, à semelhança da Navegação Proporcional, utiliza conceitos como *time-to-go* e *miss distance*. O *time-to-go* num TCAS é o tempo que falta, mantendo as atitudes, para o ponto mais próximo previsto CPA (Closest Point of Approach). Desta forma, é necessário, caso seja previsto um conflito, alterar a *miss distance* que não é nada mais que a distância que falta até ao CPA.

Specification RPA12. Where an UAS initiates collision avoidance autonomously, it should achieve miss distances similar to those designed into ACAS. The system should be compatible with ACAS.

Como já foi referido, o método que irá ser desenvolvido pretende servir de base a um possível sistema autónomo de prevenção de colisões, cuja prevenção é global. Também foi referido, que para já uma possível implementação é mais apropriadas a UAVs, pelo que estas especificações serão tidas em conta durante o desenvolvimento.

No entanto, o desenvolvimento de sistemas para desempenhar tais tarefas, ainda está no início, pelo que, nos próximos anos ainda não é espectável sistemas S&A capazes de fazerem frente a cenários complexos, pois as questões não se põem apenas ao nível dos algoritmos e métodos de resolução, como é o âmbito deste estudo, mas a muitos outros níveis como sistemas de localização, comunicações, segurança (ao nível de transmissão de dado), monitorização entre outros. Assim, apesar de já existir legislação, para uma futura integração de UAVs neste caso RPAs, aplicações de uso frequente deste tipo de equipamento, merecerá ainda de uma exaustiva investigação por parte das autoridades competentes, indústria e universidades.

Capítulo 3

Modelação e Algoritmos do Problema de Prevenção de Colisões

No presente Capítulo irá ser proposto um método que poderá servir de base a um futuro sistema autónomo de prevenção de colisões mas, antes disso, irá ser de novo salientada a principal motivação. Os sistemas atuais de prevenção de colisões, como o TCAS ou alguns subsistemas de alguns ATCs, lidam com problemas de colisão entre aeronaves a um nível local, o que, por mais recursos computacionais disponíveis (como no CTAS) dependerá sempre de uma avaliação crítica por parte dos controladores e pilotos, e nunca garantirá que uma ação de prevenção numa dada aeronave influenciará uma nova colisão. Mais ainda, o conceito de free-flight, que é uma das soluções para o problema do constante aumento de aeronaves nos principais ATMs bem como a inclusão de UAVs, não poderá ser posto em prática na sua totalidade.

Assim, uma das principais razões para os métodos de prevenção global não terem ainda uma implementação real é devido essencialmente à incapacidade dos atuais recursos computacionais resolverem o problema num tempo aceitável (tempo real), para que as soluções possam ser encaminhadas para as aeronaves e estas serem capazes de cumprir as trajetórias de evasão.

Será então necessário estudar e elaborar um método suficientemente expressivo, para englobar o problema de prevenção de colisões global, e suficientemente simples, para que a solução computacional seja obtida o mais rápido possível. A importância do tempo computacional é óbvia, por exemplo, imagine dois aviões separados por 50 segundos, se o SAPC despender 45 segundos para calcular a solução, o risco de uma possível colisão é alta e poderá ser catastrófica. Deste modo, o método a ser desenvolvido deverá ter uma preocupação especial com a futura implementação computacional.

Foram revistos alguns dos trabalhos realizados pela comunidade científica no Capítulo 1, alguns deles para colisões entre duas aeronaves, outros com várias aeronaves envolvidas, aplicando diferentes abordagens, como modelagem híbrida, abordagens utilizando conceitos de otimização, controlo ótimo, navegação proporcional, heurísticas baseando-se em análises probabilísticas do tráfego aéreo e outros algoritmos. A maioria desses estudos têm como preocupação principal a formulação matemática e modulação, alguns com formulações muito elegantes, bem como a utilização de complexos conceitos matemáticos, no entanto, uma implementação real de uma grande parte dessas abordagens, torna-se irreal quando aplicado a cenários do mundo real onde várias aeronaves estão envolvidas.

Posto isto, o primeiro item a ser abordado será a formulação do problema, onde o conceito de cone de colisão entre duas aeronaves será generalizado para um número de aeronaves superior a dois, agregado a este, também será descrito o conjunto de soluções, bem como o conjunto de soluções quando as propriedades dinâmicas das aeronaves são tidas em conta [54]. Após isto, será construída uma solução algorítmica para diferentes tipos de arquiteturas, que são descritas e idealizadas em mais detalhe no Capítulo 4. Ainda assim, as questões computacionais continuam a ser um problema e para tentar resolver os problemas como atrasos de comunicação

e latências, um método de geração de trajetória assente numa técnica de controlo preditivo tentará assegurar a eficácia e praticabilidade do método proposto.

3.1 Formulação do Problema

A principal ideia por detrás do problema de prevenção de colisões, é no fundo evitar que a distância entre as aeronaves seja menor que a distância mínima admissível, a qual será sempre maior que zero. Isto é, como as aeronaves têm um determinado volume que ocupam no espaço, não é requisito suficiente assegurar que a distância entre elas seja maior que zero, é também necessário especificar um limite mínimo para a distância entre as aeronaves.

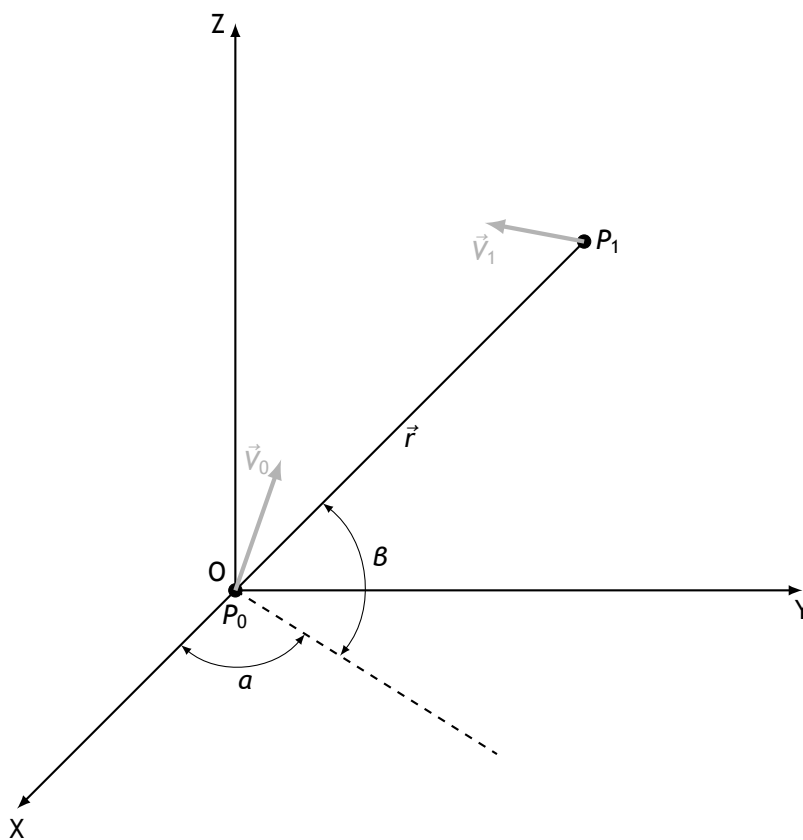


Figura 3.1: Sistema Objeto-Objeto

Considere-se então a figura (3.1), onde duas aeronaves são representadas pelos pontos P_0 e P_1 com velocidades V_0 e V_1 respetivamente e a distância entre eles é representada pelo vetor \vec{r} . Desta forma, pode-se descrever matematicamente o que foi afirmado no parágrafo anterior,

$$\|\vec{r}\|^2 \geq \Delta \quad (3.1)$$

onde Δ , é o valor, que independentemente do tamanho das aeronaves, nunca colidirão.

A equação (3.1), *per se*, não resolve o problema, e de facto, apenas com esta equação o problema não poderá ser formulado. Antes de se entrar mais profundamente no problema,

algumas hipóteses deverão ser elencadas para que o problema se torne o mais simples possível. As hipóteses que daqui em diante, servirão de base à construção e resolução do problema são:

- i. Cada aeronave terá uma prioridade bem definida e única no contexto do problema. (No Capítulo 4, na construção da arquitetura dos sistemas, este facto também será relevante);
- ii. Os vetores de navegação de cada aeronave, são considerados constantes durante um período de tempo Δt .

Irá ser então apresentado, o enquadramento do problema de prevenção de colisões tendo por base o conceito de cone de colisão. Este conceito é bastante utilizado em vários estudos que utilizam a abordagem geométrica ao problema de prevenção de colisões. O seu interesse depreende-se sobretudo, com o facto de retratar o problema de prevenção utilizando matemática simples, todavia, quando generalizado para várias aeronaves a solução torna-se difícil de obter, pelo menos para o caso geral. Assim, após ser demonstrada as condições suficientes de não colisão, será definido o conjunto de soluções, para o problema de prevenção entre duas aeronaves.

3.1.1 Geometria do Cone de Colisão

Irão ser agora introduzidas algumas definições, com o objetivo de uma melhor compreensão e estruturação da formulação. Tendo por base a figura (3.1), as definições (3.1) e (3.2) são estabelecidas diretamente, ambas pretendem clarificar qual é o referencial adotado e como se processará a interação entre os dois pontos de massa.

Definição 3.1 (Sistema Objeto-Objeto). Considere-se o referencial cartesiano $OXYZ$ onde o ponto de massa com a posição P_0 e velocidade V_0 coincide com a origem do referencial. Suponha-se agora, que existe outro ponto de massa com a posição P_1 , relativamente ao referencial $OXYZ$ e velocidade V_1 . O sistema formado pelos dois pontos de massa na referida configuração, separados pela distância $\|\vec{r}\| > 0$, e com as respetivas velocidades, é chamado *Sistema Objeto-Objeto* (Figura (3.1)).

Definição 3.2 (Linha de Vista). A linha formada pelos dois objetos num Sistema Objeto-Objeto, com distância $\|\vec{r}\|$, é a chamada *Linha de Vista*.

Observação 3.1. Como referido anteriormente, a formulação a construir tem como hipótese um sistema de prioridades. Assim, no Sistema Objeto-Objeto o ponto de massa com menor prioridade é aquele que se posiciona na origem do referencial cartesiano $OXYZ$.

Definido o sistema base, interessa agora clarificar a noção de colisão em três dimensões, assim como, o conceito de *Cone de Colisão*, o qual será fundamental para definir a solução do problema de colisão. A construção das figuras (3.2) e (3.3), ajudará a um melhor entendimento e visualização das definições (3.3), (3.4) e (3.5), as quais pretendem ser a base para definir as condições de interceção e as condições suficientes de colisão.

Definição 3.3 (Colisão). É considerado que os dois pontos de massa de um Sistema Objeto-Objeto, estão em *colisão* se $\|\vec{r}\| < \|\vec{r}_{CAD}\|$, onde $\|\vec{r}_{CAD}\|$ é a *Distância de Segurança*.

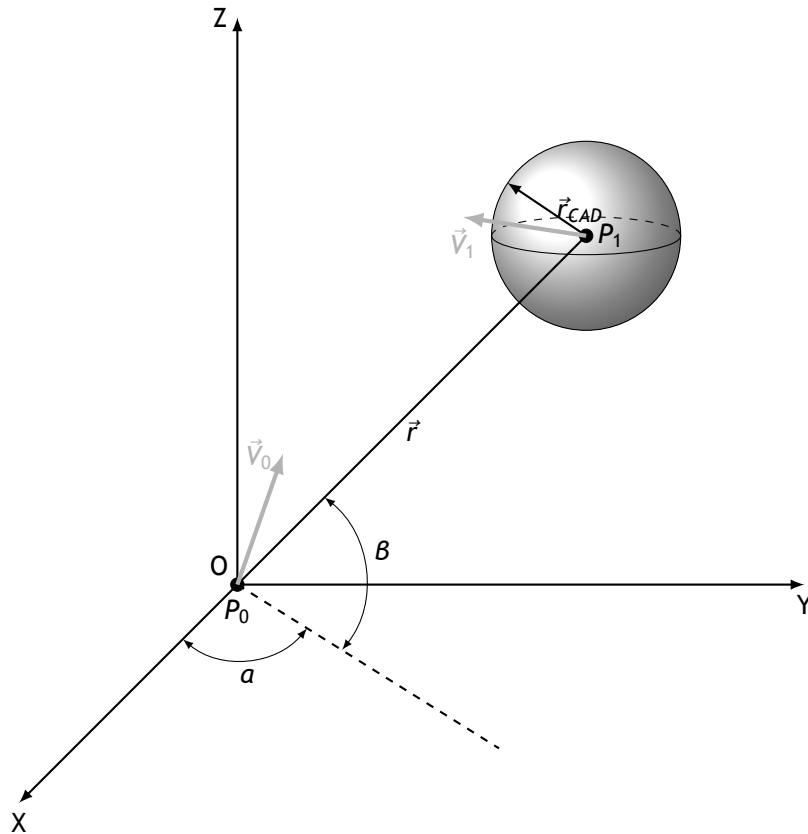


Figura 3.2: Esfera de Colisão

Definição 3.4 (Esfera de Segurança). Uma esfera definida num *Sistema Objeto-Objeto*, cujo centro está em P_1 e raio igual à distância de segurança $\|\vec{r}_{CAD}\|$, é denominada *Esfera de Segurança* (Figura (3.2)).

Definição 3.5 (Cone de Colisão). Num *Sistema Objeto-Objeto*, o cone infinito com *apex* coincidente com o ponto de massa P_0 e as linhas da sua superfície tangentes à esfera de raio $\|\vec{r}_{CAD}\|$ com centro no ponto de massa P_1 , onde $\|\vec{r}\| > \|\vec{r}_{CAD}\|$, é o chamado *Cone de Colisão* (Figura (3.3)).

Reunidas as definições principais, segue-se agora, a exposição de algumas leis que serão utilizadas para provar, alguns dos mais pertinentes, princípios do problema de prevenção de colisões. Com o Lema (3.1), desenvolver-se-á a ideia da condição de *não colisão* e assim, não só fundamentar o Teorema (3.2) como realçar o princípio de *interceção*, por meio do Corolário (3.1) e a *condição suficiente de prevenção de colisão*, por meio do Corolário (3.2).

O Teorema (3.2), é talvez a mais importante conclusão deste estudo preliminar, para não dizer de todo o trabalho, pois, poderá parecer demasiado simples, até para ser considerado um Teorema, talvez nem seja digno de ser considerado uma conclusão, pois parece demasiado trivial. O que é certo, é que esta conclusão, a qual foi elevada ao olimpo, define um conjunto de soluções para o problema de prevenção de colisões entre duas aeronaves, e deste modo, poderá ser facilmente transportada para o problema global, e assim identificar onde procurar as soluções para o problema, e não mais haver a preocupação de estar a procurar uma solução onde ela não existe.

Lema 3.1. *Seja \vec{V}_{01} , o vetor de velocidade relativa entre os pontos de massa de um Sistema*

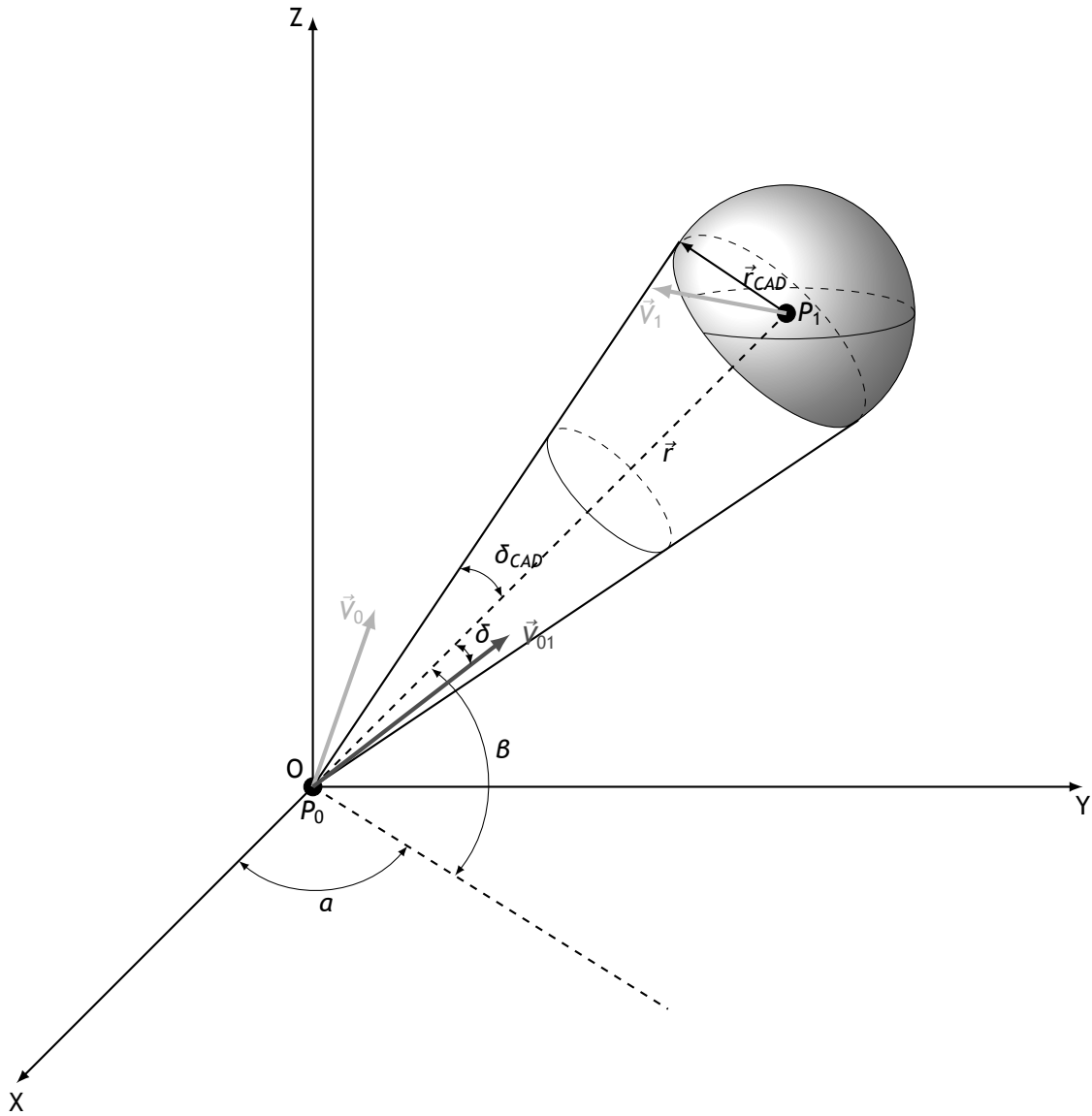


Figura 3.3: Cone de Colisão

Objeto-Objeto, onde as velocidades de cada ponto de massa são constantes durante o intervalo de tempo Δt . No instante t_0 , onde $\|\vec{r}(t_0)\| > \|\vec{r}_{CAD}\|$, se o ângulo δ formado pelo vetor \vec{V}_{01} e a Linha de Vista \vec{r} for maior do que a metade do ângulo de abertura do Cone de Colisão δ_{CAD} , então $\exists \Delta t > 0 : \forall t \in [t_0, t_0 + \Delta t], \|\vec{r}(t)\| > \|\vec{r}_{CAD}\|$.

Demonstração. Considerado um Sistema Objeto-Objeto, cujas velocidades dos respectivos pontos de massa são constantes durante um intervalo de tempo Δt , então pode ser facilmente calculada a posição dos pontos de massa no tempo $t = t_0 + \Delta t$, onde t_0 é o tempo inicial. Assim, as posições dos pontos de massa em \mathbb{R}^3 , podem ser definidas no seguinte conjunto de equações,

$$\begin{aligned} P_{x_0} &= P_{x_0}^0 + V_{x_0} t \\ P_{y_0} &= P_{y_0}^0 + V_{y_0} t \\ P_{z_0} &= P_{z_0}^0 + V_{z_0} t \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} P_{x_1} &= P_{x_1}^0 + V_{x_1} t \\ P_{y_1} &= P_{y_1}^0 + V_{y_1} t \\ P_{z_1} &= P_{z_1}^0 + V_{z_1} t \end{aligned} \quad (3.3)$$

onde as equações (3.2) e (3.3) representam o movimento dos pontos de massa P_0 e P_1 , com posições iniciais P_0^0 e P_1^0 respetivamente, no instante t_0 .

Agora, será necessário encontrar a velocidade relativa $\|\vec{V}\| = \|\vec{V}_{01}\| = \|\vec{V}_0 - \vec{V}_1\|$ que o sistema necessita para obter,

$$\|\vec{r}\|^2 = \|\vec{r}_{CAD}\|^2 \quad (3.4)$$

no tempo t .

Uma vez que $\|\vec{r}\|^2 = (P_{x_1} - P_{x_0})^2 + (P_{y_1} - P_{y_0})^2 + (P_{z_1} - P_{z_0})^2$, então,

$$\begin{aligned} \|\vec{r}\|^2 &= r_x^2 - 2tr_x V_x + V_x^2 t^2 \\ &\quad + r_y^2 - 2tr_y V_y + V_y^2 t^2 \\ &\quad + r_z^2 - 2tr_z V_z + V_z^2 t^2 \\ &= r^2 - 2trV \cos \delta + V^2 t^2 \end{aligned} \quad (3.5)$$

O termo do lado direito da equação (3.4), pode ser substituído como $r \sin \delta_{CAD}$, o qual pode ser facilmente observado na Figura (3.3). Deste modo, a equação (3.4) pode ser descrita como,

$$\begin{aligned} r^2 - 2trV \cos \delta + V^2 t^2 &= r^2 \sin^2 \delta_{CAD} \\ \Leftrightarrow \left(\frac{r}{t}\right)^2 \cos^2 \delta_{CAD} - 2\left(\frac{r}{t}\right) \cos \delta V + V^2 &= 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Resolvendo a equação em ordem a V , tem-se,

$$V = \frac{r}{t} \left(\cos \delta \pm \sqrt{\cos^2 \delta - \cos^2 \delta_{CAD}} \right) \quad (3.7)$$

onde é válida se e somente se $\delta \leq \delta_{CAD}$. ■

Corolário 3.1 (Condição de Interceção). *Considerando as condições do Lema (3.1), o ponto de massa P_0 interceta o ponto de massa P_1 quando,*

$$\delta_{CAD} = \delta = 0 \quad \Rightarrow \quad V = \dot{r} \quad (3.8)$$

Corolário 3.2 (Condição Suficiente de Prevenção de Colisão). *Seja um Sistema Objeto-Objeto, onde o ponto de massa P_1 com esfera de segurança de raio $\|\vec{r}_{CAD}\|$. Se as velocidades dos pontos de massa são constantes e se o vetor velocidade relativa \vec{V}_{01} for diferente de zero e $\|\vec{r}\| >$*

$\|\vec{r}_{CAD}\|$, então a Condição Suficiente de Prevenção de Colisão que garante a não interceção entre os pontos de massa P_0 e P_1 , é dada por,

$$\delta > \delta_{CAD}$$

onde δ é o ângulo formado pelo vetor velocidade relativa \vec{V}_{01} e a Linha de Vista \vec{r} . O ângulo δ_{CAD} é a metade do ângulo de abertura do Cone de Colisão definido num Sistema Objeto-Objeto.

Demonstração. A prova obtêm-se diretamente do Lema 3.1. ■

Teorema 3.2 (Conjunto de Soluções). *Considere-se um Sistema Objeto-Objeto, onde o ponto de massa P_1 tem uma Esfera de Colisão centrada nele, de raio $\|\vec{r}_{CAD}\|$, e em que se verifica $\|\vec{r}\| > \|\vec{r}_{CAD}\|$. Se o ponto de massa P_1 tiver velocidade constante \vec{V}_1 , então o conjunto de variações do vetor velocidade $\Delta\vec{V}$ do ponto de massa P_0 que produz a condição de não colisão com P_1 é dado por,*

$$\Gamma = \{\Delta\vec{V} \in \mathbb{R}^3 \mid \vec{V}_{01}^* = \vec{V}_{01} + \Delta\vec{V}; \arccos(\hat{V}_{01}^* \cdot \hat{r}) > \delta_{CAD}\}$$

onde \vec{V}_{01} é o vetor velocidade relativa, δ_{CAD} é metade do ângulo de abertura do Cone de Colisão e \hat{V}_{01}^* , \hat{r} são os vetores normalizados.

Demonstração. Por definição $\vec{V}_{01} = \vec{V}_0 - \vec{V}_1$, então procure-se o vetor velocidade \vec{V}_0^* que não ponha em colisão P_0 com P_1 , assim

$$\vec{V}_0^* = \vec{V}_0 + \Delta\vec{V} \tag{3.9}$$

Deste modo, o novo vetor velocidade relativa \vec{V}_{01}^* toma a seguinte forma,

$$\begin{aligned} \vec{V}_{01}^* &= \vec{V}_0^* - \vec{V}_1 \\ \Leftrightarrow \vec{V}_{01}^* &= \vec{V}_0 + \Delta\vec{V} - \vec{V}_1 \\ \Leftrightarrow \vec{V}_{01}^* &= \vec{V}_{01} + \Delta\vec{V} \end{aligned} \tag{3.10}$$

e pelo Corolário (3.2), a condição suficiente que garante a não colisão de P_0 com P_1 é,

$$\delta = \arccos(\hat{V}_{01}^* \cdot \hat{r}) > \delta_{CAD} \tag{3.11}$$

■

3.1.2 Generalização do Problema de Prevenção de Colisões

Até agora, o problema de prevenção de colisões foi estudado para o caso de duas aeronaves, será agora investigado o caso em que o número de aeronaves será maior ou igual a três $N \geq 3$, tentando generalizar a formulação atrás desenvolvida.

A ideia fundamental é expandir o Sistema Objeto-Objeto para mais que dois pontos de massa e assim criar um Sistema Objeto-Multi Objeto (Figura (3.4)), aproveitando a estrutura atrás definida e as leis obtidas. Desta forma, utilizando as mesmas definições para o caso de dois pontos de massa, bastará provar que é possível expandir e definir o conjunto de soluções para um número $N \geq 3$. Portanto, com base na definição (3.6), onde se constrói um Sistema Objeto-Multi Objeto, elaborou-se o Teorema (3.3), o qual conclui que é possível identificar quais as soluções, caso existam, para o problema de prevenção de colisões.

Poderá parecer excessivo o valor que se está a atribuir na identificação do conjunto de soluções para o problema de prevenção de colisões. Sendo perfeitamente legítimo por parte do leitor interrogar-se sobre a pertinência e relevância de tal resultado. Todavia, a forma como é enquadrado o problema e a forma como o conjunto de soluções é definido, é o reflexo de como o espírito operou na criação do juízo para resolver o problema. A definição do conjunto de soluções está estritamente ligada com a resolução do problema, porque percebendo que uma variação no vetor velocidade, da aeronave que pretende prevenir a colisão, provoca uma variação dos vetores de velocidade relativa na mesma direção do que a variação, então a solução para o problema está encontrada.

Definição 3.6 (Sistema Objeto-Multi Objeto). Considere-se o referencial $OXYZ$, onde o ponto de massa com posição P_0 e velocidade V_0 coincide com a origem do referencial. Suponha-se também que existem outros pontos de massa com posições P_i , não coincidentes, relativamente ao referencial $OXYZ$, e velocidades V_i , onde $i = 1, \dots, N - 1$, sendo N o número de pontos de massa. O sistema formado pelos N pontos de massa, onde os $N - 1$ pontos de massa estão separados da origem do referencial pela distância $\|\vec{r}_i\|$, é o chamado Sistema Objeto-Multi Objeto (Figura (3.5)).

Teorema 3.3 (Conjunto de Soluções Generalizado). Considere-se um Sistema Objeto-Multi Objeto, onde os pontos de massa P_i têm Esferas de Colisão centradas neles com raio $\|\vec{r}_{CAD_i}\|$, onde $\|\vec{r}_i\| > \|\vec{r}_{CAD_i}\|$. Se os pontos de massa P_i tiverem velocidade constante V_i , então o conjunto de variações $\Delta\vec{V}$ do vetor velocidade do ponto de massa P_0 , o qual produz uma condição de não colisão com os pontos de massa P_i , é dado por,

$$\Gamma = \{ \Delta\vec{V} \in \mathbb{R}^3 \mid \vec{V}_{0i}^* = \vec{V}_{0i} + \Delta\vec{V}; \arccos(\hat{V}_{0i}^* \cdot \hat{r}_i) > \delta_{CAD_i} \}$$

onde $i = 1, \dots, N - 1$, com N sendo o número de pontos de massa e \hat{V}_{0i}^* , \hat{r}_i os respetivos vetores normalizados.

Demonstração. Por definição $\vec{V}_{0i} = \vec{V}_0 - \vec{V}_i$, deste modo, é necessário encontrar o vetor velocidade \vec{V}_0^* que não ponha P_0 em colisão com os restantes P_i , então

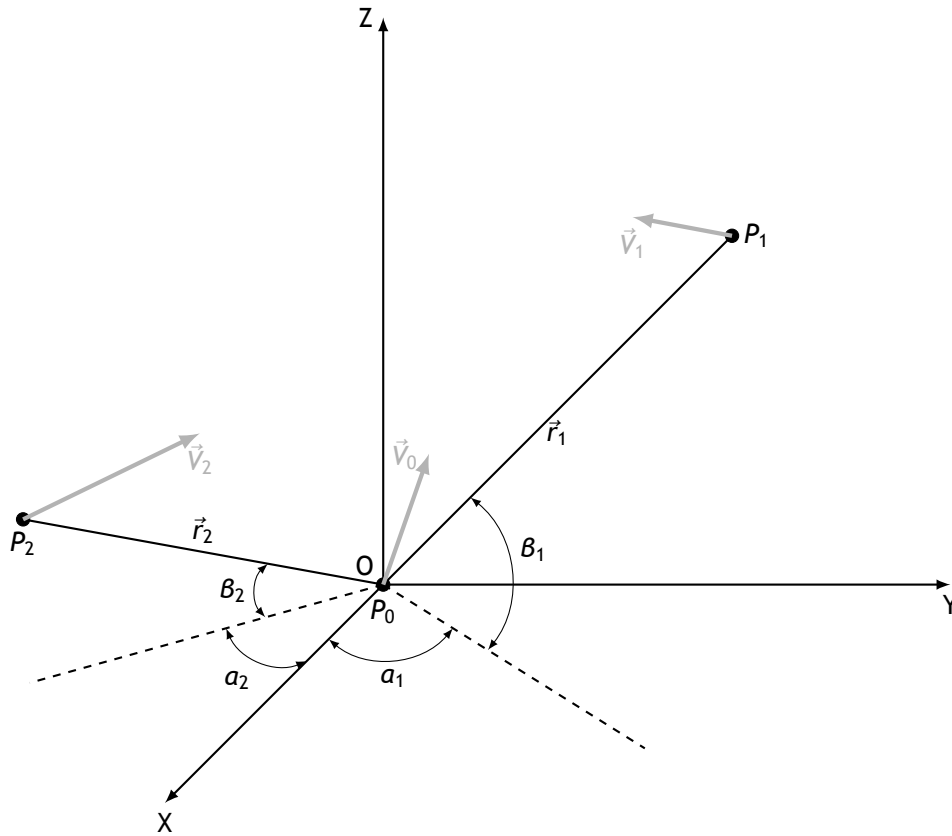


Figura 3.4: Sistema Objeto-Multi Objeto

$$\vec{V}_0^* = \vec{V}_0 + \Delta\vec{V} \quad (3.12)$$

Com isto, o novo vetor velocidade relativa \vec{V}_0^* toma a seguinte forma,

$$\begin{aligned} \vec{V}_{0i}^* &= \vec{V}_0^* - \vec{V}_i \\ \Leftrightarrow \vec{V}_{0i}^* &= \vec{V}_0 + \Delta\vec{V} - \vec{V}_i \\ \Leftrightarrow \vec{V}_{0i}^* &= \vec{V}_{0i} + \Delta\vec{V} \end{aligned} \quad (3.13)$$

e assim, aplicando o Teorema (3.2), a condição suficiente que garante a não colisão de P_0 com P_i , $i = 1, \dots, N - 1$, é,

$$\bar{\delta}_i = \arccos(\hat{V}_{0i}^* \cdot \hat{r}_i) > \bar{\delta}_{CAD_i} \quad (3.14)$$

■

Desta forma, tendo em conta o Teorema (3.3) é possível definir vários critérios para escolher a solução. Um dos critérios que poderá ser aplicado é o da variação mínima do vetor velocidade que previne a colisão, assim,

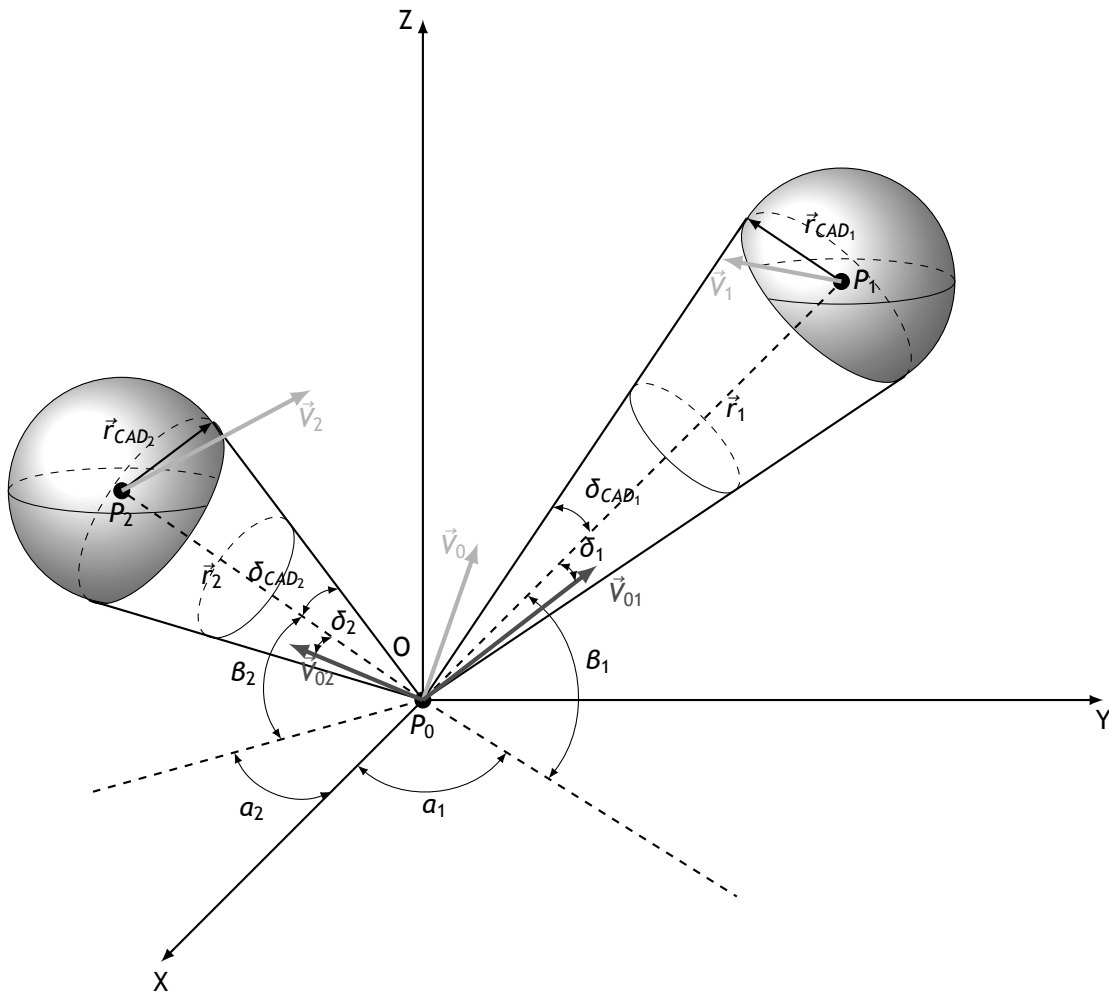


Figura 3.5: Cones de Colisão num Sistema Objeto-Multi Objeto

$$\underset{\Delta \vec{V} \in \Gamma_C \mathbb{R}^3}{\text{minimizar}} \quad \|\Delta \vec{V}\|^2 \quad (3.15)$$

contudo, as aeronaves possuem limitações dinâmicas, o que poderá inviabilizar a operação de evasão pelo não cumprimento dos limites dinâmicos, assim reformulando o critério (3.15) é possível incluir as limitações dinâmicas e restringir conjunto de soluções,

$$\begin{aligned} &\underset{\Delta \vec{V} \in \Gamma_C \mathbb{R}^3}{\text{minimizar}} \quad \|\Delta \vec{V}\|^2 \\ &\text{sujeito a} \quad \vec{V}_{min} \leq \vec{V} + \Delta \vec{V} \leq \vec{V}_{max} \end{aligned} \quad (3.16)$$

3.1.2.1 Análise Dinâmica do Problema de Prevenção de Colisões

Formulado o problema geral de prevenção de colisões e identificado o conjunto de soluções para o problema, é agora altura, de analisar em mais detalhe o assunto introduzido no final da secção anterior. Assim, quando a matéria em estudo são aeronaves em movimento, põe-se então o problema da dinâmica das aeronaves, que restringirá mais ainda o conjunto de

soluções acima identificado. Anteriormente limitou-se o conjunto de soluções de acordo com o limite mínimo e máximo de velocidade que cada aeronave é capaz de admitir. Põe-se agora a questão da aeronave ser capaz de cumprir a variação do vetor velocidade durante uma variação de tempo Δt .

Deste modo, o que se pretende então, é introduzir na formulação (3.16) restrições dinâmicas das aeronaves, e não só apenas limitar o vetor velocidade de navegação nos seus limites. O Teorema (3.4) pretende então demonstrar que se for possível encontrar uma solução para o problema (3.16) esta também resolve o problema dinâmico dos limites das variações de velocidade.

Teorema 3.4. *Considere-se um Sistema Objeto-Multi Objeto, onde os pontos de massa P_i têm Esferas de Colisão centradas neles com raio $\|\vec{r}_{CAD_i}\|$, onde $\|\vec{r}_i\| > \|\vec{r}_{CAD_i}\|$, com $i = 1, \dots, N - 1$ e N o número de pontos de massa. Se os pontos de massa P_i tiverem velocidade constante, então a formulação que resolve o problema de colisão,*

$$\begin{aligned} & \underset{\Delta \vec{V} \in \Gamma \subset \mathbb{R}^3}{\text{minimizar}} \quad \|\Delta \vec{V}\|^2 \\ & \text{sujeito a} \quad \vec{V}_{min} \leq \vec{V} + \Delta \vec{V} \leq \vec{V}_{max} \end{aligned} \quad (3.17)$$

resolve também o problema das restrições dinâmicas, caso a solução exista.

Demonstração. Considere-se Sistema Objeto-Multi Objeto com N pontos de massa, que agora são considerados aeronaves, as quais têm restrições dinâmicas. Suponha-se que, a aeronave P_0 , a qual se situa na origem do referencial $OXYZ$, deverá prevenir a colisão com as restantes aeronaves P_i , $i = 1, \dots, N - 1$ as quais têm velocidades constantes.

Se o problema (3.16) for resolvido, isto é, se for possível encontrar uma solução $\Delta \vec{V}$ a qual produz um novo vetor velocidade \vec{V}_0^* que não coloca a aeronave P_0 em colisão com as restantes aeronaves P_i , com $i = 1, \dots, N - 1$, então a aeronave P_0 deverá atingir o vetor velocidade \vec{V}_0^* num tempo fixo t^* , onde o vetor aceleração $\dot{\vec{V}}_0$ é dado por,

$$\dot{\vec{V}}_0 = \frac{\vec{V}_0^* - \vec{V}_0}{t^* - t} = \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} \leq \dot{\vec{V}}_0^{max} \quad (3.18)$$

sendo $\dot{\vec{V}}_0^{max}$ a aceleração máxima da aeronave P_0 . Analisando o resultado,

$$\Delta \vec{V} \leq \Delta t \dot{\vec{V}}_0^{max} \quad (3.19)$$

é possível concluir que a solução do problema (3.16), a qual é sempre o menor valor possível, resolve também os problemas dinâmicos se a variação do vetor velocidade $\Delta \vec{V}$, que resolve também (3.19), existe. ■

3.2 Solução do Problema

Percebida a formulação, bem como a construção do conjunto de soluções, quer-se agora entender como obter as soluções e resolver o problema (3.15). Talvez o primeiro impulso, seria submeter o problema a um processo de otimização, mas então, o trabalho que até aqui se teve, seria em vão, e provavelmente não se iria de encontro a um dos objetivos do trabalho que é calcular as soluções do problema de prevenção de colisões de uma forma computacionalmente eficiente e o mais determinística possível.

Assim sendo, e como já foi referido anteriormente, a construção do conjunto de soluções tem muito a ver, como foi idealizado o problema. A solução que irá ser construída, não é uma solução analítica, pois o problema, como o conjunto de soluções o demonstra, poderá ter infinitas soluções. Será proposto então, uma solução algorítmica bastante simples, que irá ser explicada nos próximos parágrafos.

Comece-se então por se considerar um Sistema Objeto-Multi Objeto, onde o ponto de massa situado na origem deste referencial pretende não estar em colisão com os restantes pontos de massa do sistema. O conjunto de soluções identificado no Teorema (3.3), indica qual o procedimento a ter para encontrar a solução, mesmo que à primeira vista não pareça. Assim, uma variação da velocidade $\Delta\vec{V}$ do ponto de massa, ou aeronave, na origem do sistema provocará uma variação em todos os vetores de velocidade relativa ao ponto na origem, na mesma direção e intensidade. Poderá não parecer, mas o problema está resolvido, o que se quer então, é uma variação $\Delta\vec{V}$ capaz de retirar todos os vetores de velocidade relativa (ao ponto de massa na origem) de dentro dos respetivos cones de colisão. A Figura (3.6), pretende mostrar isso mesmo, e além disso, mostrar também uma disposição o mais genérica possível dos vetores de velocidade relativa, pois, eles podem estar dentro do cone de colisão, fora dele e até mesmo na fronteira.

Tendo em conta a Figura (3.6), é possível observar que dada uma direção \hat{e} , encontram-se várias soluções para cada um dos casos. Relativamente ao ponto P_1 existem várias soluções mínimas (duas das quais na fronteira), relativamente ao ponto P_2 existe uma solução mínima, quanto ao ponto P_3 o qual não está em colisão, segundo a direção \hat{e} qualquer variação $\Delta\vec{V}$ não colocará P_0 em colisão com P_3 . Deste modo, a solução, tendo por base o problema (3.15), é escolher qual das variações tem menor magnitude.

Posto isto, o procedimento para encontrar uma solução, será escolher uma direção \hat{e} e ao longo dessa direção projetar o vetor velocidade relativa \vec{V}_{0i} , $i = 1, \dots, N - 1$ no cone de colisão e daí calcular a diferença entre o vetor de velocidade relativa e as projeções, obtendo deste modo o vetor variação de velocidade $\Delta\vec{V}$.

Todavia, podem surgir dúvidas acerca de como calcular a referida projeção. Trata-se de uma projeção, no sentido geral, oblíqua, a qual pode ser encontrada construindo um plano formado pelo vetor \vec{V}_{0i} e a direção \hat{e} , plano esse que pode ser identificado pelo vetor normal \hat{n} . Após isto, será necessário calcular a interseção do plano com o cone de colisão e deste modo projetar o vetor velocidade relativa \vec{V}_{0i} ao longo da direção \hat{e} na direção das interseções encontradas.

Assim, o plano formado pelo vetor velocidade relativa \vec{V}_{0i} e a direção \hat{e} as velocidades projetadas \hat{v}^{proj} é dado por,

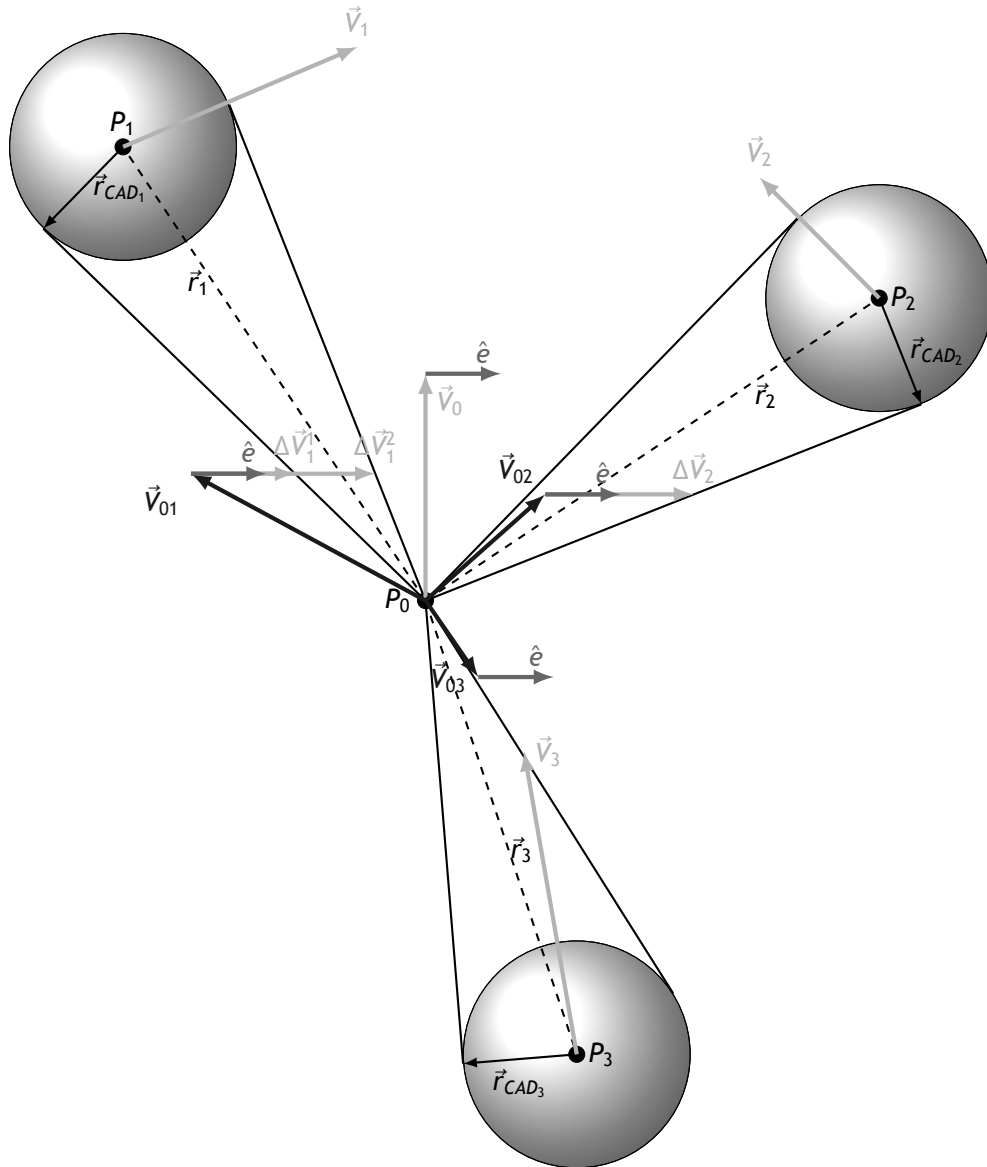


Figura 3.6: Variação dos vetores velocidade $\Delta\vec{V}$ na direção \hat{e}

$$\hat{v}^{proj} \cdot \hat{n} = 0 \quad (3.20)$$

Por outro lado, a equação do cone de colisão pode ser representada por,

$$\hat{v}^{proj} \cdot \hat{r} = \cos \delta_{CAD} \quad (3.21)$$

onde \hat{n} é o produto externo produzido por \vec{r} e \vec{V} .

Juntando as equações (3.20), (3.21) e adicionando uma restrição de unidade, o sistema a ser resolvido toma a seguinte forma,

$$\begin{cases} \hat{V}^{proj} \cdot \hat{n} = 0 \\ \hat{V}^{proj} \cdot \hat{r} = \cos \delta_{CAD} \\ \|\hat{V}^{proj}\|^2 = 1 \end{cases} \quad (3.22)$$

onde \hat{V}^{proj} é a projeção ou projeções do vetor velocidade relativa \vec{V}_{0i} .

Deve ser salientado que o sistema de equações poderá não ter soluções, pode acontecer que a direção \hat{e} produza um ângulo nulo ou de π radianos com o vetor velocidade relativa \vec{V}_{0i} , o que inviabilizará a projeção. Também pode acontecer que \vec{V}_{0i} esteja fora do cone de colisão ou na superfície do cone de colisão, e a direção \hat{e} produzir um plano que não intercepe o cone de colisão.

Construído e resolvido o sistema de equações (3.22), é necessário agora analisar as suas soluções, pois, o sistema a resolver é reduzido a uma equação quadrática, no entanto, só uma das soluções é necessária. Esta análise, é de alguma relevância para a construção futura dos algoritmos, assim, e em primeiro de tudo, é necessário saber se o vetor velocidade relativa \vec{V}_{0i} está ou não dentro do cone de colisão. Se estiver (Figura (3.7)), então o sistema tem apenas uma solução, senão o sistema tem duas soluções (Figura (3.8)).

No primeiro caso a solução pode ser encontrada pela análise entre ângulos \vec{V}_{0i} , \hat{e} . Como pode ser analisado na Figura (3.7), é possível definir o ângulo θ_1 formado pelos vetores \vec{V}_{0i} e \hat{e} , θ_2 e θ_3 são os ângulos formados pelo vetor \hat{e} pela primeira e segunda solução respetivamente. Por fim, θ_4 e θ_5 são os ângulos formados pelo vetor \vec{V}_{0i} e a primeira e segunda solução respetivamente. Posto isto, a solução que satisfaz o requisito da direção, é aquela cuja soma $\theta_1 + \theta_2 + \theta_4$ ou $\theta_1 + \theta_3 + \theta_5$ seja igual π radianos.

No segundo caso, que acontece quando o vetor velocidade relativa \vec{V}_{0i} está fora do cone de colisão, como se pode constatar na Figura (3.8), não existe um exame muito crítico a fazer, pois, ambas as soluções são válidas, porque a direção \hat{e} produz uma projeção \hat{V}^{proj} nos dois lados do cone de colisão. No entanto, só se irá escolher uma, e será aquela que provocará uma maior magnitude do vetor de variação de velocidade $\|\Delta\vec{V}\|$, o que é a projeção mais oposta.

3.2.1 Algoritmos

No seguimento desta exposição, é proposto agora um possível algoritmo para calcular a solução do problema de prevenção de colisões. Na verdade irão ser propostos três algoritmos, os quais pretendem-se adaptar a situações diferentes, no entanto o cálculo da solução terá sempre o mesmo procedimento.

O primeiro algoritmo (3.1), é na realidade, o procedimento para calcular a solução entre duas aeronaves, onde a trajetória de evasão é computada numa dada direção \hat{e} . Sabendo os vetores posição \vec{r} e velocidade \vec{V} relativos, o algoritmo (3.1) computará a variação de velocidade $\Delta\vec{V}$ na direção \hat{e} .

Todavia é necessário enquadrar os algoritmos o mais possível numa situação real. Ainda não foram discutidas, as duas principais situações em que o problema de prevenção de colisões

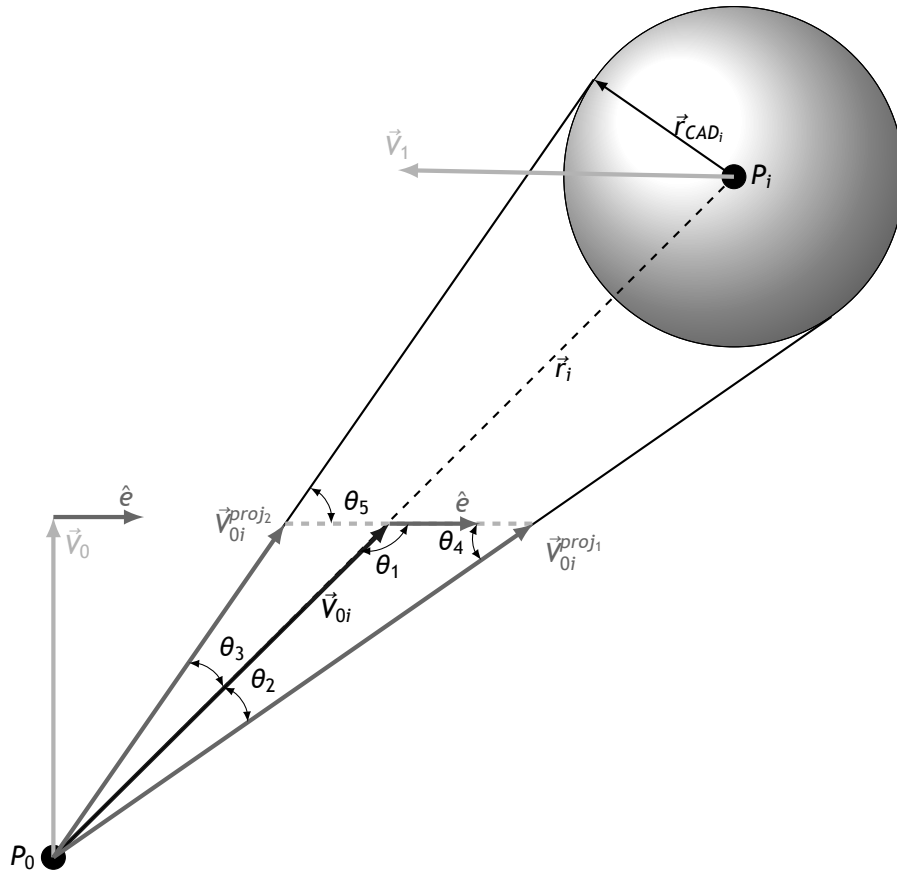


Figura 3.7: Computação da variação do vetor velocidade $\Delta\vec{V}$ quando dentro do Cone de Colisão

se pode enquadrar. No Capítulo 4, irão ser propostas duas arquiteturas para um possível Sistema Autónomo de Prevenção de Colisões, são elas, uma arquitetura descentralizada e uma arquitetura centralizada. Na primeira, parte-se do pressuposto que o sistema de prevenção de colisões é idealizado à imagem de um Sistema Objeto-Multi Objeto, isto é, a aeronave na origem pretende não colidir com nenhuma das outras, não interessando se as restantes estão em colisão umas com as outras, à semelhança de um TCAS, mas de prevenção global. Na segunda arquitetura, a centralizada, parte-se do pressuposto que um determinado sistema terá a informação de todas as aeronaves envolventes e computará a trajetória de evasão para cada uma delas. É aqui, que o sistema de prioridades, referido no início deste Capítulo, toma grande importância, caso contrário seria bastante difícil idealizar um sistema centralizado. Cada aeronave que faz parte do sistema, terá uma prioridade bem definida e é essa prioridade que especificará a sequência com que as sucessivas trajetórias de evasão serão calculadas.

No algoritmo (3.1), a primeira ação a tomar, é normalizar os vetores \hat{e} , \hat{V} e \hat{r} , desta forma, constrói-se o plano \hat{n} . Tendo os elementos necessários, resolver-se-á o sistema de equações (3.22) onde serão computadas as soluções e será identificado o número de soluções, com isto, a análise a fazer é a acima referida, computando a variação do vetor velocidade $\|\Delta\vec{V}\|$. Este procedimento é em tudo idêntico ao utilizado, tanto na arquitetura descentralizada como numa arquitetura centralizada.

Até aqui a solução foi procurada numa direção \hat{e} , agora nas duas topologias propostas irá ser proposto procurar uma solução em M direções \hat{e} . Assim numa topologia descentralizada (algoritmo (3.2)) é necessário definir o número N de aeronaves que estão envolvidas no sistema e

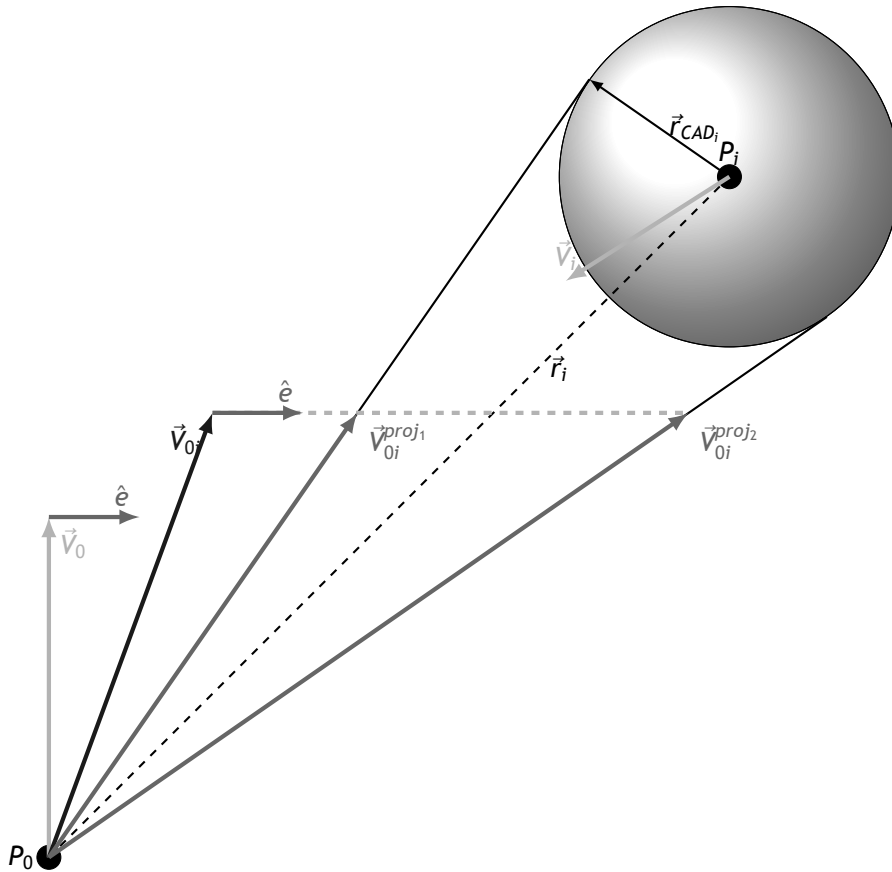


Figura 3.8: Computação da variação do vetor velocidade $\Delta\vec{V}$ quando fora do Cone de Colisão

encontrar a solução para a direção em concreto, isto é, para cada direção \hat{e} irá ser escolhido o vetor de variação velocidade com máxima magnitude. Calculados todos os vetores de variação para todas as direções, um critério possível é escolher aquele com menor magnitude.

Numa topologia centralizada o procedimento, por sua vez, parte do princípio que todas as aeronaves não poderão colidir, assim, há necessidade de criar um sistema de prioridades em que sequencialmente se irá aplicar o algoritmo da topologia descentralizada e assim tentar resolver todas as colisões. O algoritmo (3.2) pretende retratar isso mesmo, a principal diferença é que agora precisa-se de especificar as prioridades. No Capítulo 4, o sistema de prioridades será visto em mais detalhe, por agora, basta garantir que o processo de resolução garanta alguma sequência, desta forma, como existem N aeronaves a cada uma será dado um índice. No algoritmo (3.2) isso é garantido pelo índice j do ciclo principal (o mais externo). Também é importante referir, que após o cálculo das soluções das aeronaves mais prioritárias, as suas soluções serão utilizadas para calcular as soluções das aeronaves menos prioritárias. Isto poderá não estar muito claro, mas nas secções a seguir vai ser melhor exposto.

Anteriormente, deu-se ênfase, à eficiência computacional de um algoritmo de prevenção de colisões, pois a sua implementação num sistema real condicionará a eficácia deste. Esta eficiência, dependerá de muitos aspetos, como os recursos físicos à disposição, dos compiladores da linguagem de implementação, dos métodos matemáticos utilizados entre outros. No entanto, pode-se fazer uma pequena análise para prever a performance dos algoritmos propostos, utilizando para isso, a notação Big- O , onde é possível definir um limite máximo para o tempo de computação.

Considerando primeiro, o algoritmo (3.2), o qual exprime uma computação de soluções para uma topologia descentralizada, é possível observar que existem dois loops, que dependem do número de aeronaves N e do número de direções M de busca da solução. O número de operações dentro do loop mais interno não aumenta com o número de aeronaves nem com o número de direções, da mesma forma que as operações dentro do loop externo e fora do loop interno, também não aumentam. Assim, a função de tempo $T_D(N, M)$ que representa o consumo de tempo computacional do algoritmo (3.2), depende apenas e só do número de aeronaves e do número de direções, sendo possível representar através da notação Big- O , a complexidade do tempo de execução da seguinte forma,

$$T_D(N, M) = O(N \cdot M) \quad (3.23)$$

onde é possível verificar que o algoritmo tem uma complexidade de tempo polinomial.

Fazendo agora uma análise idêntica para o algoritmo (3.3), onde a topologia é centralizada, pode ser constatado que agora existem três loops. A quantidade de operações continua a depender do número de aeronaves e do número de direções, mas agora depende ainda mais do número de aeronaves. Assim, a função de tempo que representa o consumo de tempo computacional do algoritmo (3.3), pode ser exprimida da seguinte forma,

$$T_C(N, M) = O(N^2 \cdot M) \quad (3.24)$$

continuando a ter uma complexidade de tempo computacional polinomial. No entanto, comparando os dois algoritmos, é fácil de verificar que o algoritmo (3.3) tem um grau polinomial maior que o algoritmo (3.2), como seria de esperar.

3.3 Projeto de Trajetórias

Nas secções anteriores, foi elaborado um método com a intenção de resolver o problema de prevenção de colisões globalmente. Para isso, foram criadas algumas hipóteses e elaborado um mecanismo de resolução baseando-se no conjunto de soluções. Foram também introduzidas, questões como a dinâmica das aeronaves no processo de escolha da solução. Todavia, a questão da influência do comportamento dinâmico na resolução do problema ainda não está totalmente clarificada.

Anteriormente foi verificado, que a solução escolhida (caso exista) que se baseia na mínima magnitude do vetor variação velocidade, também satisfará os requisitos da dinâmica da aeronave. No entanto, o problema que se coloca agora, é saber se as aeronaves cumprem a trajetória de evasão definida pela solução, e a verdade é que não. O proposto conjunto de soluções é identificado para um instante t , o que pressupõe que a aeronave aplique a solução instantaneamente, isto é, no instante t . Ora, a menos que as leis da física possam ser superadas, não parece que as aeronaves por menos massa que tenham consigam aplicar movimentos tão instantaneamente, assim a solução que foi encontrada, na realidade nunca poderá ser aplicada no instante t , o que inviabilizaria todo o trabalho até agora realizado.

 Algoritmo 3.1: Algoritmo Geral de Prevenção de Colisões

Input: $\vec{r}; \vec{V}; \vec{e}$

Output: $\Delta\vec{V}$

```

1:  $\hat{e} \leftarrow \vec{e}$ 
2:  $\hat{V} \leftarrow \vec{V}$ 
3:  $\hat{r} \leftarrow \vec{r}$ 
4:  $\hat{n} \leftarrow \hat{e} \times \hat{V}$ 
5:  $[s, \hat{V}^{proj}] \leftarrow$  Resolver os sistema de equações (3.22)
6:  $s$  : Número de Soluções
7: if  $s = 0$  then
8:   return  $\Delta\vec{V} \leftarrow \vec{0}$ 
9: else
10:  if  $s=1$  then
11:    return  $\hat{V}^{proj_1} \vee \hat{V}^{proj_2}$ 
12:  else if  $s = 2$  then
13:     $\theta_1 \leftarrow \arccos(-\hat{V} \cdot \hat{e})$ 
14:     $\theta_2 \leftarrow \arccos(\hat{V}^{proj_1} \cdot \hat{e})$ 
15:     $\theta_3 \leftarrow \arccos(\hat{V}^{proj_2} \cdot \hat{e})$ 
16:     $\theta_4 \leftarrow \arccos(\hat{V}^{proj_1} \cdot \hat{V})$ 
17:     $\theta_5 \leftarrow \arccos(\hat{V}^{proj_2} \cdot \hat{V})$ 
18:    if  $||(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) - \pi|| < \varepsilon$  then
19:       $\hat{V}^{proj} \leftarrow \hat{V}^{proj_1}$ 
20:    else if  $||(\theta_1 + \theta_3 + \theta_5) - \pi|| < \varepsilon$  then
21:       $\hat{V}^{proj} \leftarrow \hat{V}^{proj_2}$ 
22:    end if
23:  end if
24: end if
25:  $\theta = \frac{\pi}{2}$  : Ângulo de Rotação
26:  $\hat{e} \leftarrow \hat{e} \cos \theta + (\hat{n} \times \hat{e}) \sin \theta + \hat{n}(\hat{n} \cdot \hat{e})(1 - \cos \theta)$ 
27:  $\vec{V}^{proj} \leftarrow \hat{V}^{proj} (\hat{e}^T \hat{V}^{proj})^{-1} \hat{e}^T \vec{V}$ 
28:  $\Delta\vec{V} \leftarrow \vec{V}^{proj} - \vec{V}$ 

```

Algoritmo 3.2: Algoritmo de Prevenção de Colisões numa Topologia Descentralizada

Input: $\vec{r}_i, \vec{V}_i, i = 1 \dots N; \vec{e}_j, j = 1 \dots M$
Output: $\Delta \vec{V}_k, k = 2 \dots N$

- 1: N : Número de Aeronaves
- 2: M : Número de Direções \hat{e}
- 3: **for** $k = 1$ to M **do**
- 4: $\hat{e}_k \leftarrow \vec{e}_k$
- 5: **for** $i = 1$ to $N - 1$ **do**
- 6: $\hat{V}_{0i} \leftarrow \vec{V}_{0i}$
- 7: $\hat{r}_{0i} \leftarrow \vec{r}_{0i}$
- 8: $\hat{n} \leftarrow \hat{e}_k \times \hat{V}_{0i}$
- 9: $[s, \hat{V}_{0i}^{proj}] \leftarrow$ Resolver os sistema de equações (3.22)
- 10: s : Número de Soluções
- 11: **if** $s = 0$ **then**
- 12: $\Delta \vec{V}_{0i} \leftarrow \vec{0}$
- 13: **else**
- 14: **if** $s=1$ **then**
- 15: **return** $\hat{V}_{0i}^{proj_1} \vee \hat{V}_{0i}^{proj_2}$
- 16: **else if** $s = 2$ **then**
- 17: $\theta_1 \leftarrow \arccos(-\hat{V}_{0i} \cdot \hat{e}_i)$
- 18: $\theta_2 \leftarrow \arccos(\hat{V}_{0i}^{proj_1} \cdot \hat{e}_i)$
- 19: $\theta_3 \leftarrow \arccos(\hat{V}_{0i}^{proj_2} \cdot \hat{e}_i)$
- 20: $\theta_4 \leftarrow \arccos(\hat{V}_{0i}^{proj_1} \cdot \hat{V}_{0i})$
- 21: $\theta_5 \leftarrow \arccos(\hat{V}_{0i}^{proj_2} \cdot \hat{V}_{0i})$
- 22: **if** $||(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) - \pi|| < \varepsilon$ **then**
- 23: $\hat{V}_{0i}^{proj} \leftarrow \hat{V}_{0i}^{proj_1}$
- 24: **else if** $||(\theta_1 + \theta_3 + \theta_5) - \pi|| < \varepsilon$ **then**
- 25: $\hat{V}_{0i}^{proj} \leftarrow \hat{V}_{0i}^{proj_2}$
- 26: **end if**
- 27: **end if**
- 28: **end if**
- 29: $\theta = \frac{\pi}{2}$: Ângulo de Rotação
- 30: $\hat{e}_i \leftarrow \hat{e}_i \cos \theta + (\hat{n} \times \hat{e}_i) \sin \theta + \hat{n}(\hat{n} \cdot \hat{e}_i)(1 - \cos \theta)$
- 31: $\vec{V}_{0i}^{proj} \leftarrow \hat{V}_{0i}^{proj} (\hat{e}_i^T \hat{V}_{0i}^{proj})^{-1} \hat{e}_i^T \vec{V}_{0i}$
- 32: $\Delta \vec{V}_{0i} \leftarrow \vec{V}_{0i}^{proj} - \vec{V}_{0i}$
- 33: **end for**
- 34: $\Delta \vec{V}_k \leftarrow \max ||\Delta \vec{V}_{0i}||^2$
- 35: **end for**
- 36: $\Delta \vec{V} \leftarrow \min ||\Delta \vec{V}_k||^2$

Algoritmo 3.3: Algoritmo de Prevenção de Colisões numa Topologia Centralizada

Input: $\vec{r}_i, \vec{V}_i, i = 1 \dots N; \vec{e}_j, j = 1 \dots M$
Output: $\Delta \vec{V}_k, k = 2 \dots N$

- 1: N : Número de Aeronaves
- 2: M : Número de Direções \hat{e}
- 3: **for** $j = N - 2$ **to** 0 **do**
- 4: **for** $k = 1$ **to** M **do**
- 5: $\hat{e}_k \leftarrow \vec{e}_k$
- 6: **for** $i = j$ **to** $N - 1$ **do**
- 7: $\hat{V}_{ji} \leftarrow \vec{V}_{ji}$
- 8: $\hat{r}_{ji} \leftarrow \vec{r}_{ji}$
- 9: $\hat{n} \leftarrow \hat{e}_k \times \hat{V}_{ji}$
- 10: $[s, \hat{V}_{ji}^{proj}] \leftarrow$ Resolver os sistema de equações (3.22)
- 11: s : Número de Soluções
- 12: **if** $s = 0$ **then**
- 13: $\Delta \vec{V}_{ji} \leftarrow \vec{0}$
- 14: **else**
- 15: **if** $s=1$ **then**
- 16: **return** $\hat{V}_{ji}^{proj_1} \vee \hat{V}_{ji}^{proj_2}$
- 17: **else if** $s = 2$ **then**
- 18: $\theta_1 \leftarrow \arccos(-\hat{V}_{ji} \cdot \hat{e}_i)$
- 19: $\theta_2 \leftarrow \arccos(\hat{V}_{ji}^{proj_1} \cdot \hat{e}_i)$
- 20: $\theta_3 \leftarrow \arccos(\hat{V}_{ji}^{proj_2} \cdot \hat{e}_i)$
- 21: $\theta_4 \leftarrow \arccos(\hat{V}_{ji}^{proj_1} \cdot \hat{V}_{ji})$
- 22: $\theta_5 \leftarrow \arccos(\hat{V}_{ji}^{proj_2} \cdot \hat{V}_{ji})$
- 23: **if** $\|(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) - \pi\| < \varepsilon$ **then**
- 24: $\hat{V}_{ji}^{proj} \leftarrow \hat{V}_{ji}^{proj_1}$
- 25: **else if** $\|(\theta_1 + \theta_3 + \theta_5) - \pi\| < \varepsilon$ **then**
- 26: $\hat{V}_{ji}^{proj} \leftarrow \hat{V}_{ji}^{proj_2}$
- 27: **end if**
- 28: **end if**
- 29: **end if**
- 30: $\theta = \frac{\pi}{2}$: Ângulo de Rotação
- 31: $\hat{e}_i \leftarrow \hat{e}_i \cos \theta + (\hat{n} \times \hat{e}_i) \sin \theta + \hat{n}(\hat{n} \cdot \hat{e}_i)(1 - \cos \theta)$
- 32: $\vec{V}_{ji}^{proj} \leftarrow \hat{V}_{ji}^{proj} (\hat{e}_i^T \hat{V}_{ji}^{proj})^{-1} \hat{e}_i^T \vec{V}_{ji}$
- 33: $\Delta \vec{V}_{ji} \leftarrow \vec{V}_{ji}^{proj} - \vec{V}_{ji}$
- 34: **end for**
- 35: $\Delta \vec{V}_k \leftarrow \max \|\Delta \vec{V}_{ji}\|^2$
- 36: **end for**
- 37: $\Delta \vec{V}_j \leftarrow \min \|\Delta \vec{V}_k\|^2$
- 38: $\vec{V}_j \leftarrow \vec{V}_j + \Delta \vec{V}_j$
- 39: **end for**

Porém, este problema pode ser contornado, contudo, continua a ser um requisito que qualquer tentativa de solucionar este problema não prejudique em demasia a eficiência computacional. O método que irá ser proposto, para resolver o cumprimento da trajetória de evasão por parte das aeronaves, não interferirá com a computação da solução sugerida anteriormente.

O que realmente se pretende é que a aeronave evasiva cumpra realmente a variação de velocidade proposta, e como é uma variação de velocidade se for aplicada para além do tempo t a trajetória já é diferente. Então, será necessário prever as trajetórias das aeronaves num tempo $t + \Delta t$ quando aplicado uma variação de velocidade $\Delta \vec{V}$. Deste modo, o que aeronave deverá cumprir, ou é uma trajetória definida entre $[t, t + \Delta t]$ ou um waypoint de quatro dimensões, isto é um ponto espacial tridimensional associado com um tempo $t + \Delta t$. Utilizando este mecanismo será possível garantir que a aeronave cumpra a trajetória de evasão, se dinamicamente for possível.

De seguida, irá ser analisado um modelo de navegação para que seja possível não só calcular trajetórias de evasão mas também waypoints de evasão. A ideia, é tentar resolver analiticamente o sistema de navegação o mais possível, e quando houver essa impossibilidade aplicar um método de discretização para extrair a solução.

3.3.1 Sistema Dinâmico de Navegação

O primeiro procedimento, é definir qual o modelo dinâmico de navegação a utilizar e depois analisá-lo com vista a resolvê-lo. O sistema de equações escolhido (3.25), representa o movimento dinâmico tridimensional de um ponto de massa num referencial ENU¹ (East North Up) geodético. V , γ e ψ representam a velocidade, ângulo de trajetória e ângulo entre a projeção da trajetória no plano EN do referencial ENU e o paralelo correspondente, respetivamente. Enquanto que λ , φ e h representam a Longitude, Latitude e Altitude respetivamente, por fim R representa o raio da Terra.

$$\dot{\lambda}(t) = \frac{V(t) \cos \gamma(t) \cos \psi(t)}{(R + h(t)) \cos \varphi(t)} \quad (3.25a)$$

$$\dot{\varphi}(t) = \frac{V(t) \cos \gamma(t) \sin \psi(t)}{R + h(t)} \quad (3.25b)$$

$$\dot{h}(t) = V(t) \sin \gamma(t) \quad (3.25c)$$

O objetivo é então, resolver este sistema de equações para um intervalo de tempo. Analisando as equações (3.25), pode ser observado que são dependentes do tempo, todavia, presume-se que para um dado intervalo de tempo o vetor de orientação (V , γ e ψ) tem um valor constante. Assim, considera-se que o tempo t satisfaça a seguinte inclusão,

$$t \in [t_k, t_{k+1}] \quad (3.26)$$

onde as variáveis de navegação são consideradas constantes, com os seguintes valores,

¹O referencial ENU, é um sistema de coordenadas cartesianas construído num plano tangente à esfera terrestre, onde o eixo das abcissas aponta para Este, o eixo das ordenadas para Norte e o eixo z aponta para fora da esfera

$$\begin{aligned}V(t) &= V \\ \gamma(t) &= \gamma \\ \varphi(t) &= \varphi\end{aligned}\tag{3.27}$$

Para propósitos de notação, é assumido que,

$$t_0 = t_k\tag{3.28}$$

e

$$\begin{aligned}V(t_0) &= V_0 \\ \gamma(t_0) &= \gamma_0 \\ \varphi(t_0) &= \varphi_0\end{aligned}\tag{3.29}$$

Posto isto, o sistema dinâmico de equações (3.25) toma a seguinte forma,

$$\dot{\lambda}(t) = \frac{V \cos \gamma \cos \psi}{(R + h(t)) \cos \varphi(t)}\tag{3.30a}$$

$$\dot{\varphi}(t) = \frac{V \cos \gamma \sin \psi}{R + h(t)}\tag{3.30b}$$

$$\dot{h}(t) = V \sin \gamma\tag{3.30c}$$

e daqui em diante é assumido que as soluções a procurar estarão no intervalo de tempo (3.26).

3.3.1.1 Solução do Sistema

Definido o sistema a utilizar, quer-se agora resolvê-lo. É possível observar que a variação da altitude \dot{h} não depende da longitude λ nem da latitude φ , por sua vez, a variação da latitude $\dot{\varphi}$ depende apenas da longitude λ . Sendo assim, é possível resolver diretamente a equação diferencial da variação da altitude, aproveitando a solução desta para calcular a solução da equação diferencial da variação da latitude, e no fim analisar se é possível obter diretamente a solução da equação diferencial da variação da longitude.

Começando então por encontrar a equação da altitude, temos,

$$h(t) = h_0 + V \sin \gamma (t - t_0)\tag{3.31}$$

Substituindo a equação (3.31) na equação diferencial $\dot{\varphi}(t)$, continua a ser possível encontrar uma solução diretamente, como se segue,

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \frac{\sin \psi}{\tan \gamma} \ln \left[1 + \frac{V \sin \gamma}{R + h_0} (t - t_0) \right]\tag{3.32}$$

contudo, a solução tem várias singularidades quando o ângulo de trajetória γ toma os valores $k\pi$, $\forall k \in \mathbb{N}$. Passando a equação (3.32) ao limite, a singularidade pode ser resolvida,

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \varphi(t) = \varphi_0 + \frac{V \sin \psi}{R + h_0} (t - t_0) \quad (3.33)$$

assim a latitude em ordem ao tempo $\varphi(t)$ pode ser representada por uma função por troços em ordem a γ ,

$$\varphi(t) = \begin{cases} \varphi_0 + \frac{\sin \psi}{\tan \gamma} \ln \left[1 + \frac{V \sin \psi}{R + h_0} (t - t_0) \right] & , \gamma \neq k\pi; \forall k \in \mathbb{N} \\ \varphi_0 + \frac{V \sin \psi}{R + h_0} (t - t_0) & , \gamma = k\pi; \forall k \in \mathbb{N} \end{cases} \quad (3.34)$$

Substituindo agora as soluções (3.31) e (3.34) na equação dinâmica da longitude, já não é possível obter uma solução analítica diretamente. Ao que, torna-se relativamente importante encontrar um método numérico para resolver a equação. Não é do âmbito deste trabalho, fazer um estudo dos métodos existentes e promover uma comparação entre eles. Contudo o método a ser escolhido, não sê-lo-á de forma ingénua.

É possível encontrar na literatura vários métodos para resolver equações diferenciais, desde diferenças finitas, elementos finitos e métodos espectrais. Qualquer deles, nesta altura, podia ser utilizado, mas como irá ser visto mais à frente, no Capítulo 4, uma das possibilidades das aeronaves receberem a trajetória de evasão é por função temporal, definindo em cada instante o posicionamento da aeronave, ou por intermédio de um waypoint em $4D$. Este facto, resolve em grande parte a escolha, pois torna-se mais simples trabalhar no espaço de funções com os métodos espectrais, da mesma forma que trajetórias mais complexas conseguem ser melhor definidas através deles [38, 49]. Do ponto de vista computacional, também os métodos espectrais conseguem ter uma melhor performance em comparação com os outros, quando bem implementados.

Os métodos espectrais que irão ser utilizados, são os métodos pseudo-espectrais, onde na realidade a função não é analisada em todo o seu espectro, mas sim, em alguns pontos propositalmente escolhidos, os quais revelam boas propriedades na aproximação de toda a função. É possível verificar, em aproximação de funções, que os métodos pseudo-espectrais necessitam de menos pontos para convergir para uma solução com menor erro do que aqueles que utilizam diferenças e elementos finitos [11, 53].

Assim, um método pseudo-espectral, utilizando polinómios de Chebyshev construídos nos pontos de Gauss-Lobatto, será proposto para prever a trajetória da longitude. É de salientar que apenas irá ser proposto o método para calcular o waypoint $4D$, num tempo dado, pois, questões como a geração de trajetórias otimizadas para a performance das aeronaves e o controlo para seguir as trajetórias, não fazem parte do âmbito deste trabalho.

3.3.1.2 Aplicação do Método Pseudo-espectral

Os polinómios de Chebyshev serão a base utilizada para construir uma aproximação ao problema, todavia, existem outras bases que podiam ser da mesma forma utilizadas. Não se irá à procura de propriedades específicas e especiais para a resolução deste problema, bastará que

a ortogonalidade seja verificada, para que seja relativamente fácil construir uma aproximação da longitude λ . Em futuros trabalhos, em que o projeto de trajetórias poderá ser necessário, aí talvez seja relevante uma melhor análise na escolha das bases, por agora os polinómios de Chebyshev preenchem o propósito a que se destinam.

Como o objetivo é encontrar o waypoint final, a escolha dos pontos ou nós onde a aproximação será feita tem alguma relevância, pois será mais preciso o valor final se o conjunto de nós contiver o ponto final do que se não o tiver. Assim, foram escolhidos os pontos de colocação de Gauss-Lobatto, os quais contêm os pontos finais do intervalo a aproximar.

Fundamentos Matemáticos

Será agora apresentado, sucintamente, o processo de resolução da variação da longitude λ com base na aproximação pseudo-espectral. A ideia base por detrás dos métodos espectrais é a construção de uma sequência de funções $\varphi_n(t)$, as quais definem na totalidade um determinado domínio e que combinando-as entre si seja possível aproximar uma determinada função $f(t)$, tal que,

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \varphi_n(t) \quad (3.35)$$

onde os coeficientes a_n são normalmente designados por *coeficientes de peso* ou também *coeficientes de Fourier*.

Escolhido o espaço de funções onde estão definidas $\varphi_n(t)$, o procedimento agora é encontrar a melhor combinação de coeficientes a_n que minimize o erro entre a função que se quer aproximar e a sua função de aproximação. O referido erro pode ser calculado usando as propriedades do produto interno generalizado definido no Espaço de Hilbert, deste modo, minimize-se então a seguinte expressão,

$$\min_{a_n \in \mathbb{R}^{\infty}} \langle f(t) - \sum_{n=0}^{\infty} a_n \varphi_n(t), u(t) \rangle \quad (3.36)$$

onde $u(t)$ é uma função de peso.

Uma possível tentativa para resolver (3.36) é escolher para $u(t)$ uma função que seja ortogonal a $\varphi(t)$ e assim os coeficientes a_n tomam a seguinte forma,

$$a_n = \langle f(t), \varphi_n(t) \rangle \quad (3.37)$$

repondo na equação (3.35) tem-se

$$f(t) = \sum_{j=0}^N f_j C_j^N(t) \quad (3.38)$$

onde $C_j^N(t)$ é a denominada *função Cardinal* definida como,

$$C_j^N(t) = \sum_{n=0}^N \varphi_n(t_j) \varphi_n(t) \quad (3.39)$$

sendo f_j os valores da função $f(t)$ nos pontos de quadratura.

Como foi referido irão ser utilizados os polinómios de Chebyshev construídos nos pontos de Gauss-Lobatto. Nestes pontos a função de aproximação toma exatamente os mesmos valores do que a função real, assim, para a longitude λ a aproximação pode ser executada da seguinte forma,

$$\lambda(t) = \sum_{j=0}^N \bar{\lambda}_j C_j^N(t) \quad (3.40)$$

sendo $C_j^N()$ a *função Cardinal*,

$$C_j^N(t) = \frac{2}{Nc_j} \sum_{n=0}^N \frac{T_n(t_j)T_n(t)}{c_n} \quad (3.41)$$

construída nos polinómios de Chebyshev $T_n(t)$,

$$T_n(t) = \cos(n \arccos(t)) \quad (3.42)$$

e nos pontos de Gauss-Lobatto t_j ,

$$t_j = \cos\left(\frac{\pi j}{N}\right) \quad ; \quad j = 0, \dots, N \quad (3.43)$$

onde $\bar{\lambda}_j$ são os valores da longitude nos pontos de Gauss-Lobatto e em que os coeficientes $c_j = 2$ se $j = 0$ ou N , e $c_j = 1$ se $j = 1, \dots, N - 1$ fazem com que à *função Cardinal* seja atribuído o delta de Kronecker δ_{ji} .

Contudo, o que se sabe da longitude é apenas a sua primeira derivada, ao que é necessário identificar a forma da primeira derivada da função de aproximação,

$$\dot{\lambda}(t) = \sum_{j=0}^N \bar{\lambda}_j \frac{d}{dt} C_j^N(t) = \sum_{j=0}^N \bar{\lambda}_j D_j^N(t) \quad (3.44)$$

a qual também tem propriedades interessantes nos pontos de Gauss-Lobatto, permitindo simplificar da seguinte forma,

$$\dot{\lambda}(t_i) = \sum_{j=0}^N \bar{\lambda}_j D_j^N(t_i) = \sum_{j=0}^N \bar{\lambda}_j D_{ji}^N \quad (3.45)$$

com,

$$D_{ji}^N = \begin{cases} \frac{1+2N^2}{6} & , i = j = 0 \\ -\frac{1+2N^2}{6} & , i = j = N \\ -\frac{t_j}{2(1-t_j^2)} & , i = j; 0 < j < N \\ (-1)^{i+j} \frac{c_j}{c_j(t_i-t_j)} & , i \neq j \end{cases} \quad (3.46)$$

onde $c_j = 2$ se $j = 0$ ou N , e $c_j = 1$ se $j = 1, \dots, N-1$.

Definida a primeira derivada da aproximação da longitude, o procedimento agora é, definir um número N de pontos de colocação, isto é, de pontos de Gauss-Lobatto e definir tanto D_{ji} como $\hat{\lambda}_j$. Deste modo, os coeficientes ou valores de longitude $\bar{\lambda}_j$ nos pontos de Gauss-Lobatto podem ser encontrados resolvendo o sistema linear de equações (3.45). Todavia, é também necessário resolver o problema de Cauchy, pois o ponto inicial λ_0 influenciará o ponto final, resolvendo a equação (3.40) para o ponto inicial e subtraindo a λ_0 é possível encontrar o valor que corrige a trajetória $\hat{\lambda}_0$.

Neste sentido, a equação (3.40) pode ser reescrita para o ponto inicial λ_0 ,

$$\lambda(t) = \hat{\lambda}_0 + \sum_{j=0}^N \bar{\lambda}_j C_j^N(t) \quad (3.47)$$

com $\hat{\lambda}_0$,

$$\hat{\lambda}_0 = \lambda_0 - \sum_{j=0}^N \bar{\lambda}_j C_j^N(\pi) \quad (3.48)$$

Aplicação

Explicados os princípios base da técnica pseudo-espectral a utilizar, segue-se agora a demonstração e explicação de uma possível implementação computacional. O algoritmo (3.4) retrata o processo de computação do waypoint 4D num tempo t_f , sabendo que num tempo t_0 um ponto espacial é definido pela posição λ_0 , φ_0 , h_0 e está animado com velocidade constante.

Uma das especificações ou *input* do algoritmo que pode suscitar mais dúvida é a escolha do número de pontos de Gauss-Lobatto M . Esta escolha é no mínimo um compromisso entre a performance computacional e a precisão da solução (do erro residual), pelo que, não existe uma fórmula para definir com exatidão este número. Todavia, a paridade do número M também influencia a existência ou não da inversa da matriz D_{ij} , pois esta é uma matriz anti-simétrica.

Neste sentido, o algoritmo (3.4) é um pouco daquilo do que se tem vindo a explicar. A altitude e a latitude têm solução direta, a partir das soluções analíticas encontradas anteriormente, com elas é possível construir a matriz D_{ij} em cada ponto t_i e assim aplicar um processo de otimização linear para computar a longitude, por fim é necessário corrigir a trajetória para o ponto inicial especificado, obtendo desta forma o waypoint 4D.

Algoritmo 3.4: Algoritmo de Computação da Trajetória de Evasão

Input: $t, t_f, \lambda_0, \varphi_0, h_0, M$
Output: $\lambda(t), \varphi(t), h(t)$

- 1: M : Número de pontos de Gauss-Lobatto
- 2: t : Tempo Atual
- 3: t_f : Tempo no Waypoint de Destino
- 4: λ_0 : Longitude Atual
- 5: φ_0 : Latitude Atual
- 6: h_0 : Altitude Atual
- 7: $\tau \leftarrow \lceil (t_f - t)/2 \rceil$
- 8: $V \leftarrow V(t_f)$
- 9: $\gamma \leftarrow \gamma(t_f)$
- 10: $\psi \leftarrow \psi(t_f)$
- 11: $N \leftarrow M - 1$
- 12: **for** $i = 0$ to N **do**
- 13: $t_i \leftarrow \lceil \cos(\frac{\pi i}{N})(t_f - t) + t_f + t \rceil / 2$
- 14: $\bar{h}_i \leftarrow h(t_i, h_0, V, \gamma)$
- 15: $\bar{\varphi}_i \leftarrow \varphi(t_i, \varphi_0, h_i, V, \gamma, \psi)$
- 16: $\bar{\lambda}_i \leftarrow \tau \lambda(t_i, h_j, \varphi_j)$
- 17: $D_{ji} \leftarrow$ Substituindo na Equação (3.46)
- 18: **end for**
- 19: $\bar{\lambda}_i \leftarrow \min \|\bar{\lambda}_i - D_{ji} \bar{\lambda}_i\|^2$
- 20: $\bar{\lambda}_0 \leftarrow \lambda(\pi)$
- 21: $\hat{\lambda}_0 \leftarrow \lambda_0 - \bar{\lambda}_0$
- 22: $\lambda(t_f) \leftarrow \bar{\lambda}_0 + \hat{\lambda}_0$
- 23: $\varphi(t_f) \leftarrow$ Equação (3.32)
- 24: $h(t_f) \leftarrow$ Equação (3.31)

3.4 Prevenção de Colisões Baseada no Controlo Preditivo

Até aqui, foi possível identificar o espaço de soluções para o problema de prevenção de colisões global, porém, como foi referido a solução só é válida para um instante de tempo t , pelo que, num cenário real é preciso mais do que encontrar a solução, é também necessário prever o comportamento dinâmico provocado pela solução e desta forma garantir que a solução consiga ser executada. A combinação dos dois métodos propostos, o método de identificação e cálculo da solução agregado à técnica pseudo-espectral de previsão da trajetória, pode ser visto como uma técnica de controlo preditivo.

O controlo preditivo, mais propriamente o MPC, é uma técnica bastante utilizada na indústria para controlar processos das mais variadas aplicações, tendo mesmo aplicações no problema de prevenção de colisões [6, 10, 15]. O enorme sucesso destes métodos na indústria, é devido ao facto de os processos que se querem controlar não o poderem ser, de forma constante, isto é, não é possível estar sempre a atuar num sistema cuja resposta é lenta, ou os mecanismos de atuação não o permitem. Assim sendo, a filosofia do MPC, reside em conhecer o comportamento do processo a controlar para que seja possível prever o seu comportamento e controlá-lo.

Fazendo uso da linguagem de controlo, também a prevenção de colisões, não é um processo em que o controlo das colisões seja de constante atuação, mais ainda, existe a necessidade de prever os estados futuros, o posicionamento, com base no estado atual e o controlo a aplicar,

a solução da prevenção de colisões. Neste sentido, é possível assumir o modelo de navegação geodético acima utilizado, em que o estado é a posição geodética e o controlo a velocidade nas sua componentes.

Na literatura é possível encontrar variadíssimas aproximações do método MPC a problemas de controlo, contudo é possível identificar os princípios comuns a cada uma delas,

- i. Predição do estado num horizonte de tempo H ,
- ii. Otimização de um determinado critério,
- iii. Aplicação do controlo obtido ao sistema.

Na sua essência o MPC é uma técnica na qual o comportamento futuro do sistema é previsto num determinado horizonte de tempo. Com o conhecimento do comportamento passado e futuro do sistema, e tendo em conta especificações impostas é possível através de um processo de otimização obter no horizonte de tempo os controlos descretizados, isto é, em cada divisão de tempo do horizonte está especificado o controlo a aplicar. Contudo, uma característica interessante, daí o sucesso dos métodos MPC, é que no processo de otimização é possível especificar que o comportamento futuro do sistema dependerá apenas dos primeiros controlos, permanecendo os restantes constantes até terminar o horizonte.

Interessa agora relacionar e explicar melhor o interesse deste tópico com o restante trabalho e até mesmo com o próprio título. Como já foi referido, o método de computação da solução do problema de prevenção de colisões agregado à técnica de geração de trajetória, pode ser compreendido como uma técnica de MPC. Na verdade, a linha de pensamento que está por detrás do presente estudo, é tratar o problema de prevenção de colisões como um problema de controlo, e o método que oferecia um melhor enquadramento, devido à capacidade de prever trajetórias e aplicar os primeiros controlos é o MPC.

Neste sentido, o mais lógico era aplicar um método MPC diretamente ao problema de prevenção de colisões, no entanto, não era possível garantir que a solução para o problema de prevenção de colisões fosse garantida nem que a resposta computacional fosse determinística. Então o problema teve de ser contornado, de maneira que, a solução para o problema de prevenção fosse efetivamente calculada.

Contudo, não foi necessário um grande esforço para que a filosofia do MPC aplicado ao problema de prevenção de colisões fosse retida, o problema figurava-se apenas numa questão de semântica. Como foi referido, uma técnica de MPC pressupõe que exista uma previsão do estado e utilizando essa mesma previsão é possível identificar qual o controlo a aplicar para obter um determinado estado. Então, parte do trabalho foi realizado quando identificada a solução para o problema de prevenção de colisões. Pois, recordando agora o método desenvolvido, a solução é baseada num método geométrico que usa o conceito de cone de colisão, o que por si só, já é um conceito de previsão de trajetória. Somando a isto o facto do que a solução é obtida através do processo de otimização em (3.17), tem-se parte do MPC aplicado. Agora, interessa relacionar a aplicação do controlo de uma técnica MPC, com o que foi elaborado anteriormente.

A solução para o problema de prevenção de colisões é uma velocidade, pelo que, só poderá ser utilizada diretamente como mecanismo controlo em termos teóricos, pois como foi refe-

rido, era necessário que as leis da física, tal qual como se conhecem, fossem possíveis de ser transgredidas. Assim, houve a necessidade de criar outro mecanismo de controlo das colisões, tendo por base a previsão da trajetória, com a solução aplicada, num determinado horizonte de tempo e daí prever o posicionamento a quatro dimensões. Com este procedimento, é possível garantir que a solução é aplicável (caso exista e se dinamicamente possível).

O leitor poderá questionar-se da relação deste “controlo” com o da filosofia do MPC na verdade, a resposta já foi dada, se o “controlo” fosse a velocidade este teria de ser funcional dependente do tempo e da solução, ao que teria de ser aplicada em cada instante do horizonte temporal, assim, transformando a velocidade num posicionamento $4D$ é possível apenas atuar uma só vez no sistema, esperando até um novo horizonte para aplicar um novo controlo.

Por exemplo, considere-se o sistema dinâmico de navegação descrito na secção anterior (equações 3.25). Considerando este sistema como um processo de controlo tem-se,

$$X = [\lambda, \varphi, h] \quad ; \quad U = [V, \gamma, \Psi] \quad (3.49)$$

onde X são variáveis de estado e U as variáveis de controlo. Imagine-se agora um conjunto de aeronaves N onde é pretendido que cada uma delas se desvie a menor distância possível da sua trajetória de referência.

Caso seja considerado um intervalo de tempo discreto $t \in [t_0, t_0 + H, \dots, t_M]$ temos, para cada aeronave o seguinte objetivo,

$$\min J(U_0, \dots, U_{M-1}) = \|S(t) - S^*(t)\|^2 \quad (3.50)$$

onde $S(t)$ é a trajetória atual, $S^*(t)$ a trajetória nominal e U_0, \dots, U_{M-1} os controlos obtidos do processo de optimização para cada instante no intervalo de tempo t . Note-se que o processo acima subentende-se que não haverão colisões.

Pode-se agora tentar juntar o processo de cada aeronave num só objetivo. Tendo em conta o sistema de prioridades que tem vindo a ser discutido ao longo deste trabalho, temos,

$$\min J(U_0^0, \dots, U_{M-1}^0, \dots, U_0^{N-1}, \dots, U_{M-1}^{N-1}) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i \|S^i(t) - S^{i*}(t)\|^2 \quad (3.51)$$

onde w_i é a prioridade de cada aeronave. Desta forma, o objetivo é encontrar os controlos U para cada aeronave em cada instante, minimizando o desvio da trajetória nominal e que ao mesmo tempo evite quaisquer colisões.

Todavia, os controlos $(U_1^0, \dots, U_{M-1}^0, \dots, U_1^{N-1}, \dots, U_{M-1}^{N-1})$ não são importantes. Sendo o objetivo principal evitar as colisões, é necessário apenas o controlo U_0^i uma vez que o processo vai ser novamente calculado no instante $t_0 + H$ e assim sucessivamente. Com isto, o processo anterior toma a seguinte forma,

$$\min_{U \in \Gamma} J(U_0^0, \dots, U_0^{N-1}) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i \|S^i(t^*) - S^{i*}(t^*)\|^2 \quad (3.52)$$

onde Γ é o conjunto de soluções generalizado calculado anteriormente e $t^* \in [t_0, t_0 + H]$.

Posto isto, o sistema automático de prevenção de colisões globais, baseado numa filosofia MPC, deverá ter um procedimento, como se descreve de seguida (Figura 3.9),

- i. Após recolhidos os dados de todas as aeronaves no instante t , encontra-se a solução do problema (3.17), no qual é computada a evasão (Algoritmo 3.2 ou 3.3);
- ii. Para um horizonte de tempo H , prever as trajetórias de todas as aeronaves entre o instante t e o instante $t+H$, aplicando a técnica pseudo-espectral ao modelo dinâmico de navegação com a solução computada no passo anterior (Algoritmo 3.4);
- iii. Por fim extrair os waypoints $4D$ do passo anterior e enviá-los para as aeronaves.

Para um melhor entendimento do procedimento sugerido, é agora exemplificada uma atuação do sistema perante um problema de prevenção de colisões. O cenário a imaginar envolve três aeronaves em colisão umas com as outras, como representado na figura (3.10). Os pontos P_0 , P_1 e P_2 representam as três aeronaves num determinado instante t e com velocidades \vec{V}_0 , \vec{V}_1 e \vec{V}_2 . Também estão representados os pontos de destinos para um tempo τ , para cada aeronave, as quais estão alinhadas em direção a esses pontos de destino. Mais ainda, para efeitos de prioridade considera-se que a aeronave mais prioritária é a P_0 e a menos prioritária a P_2 .

Serão agora considerados duas intervenções do SAPC, para controlar as colisões. No instante t , representado na figura (3.10), o SAPC recolhe os dados de posicionamento e velocidade das respetivas aeronaves, computa a solução para um tempo $t + H$, e envia para cada aeronave o respetivo waypoint para o tempo $t + H$. Como o SAPC despenderá algum tempo no cálculo das soluções, no momento em que a solução é entregue as aeronaves já não estão mais na posição do tempo t , mas como é analisado o futuro da trajetória é possível que as aeronaves cumpram a sua trajetória de evasão. Na figura (3.11), estão representadas as trajetórias de cada uma das aeronaves após atuação do SAPC, como a aeronave P_0 é a mais prioritária, não foi necessário tomar qualquer ação, enquanto que as outras duas tiveram de alterar as suas trajetórias.

O mesmo procedimento é agora repetido para o tempo $t + H$. Novamente o SAPC recolherá os dados das aeronaves e computará a solução para um tempo $t + 2H$. Como em $t + H$ só existe uma possível colisão de P_2 com P_1 , se P_2 tomar o vetor para o ponto de destino, então o SAPC apenas ordenou a mudança de trajetória a P_2 . P_1 como não está mais em colisão com P_0 pode tomar a trajetória em direção ao destino, como visível na figura (3.12).

Finalmente, em $t + 2H$, o SAPC torna a executar o mesmo procedimento, no entanto, não existem mais colisões ao que a aeronave P_2 não necessitará de tomar qualquer procedimento de evasão, e poderá tomar a direção para o ponto de destino, como ilustrado na figura (3.13)

Relativamente ao valor de H numa aplicação específica, este dependerá de vários fatores como o número de aeronaves, o tempo de computação, o tipo de trajetória desejada entre outros. Porém, o horizonte H deverá ser o suficiente para que a nova solução seja entregue às aeronaves em $t + H$.

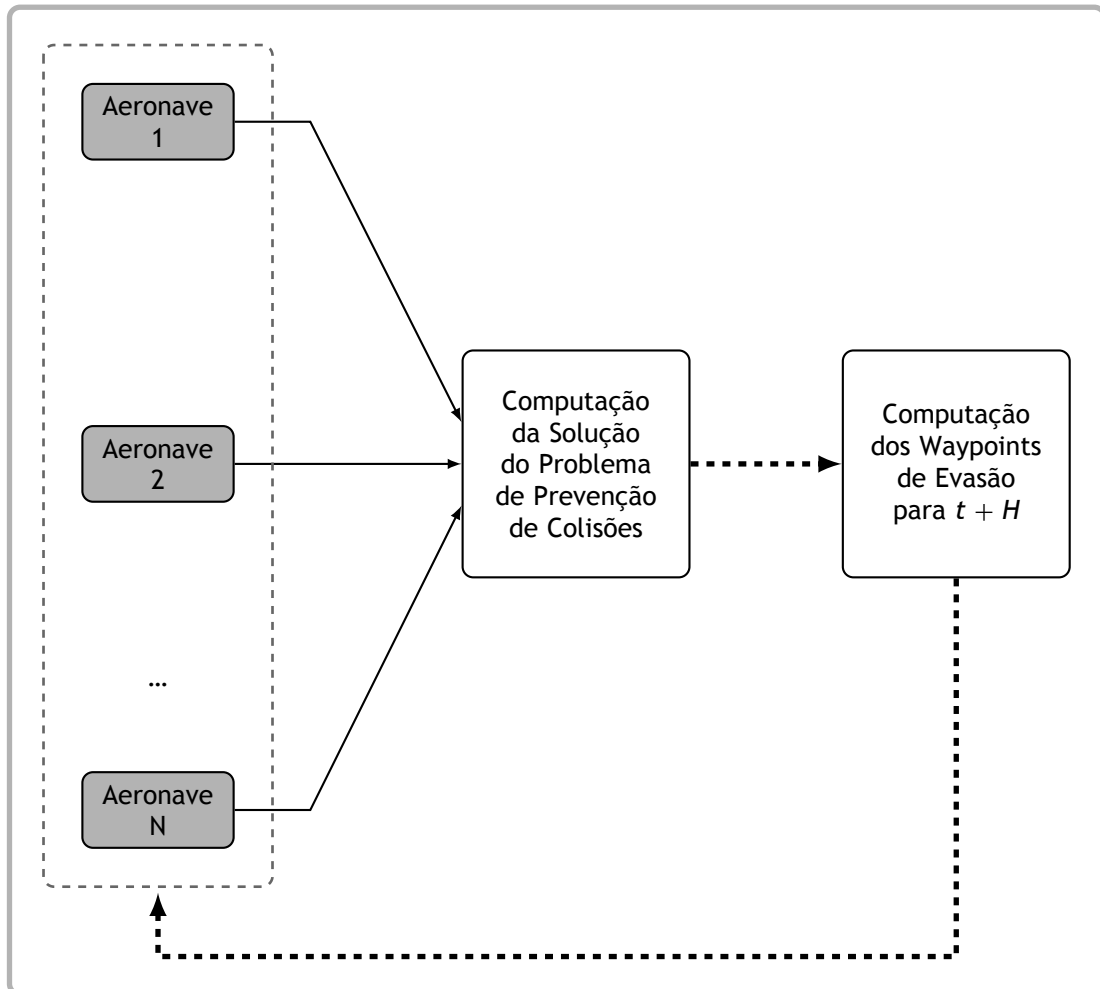


Figura 3.9: Estrutura da Simulação de Tempo Real Proposta

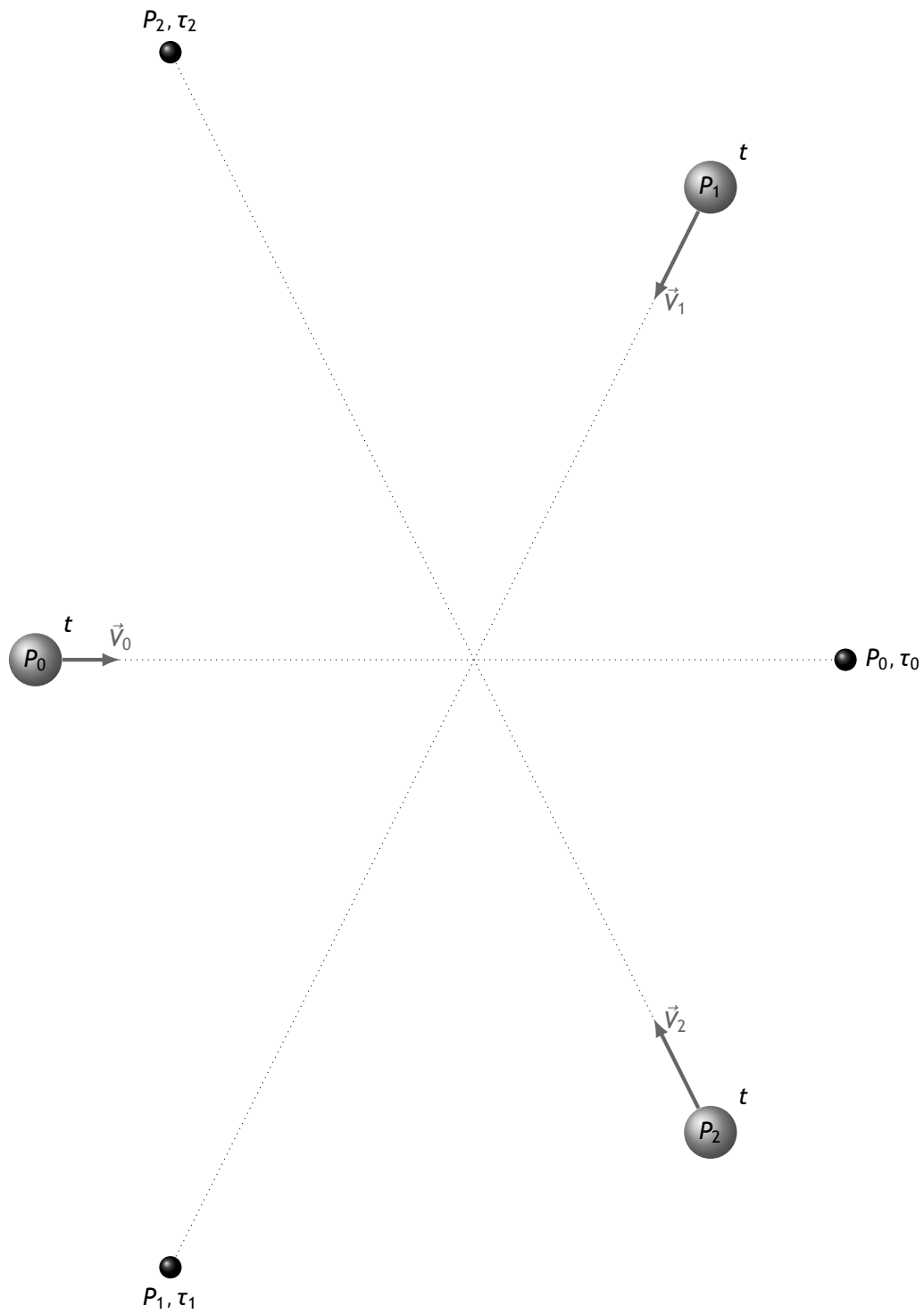


Figura 3.10: Posicionamento das aeronaves no tempo t

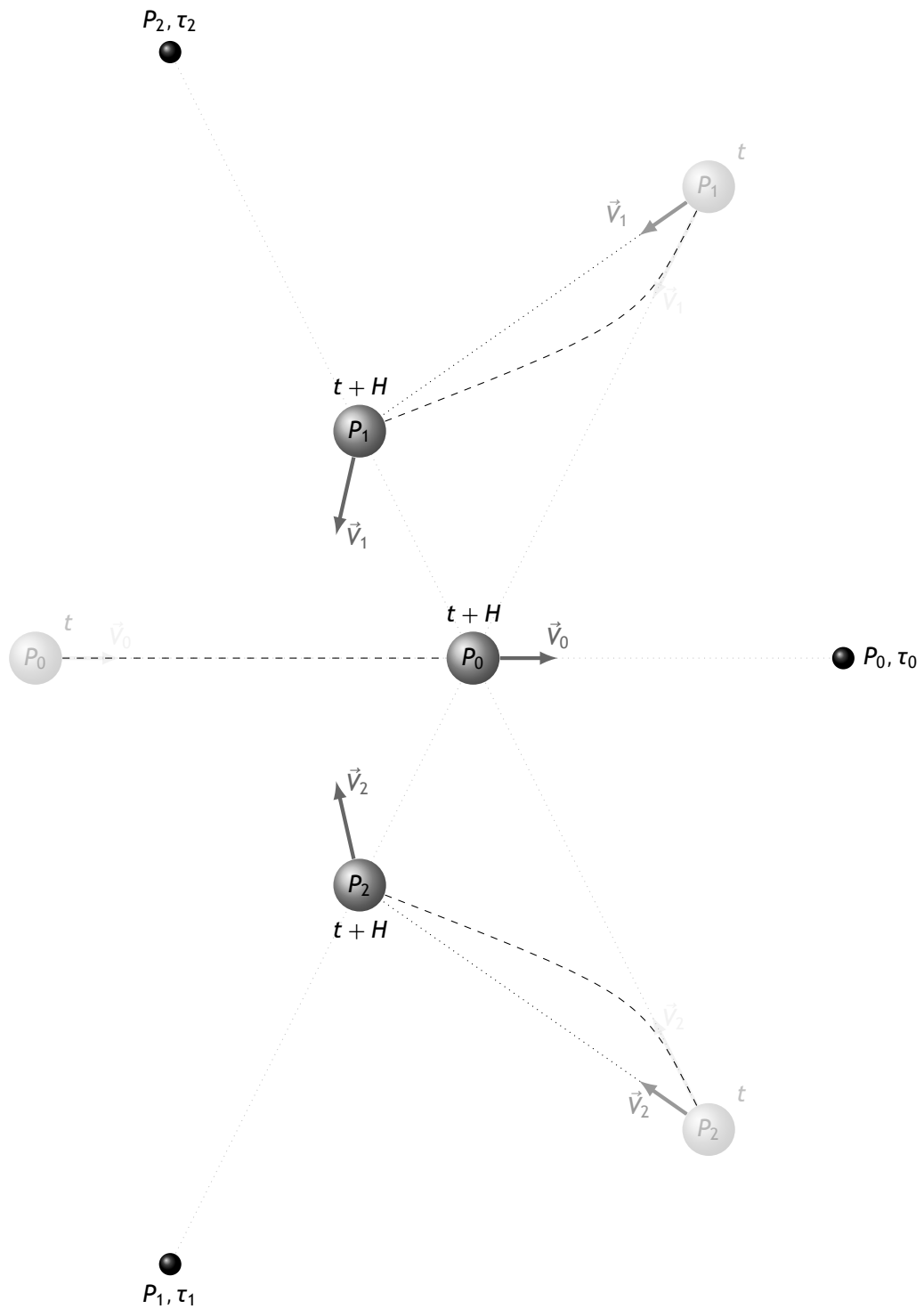


Figura 3.11: Posicionamento das aeronaves no tempo $t + H$

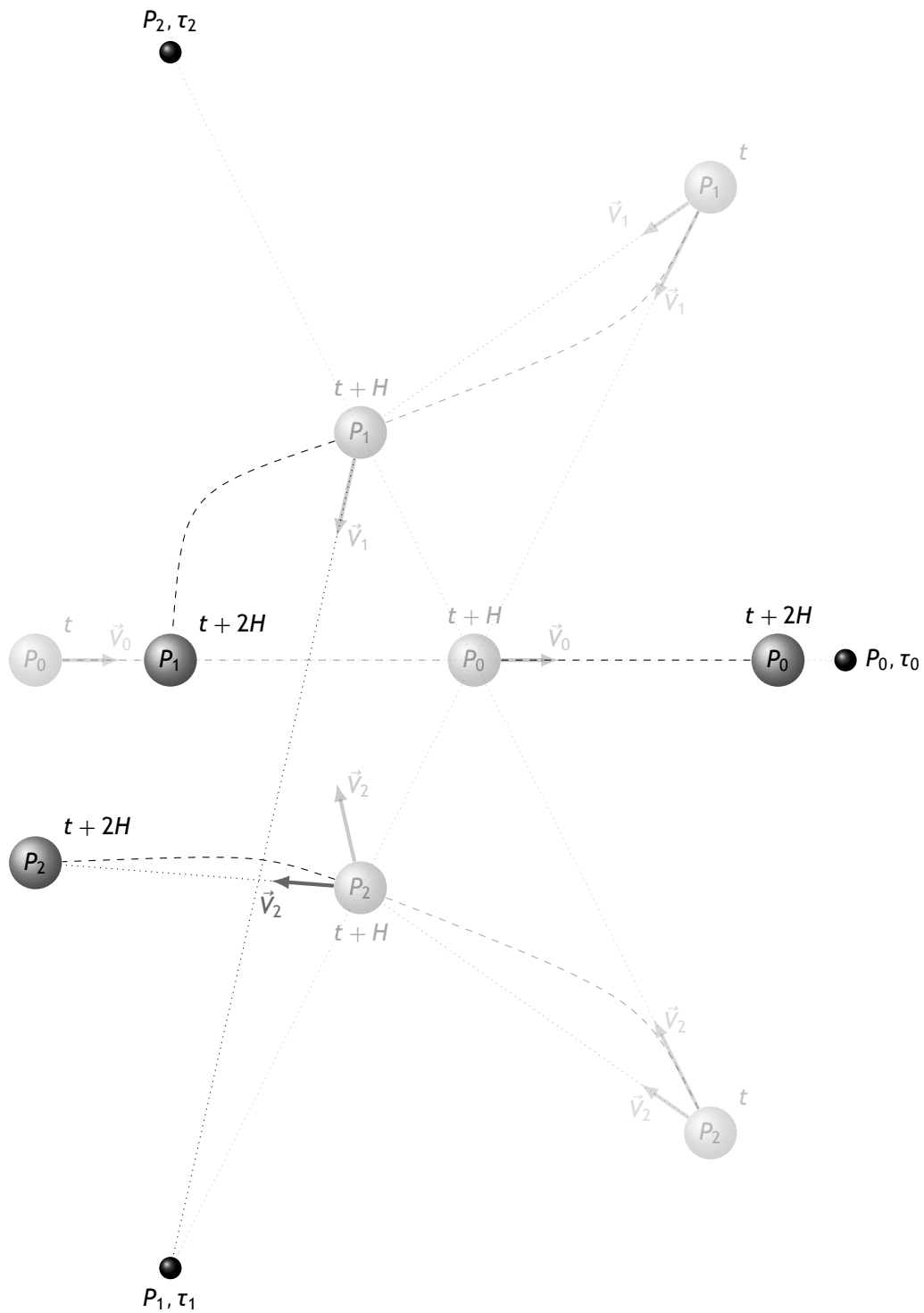


Figura 3.12: Posicionamento das aeronaves no tempo $t + 2H$

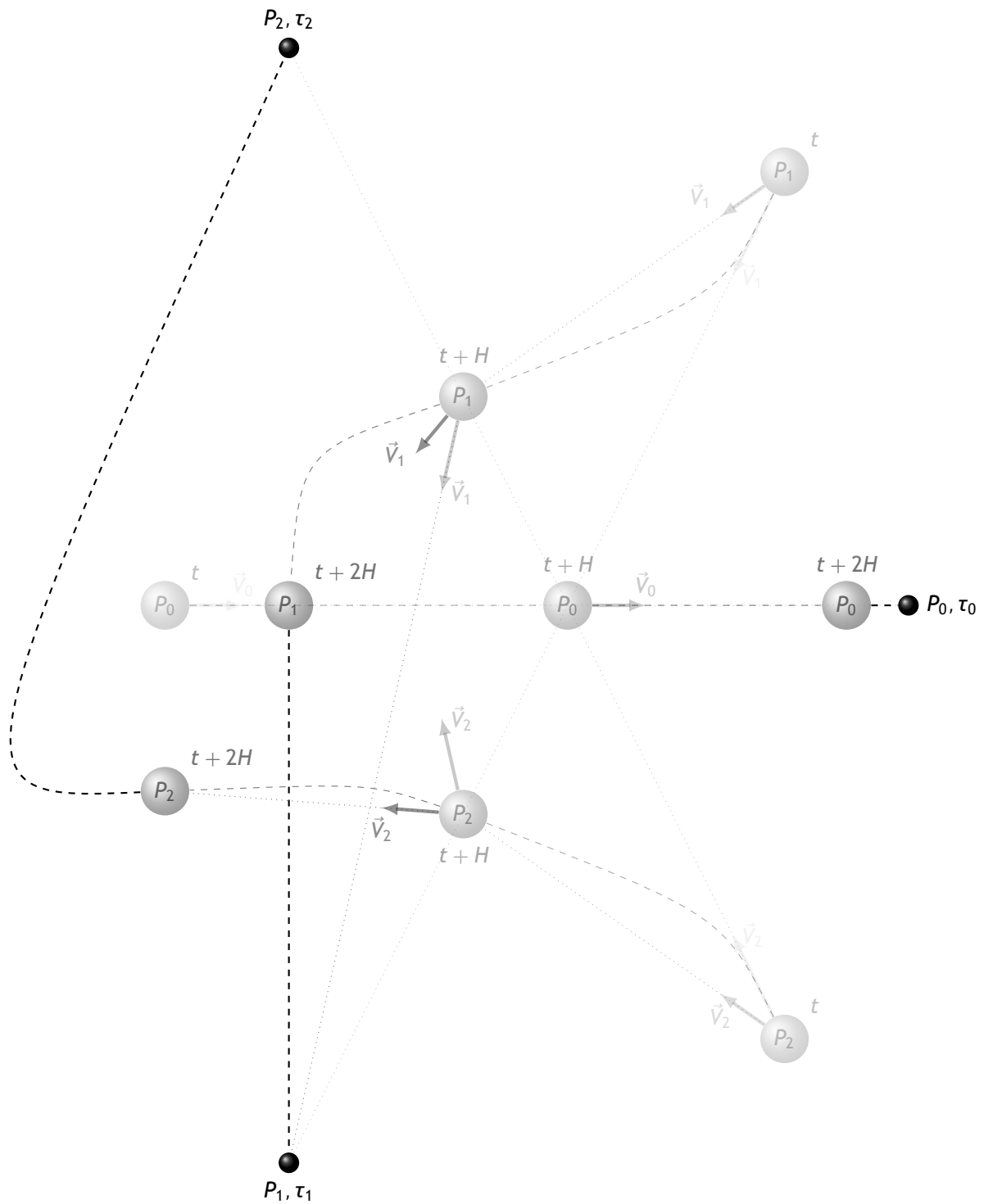


Figura 3.13: Posicionamento das aeronaves no tempo τ

Capítulo 4

Arquiteturas do Sistema de Prevenção de Colisões

No capítulo anterior foi elaborado um método para o problema de prevenção global de colisões com o intuito de ser possível identificar de forma clara o conjunto de soluções do problema e desta forma calcular a solução. Foram também introduzidos dois enquadramentos ou topologias em que o problema poderá ser resolvido. O objetivo é que os algoritmos propostos sirvam de base a um hipotético sistema autónomo de prevenção de colisões, deste modo, neste capítulo serão idealizadas, de forma generalizada, duas arquiteturas possíveis para a integração de um sistema autónomo de prevenção de colisões.

Sem perda de generalidade, pretende-se introduzir conceitos abstratos, um pouco à imagem daquilo que é feito nas ciências da computação para o desenvolvimento de software. A abstração que se quer dar à arquitetura, é em grande parte motivada pelo facto de se querer separar o sistema desenvolvido durante este trabalho, de adicionais sistemas que poderão ser integrados num sistema real. Assim, a filosofia com que foi criado o sistema autónomo, básico/mínimo, de prevenção de colisões poderá facilmente ser utilizado pela comunidade (caso seja merecedor disso), pois os requisitos também serão mínimos, para o seu funcionamento. Neste sentido, este desenvolvimento da arquitetura do sistema, também ajudará na implementação computacional do sistema proposto, com vista a uma validação do método.

4.1 Projeto da Arquitetura do Sistema

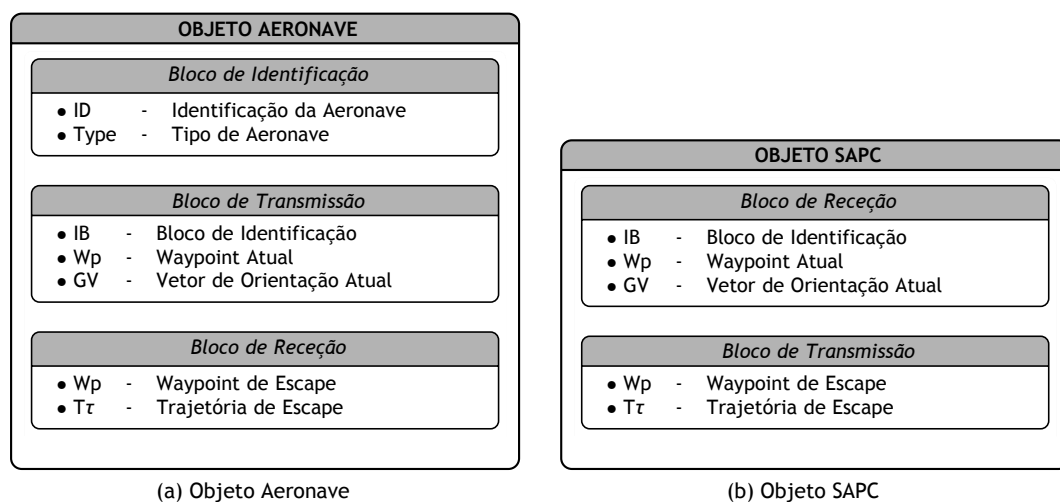


Figura 4.1: Estrutura Interna dos Objetos Aeronave e SAPC

O primeiro procedimento, é identificar os requisitos mínimos ou os recursos essenciais para que um SAPC básico possa ser facilmente integrado com outro tipo de sistemas, bem como os requisitos mínimos de funcionamento. É óbvio que uma das características de um SAPC será a

capacidade de calcular ou prever se as aeronaves estão ou não em colisão umas com as outras, pelo que, deverá ser capaz de calcular a distância Euclidiana entre as aeronaves. Assim, um primeiro parâmetro a identificar, é obviamente o posicionamento de cada aeronave ao alcance do sistema. Da mesma forma, o sistema também deverá evitar colisões, assim, com base no método apresentado no Capítulo 3, é requerido que para prever trajetórias a velocidade de cada aeronave seja conhecida, então um segundo parâmetro identificado é a velocidade das aeronaves ao alcance do sistema.

Posto isto, identificaram-se os dois principais parâmetros exigidos por um minimalista SAPC, os quais deverão ser transmitidos pelas aeronaves, ou melhor, pelo objeto aeronave, porque na realidade a aeronave poderá não transmitir diretamente estes dados, pois, por exemplo os dados podem ser monitorizados por um sistema de RADAR e serem enviados para o SAPC. Contudo, a arquitetura que se quer idealizar não pretende centrar-se na forma como são adquiridos ou transmitidos os dados, apenas e só, quais os dados mínimos a serem transmitidos e recebidos para que o SAPC funcione.

Todavia, o SAPC deverá enviar ou transmitir as informações necessárias para cada aeronave, a fim de que esta possa executar a manobra de evasão. Deste modo, o SAPC deve enviar a cada aeronave, um waypoint de fuga 4D ou uma trajetória de evasão ou ambos.

Contudo, a arquitetura básica ainda não está completa, um terceiro parâmetro deve ser adquirido para que o SAPC possa funcionar, o qual foi introduzido no Capítulo anterior e que é um dos pontos mais importantes na conceção do método de prevenção de colisões, é ele o conceito prioridade que cada aeronave tem no enquadramento do sistema. A identificação da prioridade de cada aeronave é essencial para que seja possível sequenciar o modo como as colisões são tratadas e deste modo ser possível encontrar uma solução para o problema.

O conceito de prioridade, não é nada de muito abstrato e nem de complicado, é apenas a forma natural de resolver um problema de colisões, muito à imagem daquilo que acontece no dia a dia. A título de exemplo, imagine-se um cruzamento de estradas de uma qualquer movimentada cidade, onde a ordem do trânsito é definido por semáforos (a funcionarem corretamente), se um carro está a passar pelo cruzamento é porque o seu semáforo lhe deu uma cor mais prioritária do que aquela apresentada nos outros semáforos (salvo algumas exceções). Da mesma forma que se um polícia de trânsito, estiver a ordenar o trânsito no referido cruzamento, ele dará prioridades alternadas a cada carro para que o trânsito possa fluir em segurança.

É este princípio básico que está por detrás do funcionamento do SAPC, assim, as aeronaves deverão estar bem identificadas e possuírem uma prioridade bem definida, pelo menos no momento em que o SAPC trata das colisões. Deste modo, o terceiro parâmetro a ser enviado pela aeronave é a sua prioridade, no entanto, quis-se ir um pouco mais longe e não definir diretamente a prioridade. O que será transmitido é uma identificação da aeronave e o tipo de aeronave. A identificação poderá ser um parâmetro direto como por exemplo a sua matrícula, já o tipo de aeronave pode ser um conceito mais abstrato, mas que estará sempre relacionado com a sua dinâmica (por exemplo, aeronaves com a mesma velocidade máxima, ângulo de trajetória e aceleração poderão pertencer ao mesmo tipo). Posto isto, a prioridade pode ser uma combinação de valoração entre aqueles parâmetros, com a possibilidade de se juntarem a eles muitos outros.

Neste sentido, as arquiteturas propostas, não prevêm nas suas abstrações diretamente o con-

ceito de prioridade, mas antes, generalizam esse conceito para o conceito de identificação, pois para já não se quer condicionar as prioridades a um sistema fixo, ou caso sejam variáveis não se quer condicionar o seu cálculo. Por fim, na figura (4.1) estão representadas as estruturas idealizadas, tanto para as aeronaves como para o SAPC, as quais retratam os requisitos mínimos de funcionamento. Todavia, é possível detalhar mais um pouco cada um desses objetos, sem perda de generalidade.

Com vista a obter uma maior flexibilidade, será agora realizada uma análise em mais detalhe e acrescentadas algumas estruturas adicionais ao objeto aeronave. Os componentes do objeto inicialmente definido na figura (4.1) estão agora parcialmente reformulados. A identificação e tipo da aeronave serão mantidos pois todas as aeronaves, nesta arquitetura, devem ser bem identificadas e pertencerem a um tipo bem definido. Será acrescentado, a estrutura em que estará definido o plano de voo, quer seja por waypoints ou por trajetória, em três ou quatro dimensões. O plano de voo, não tem necessariamente de ser um parâmetro estático, pois, será possível a qualquer momento, por qualquer razão, que ele possa ser alterado, antecipando assim uma implementação numa filosofia de free-flight.

Outra estrutura introduzida que poderá ser útil numa possível implementação, que embora seja idêntica aos dados enviados pelo objeto SAPC, é o bloco de dados. Neste bloco, estará contido o posicionamento atual bem como a velocidade atual, não querendo com isto restringir os dados, pois numa implementação este bloco poderá ter inúmeros parâmetros. Por último, achou-se pertinente, agrupar o bloco de transmissão e de receção de dados numa estrutura maior que é o bloco de comunicações, que neste caso contém os dados mínimos necessários. O esquema da figura (4.2), pretende exemplificar isso mesmo.

Relativamente ao objeto SAPC, cujos componentes principais estão descritos na figura (4.1), é possível agora agrupar, à imagem do que se fez no objeto anterior, os dois blocos num só e assim formar o bloco de comunicações. Todavia, sem perda de generalidade, é possível acrescentar mais uma estrutura interna ao objeto SAPC para especificar os procedimentos internos mínimos exigidos.

Na figura (4.3), está descrito o novo objeto SAPC, assim, no que toca aos procedimentos internos, é exigido ou requerido que uma aquisição de dados seja realizada por parte do SAPC, isto pode parecer redundante, no entanto, quer-se com isto valorizar a presença de um módulo de aquisição de dados no SAPC como parte fundamental. Um outro procedimento também essencial, é o cálculo das prioridades, quer seja de forma direta ou indireta. Isto é, eventualmente o sistema de prioridades pode ser fixo e não ser necessário um cálculo, mas sim uma manipulação dos dados. Os outros dois processos também podem parecer óbvios, mas mais uma vez, nunca é demais sublinhar o propósito do SAPC que é computar as trajetórias de evasão para as aeronaves envolvidas e garantir que essa informação é recebida por elas.

4.2 Arquiteturas Propostas

Até aqui, foi idealizado tanto para as aeronaves, como para o SAPC quais os requisitos mínimos, em termos dos seus módulos, para que um sistema autónomo de prevenção de colisões possa funcionar. Agora, irão ser sugeridas as arquiteturas ou topologias de configuração de

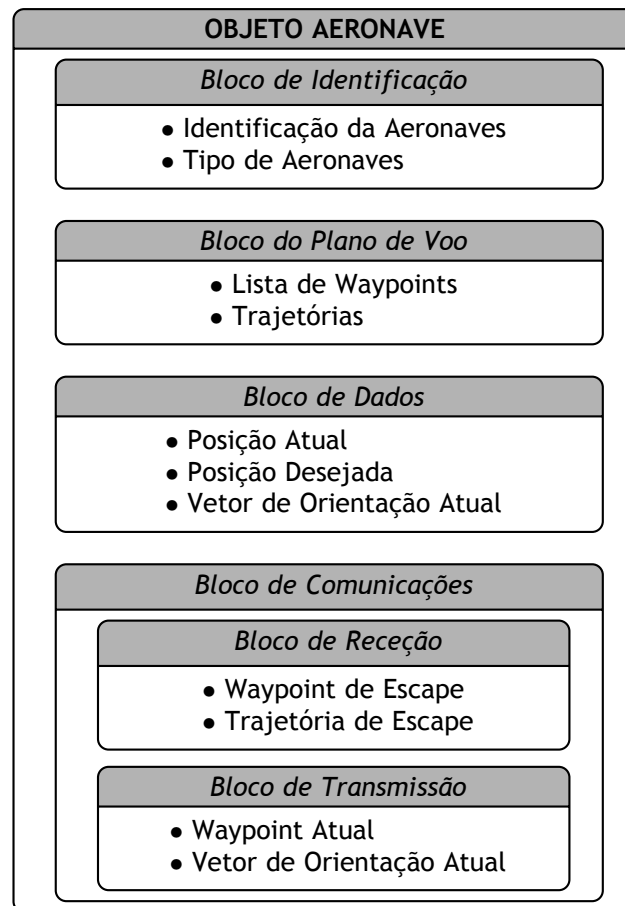


Figura 4.2: Estrutura Interna do Objeto Aeronave

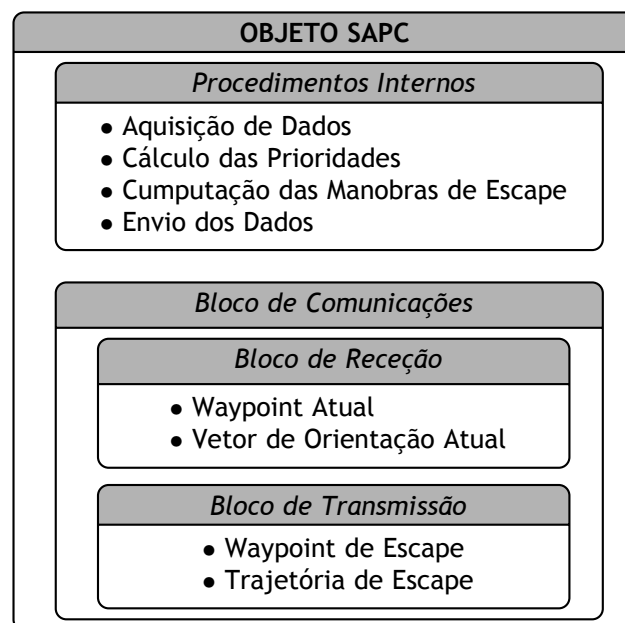


Figura 4.3: Estrutura Interna do Objeto SAPC

um sistema autónomo de prevenção de colisões, pretendendo de igual forma, serem o mais elementares possível.

A ideia é entender, quais as configurações possíveis e gerais para o SAPC. Deste modo, e como já

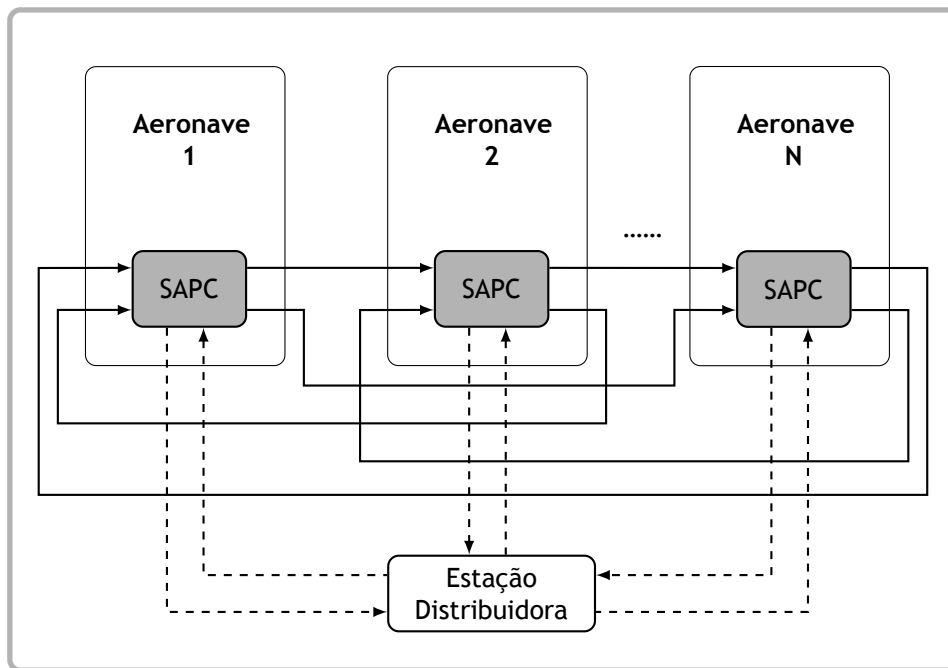


Figura 4.4: Topologia Descentralizada

foi introduzido no Capítulo anterior, as topologias são duas, a saber, topologia descentralizada e topologia centralizada.

4.2.1 Topologia Descentralizada

Numa topologia descentralizada parte-se do princípio que cada aeronave é munida do seu próprio SAPC, assim, terá de ter a capacidade de receber os dados de outras aeronaves e calcular a sua própria trajetória de evasão. O sistema de prioridades continua a ser parte importante na segurança do sistema, cada aeronave deverá saber tanto a sua prioridade como a das outras, por meio de cálculo ou não.

Nesta topologia, a responsabilidade pela segurança é imputada a cada aeronave, por isso faz bastante sentido que o conceito *sense and avoid* tenha um papel importante na implementação de uma topologia do género.

Como exemplo da aplicação desta topologia, imagine-se uma formação de UAVs com uma determinada missão. A menos que a distância entre eles seja demasiadamente grande, um SAPC numa topologia descentralizada teria um papel crucial para manter a formação em segurança, pois cada aeronave teria a noção do seu comportamento, bem como do comportamento do resto da formação, e devido ao fato de cada uma ter uma prioridade fixa, o sistema garantiria a não colisão entre elas (caso a solução exista).

Todavia, esta idealização duma topologia descentralizada não restringe que a transmissão dos dados entre aeronaves tenha de ser feita, efetivamente entre aeronaves, pois poderá existir um sistema central que recolha os dados e os envie para as aeronaves. Com isto quer-se dizer, que uma topologia descentralizada é definida pela distribuição do SAPC pelas aeronaves (figura (4.4)).

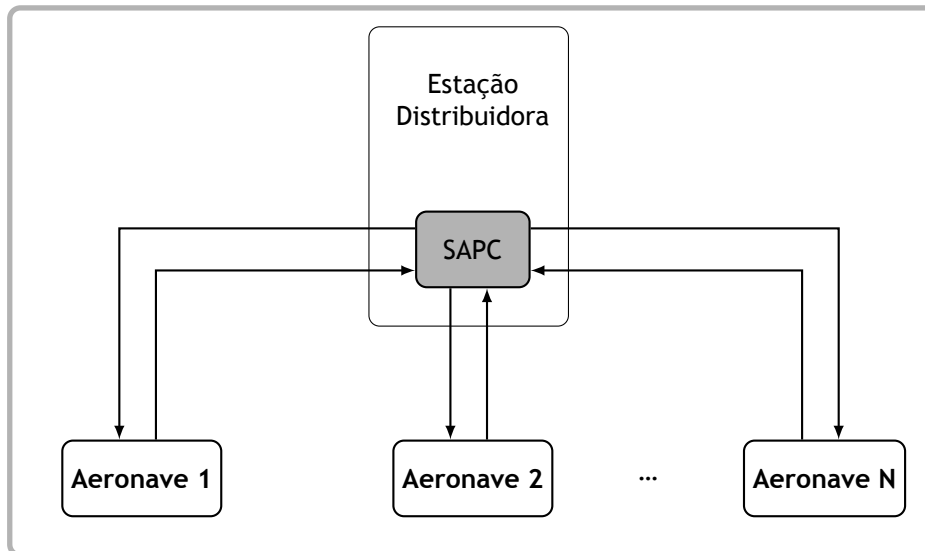


Figura 4.5: Topologia Centralizada

4.2.2 Topologia Centralizada

Contrariamente à topologia descentralizada, numa topologia centralizada subentende-se a existência de um sistema centralizado, ou seja, as aeronaves não computarão as próprias manobras de evasão, pois, o SAPC não fará parte delas. Deste modo, o SAPC terá uma localização diferente das aeronaves, o qual recolherá os dados de todas as aeronaves no sistema, computará a trajetória de evasão de cada uma e enviará os respetivos dados.

A título de exemplo, pode-se imaginar um sistema semelhante a um CTAS ou STCA em que as aeronaves são monitorizadas apenas neste sistema, ou seja, existe centralização da informação. Posto isto, a figura (4.5) pretende representar a idealização de uma topologia centralizada.

4.3 Considerações Gerais

Foram apresentadas as abstrações tanto para as aeronaves como para os SAPC, bem como as formas de configuração dos objetos. De seguida, serão elencados os procedimentos, de forma sequencial, de um SAPC. Assim, um Sistema Autónomo de Prevenção de Colisões,

- i. deverá adquirir todos os dados das aeronaves no seu alcance;
- ii. deverá de alguma forma conhecer as prioridades de cada uma das aeronaves presente no sistema;
- iii. após a aquisição de todos os dados e estabelecidas as prioridades o SAPC deverá calcular as respetivas manobras de evasão, se a condição de colisão for identificada;
- iv. finalmente, deverá enviar as manobras para as respetivas aeronaves, se integrado numa topologia centralizada, ou para a aeronave se integrado numa topologia descentralizada.

Posto isto, também irão ser destacadas as considerações relativamente à implementação computacional, com vista a realizar simulações de validação. No Capítulo 5, será apresentado um conjunto de simulações, no entanto, a implementação computacional, não é de todo trivial, pois o problema em questão exige algumas considerações antes de ser implementado.

Um dos pontos críticos, é entender que uma implementação computacional do problema de prevenção de colisões, necessitará de uma simulação em tempo real. Apesar deste tipo de implementação ser difícil, uma implementação off-line seria muito mais árdua. Assim, e para tornar mais clara a arquitetura de simulação, é necessário criar um simulador em tempo real das aeronaves, que somente se ocupará de simular a navegação das aeronaves com base nos seus planos de voo.

O simulador de tempo real, comunicará com um SAPC implementado à parte, este receberá os dados das aeronaves e computará as respetivas trajetórias, enquanto que as aeronaves no simulador continuarão os seus próprios movimentos. Deste modo, consegue-se obter simulações o mais próximo da realidade.

Na figura (4.6), está representado o diagrama base, para uma implementação computacional de um problema de prevenção de colisões. Assim, cada aeronave no sistema, e de acordo com os objetos acima definidos, deverá possuir um plano de voo, bem como estar identificada e definido o seu tipo. Os tipos das aeronaves, serão definidos de forma distinta, onde constarão as características dinâmicas que serão partilhadas tanto com o simulador como com SAPC.

O simulador de tempo real será um sistema independente do sistema autónomo de prevenção de colisões (a implementação será mais detalhada no Capítulo 5), os quais deverão comunicar entre si, transferindo os dados necessários. Uma possível implementação, é definir um local comum de armazenamento de dados, onde as duas entidades possam partilhar informação.

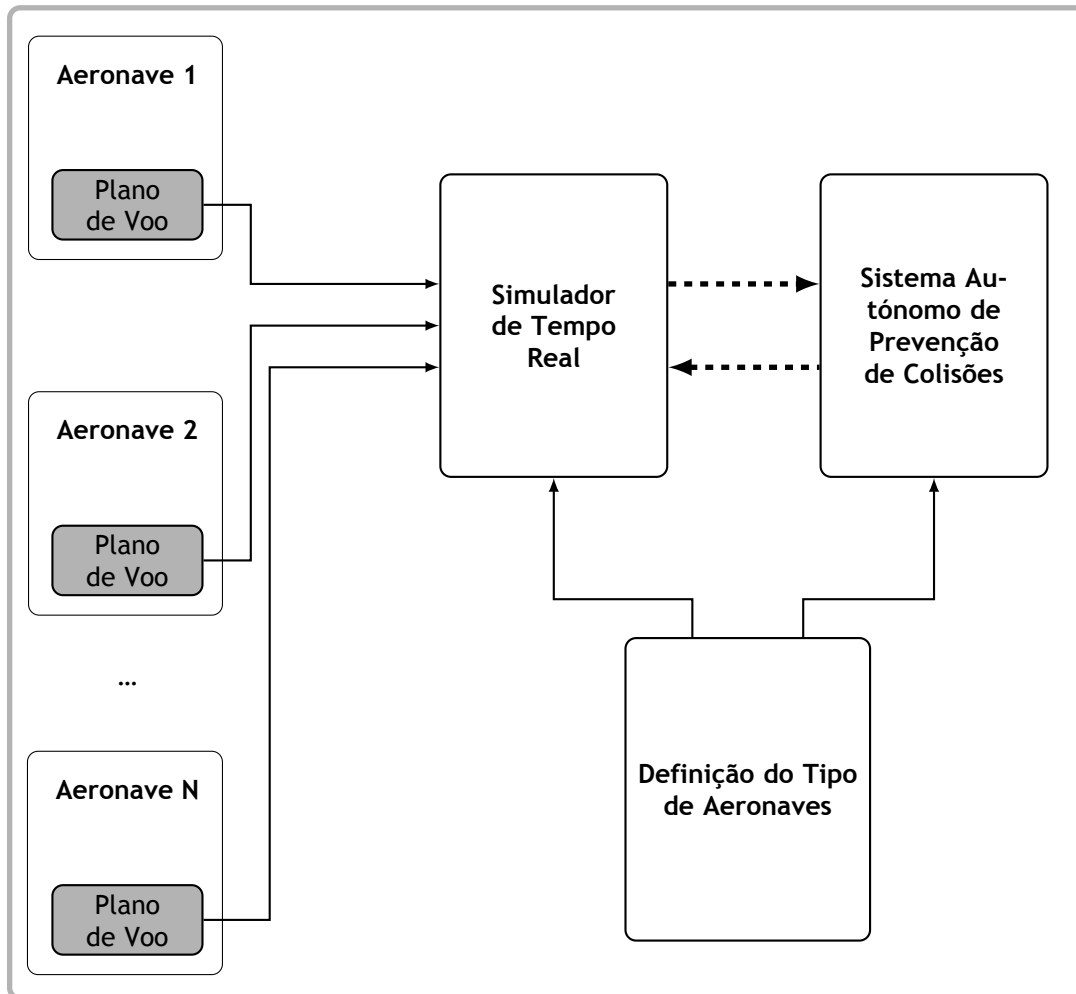


Figura 4.6: Simulador de Tempo Real Proposto

Capítulo 5

Implementação e Simulação do Sistema de Prevenção de Colisões

Desenvolvidas as principais ferramentas nos capítulos anteriores, irá então ser implementado o sistema autónomo de prevenção de colisões desenvolvido no Capítulo 3 assente na arquitetura idealizada no Capítulo 4.

A principal intenção do capítulo atual é demonstrar a eficácia dos métodos propostos, para isso, irão ser realizadas algumas simulações com base em situações reais, sendo também de salientar que tanto os métodos propostos bem como a sua implementação computacional, pretendem servir de base a um sistema real. Neste sentido, foram desenvolvidos dois pacotes de software, à imagem do que foi referido no Capítulo 4, um para o simulador de tempo real e outro para o sistema de autónomo de prevenção de colisões.

5.1 Ambiente de Implementação

Antes da implementação propriamente dita, convém, deixar uma nota do ambiente de implementação e simulação, pois, questões relacionadas com a máquina de implementação, o sistema operativo, a linguagem de programação, os compiladores utilizados e claro o engenho do programador influenciarão o desempenho do SAPC. No entanto, a preocupação foi cumprir o mais genuinamente os algoritmos propostos e uma implementação o mais legível possível, para que possa, no futuro, ser utilizada pela comunidade científica.

Assim, não foi utilizada nenhuma máquina especial, pois se o desempenho computacional do SAPC for aceitável, sê-lo-á mais numa máquina melhor. O CPU utilizado foi o Intel i7@920, quanto ao sistema operativo, foi utilizado o Fedora 19 (um sistema operativo LINUX). Relativamente às linguagens de programação, na maior parte da implementação foi utilizado a linguagem C, pois houve alguma preocupação na possibilidade de uma futura implementação num sistema embebido (a qual é prevista, pelo menos, numa topologia descentralizada onde o SAPC é um sistema de bordo). Outras linguagens como Python e BASH foram utilizadas para os interfaces com o simulador. Por fim, o compilador utilizado foi o gcc-4.2 devido, essencialmente, ao facto de ser livre e também de ter provas dadas na fiabilidade do código gerado.

Quanto ao pacote de software do SAPC, todo o código foi desenvolvido de raiz, para que seja possível no futuro uma validação formal de todo o software, e deste modo, poder garantir uma fiabilidade exigida por sistemas com aplicações críticas.

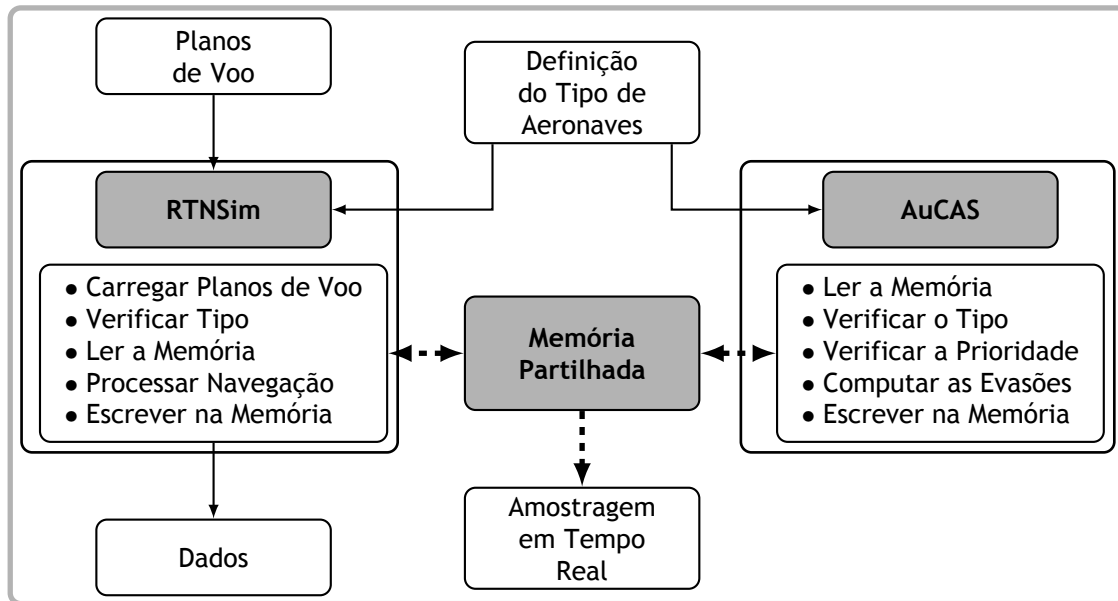


Figura 5.1: Diagrama da Implementação do Software

5.2 Arquitetura de Implementação

O software desenvolvido foi construído numa filosofia modular para facilitar posteriores melhorias, eventuais correções e um possível aumento de recursos. A topologia base do software teve como referência a arquitetura centralizada, proposta no capítulo 4, no entanto, tanto servirá para uma topologia centralizada como para uma topologia descentralizada, uma vez que os módulos são de fácil integração.

Relativamente ao simulador de tempo real, este foi desenvolvido com a intenção de dar suporte ao software de prevenção de colisões, uma vez que, os simuladores existentes não garantiam a flexibilidade desejada. Assim, para além de simular e resolver as equações dinâmicas de navegação para várias aeronaves, o simulador, tem de garantir que os dados de saída correspondem a um movimento em tempo real.

Põe-se agora o problema de como comunicar entre os dois sistemas. Os sistemas operacionais UNIX, disponibilizam uma API (Application Program Interface) que permite criar um espaço de memória comum, onde os dados podem ser partilhados, sem que exista violação da integridade dos mesmos, essa API é a chamada UNIX System V. Memória essa, que também serviu para desenvolver um interface gráfico, onde é possível observar as trajetórias em tempo real.

Na Figura 5.1, está representado o esquema geral de simulação, onde é possível verificar a interação entre os dois sistemas. Assim o RTNSim (Real Time Navigation Simulator) é o simulador que requer como dados de entrada os planos de voo de cada aeronave bem como a sua identificação e o seu tipo, isto é necessário para que os limites dinâmicos sejam impostos, e deste modo, não acontecer em movimentos irrealistas. Após a leitura de cada um dos planos de voo e verificados os atributos dinâmicos, o RTNSim inicializa a memória onde os dados irão ser partilhados e logo depois arranca com o processo de navegação, escrevendo constantemente, na memória e num ficheiro de saída, os dados das aeronaves

Por outro lado está o AuCAS (Automatic Collision Avoidance Systema)¹, que é no fundo o SAPC. Este, tem a sua inicialização quando o operador especificar. Assim que a ação de inicialização tiver efeito, o AuCAS carrega o ficheiro onde estão especificadas as características dinâmicas das aeronaves e inicializa a prevenção de colisões. Começa por aceder à memória partilhada e ler os dados de todas as aeronaves, verificando as prioridades, analisando as colisões e caso hajam resolve os conflitos, colocando na memória a indicação se a aeronave está ou não em rota de colisão, caso esteja coloca também o waypoint 4D de evasão.

O tempo de resolução varia consoante o número de aeronaves e o número de direções de procura de solução, como analisado no Capítulo 3, no entanto, o operador pode especificar o intervalo de tempo entre as ações do AuCAS. Imagine-se que para um determinado número de aeronaves e direções, o AuCAS demora 1 segundo a realizar todo o procedimento, o operador pode especificar 5 segundos entre as ações. Desta forma é possível, especificar uma intervenção homogéneo do AuCAS.

5.3 Simulações

Explicada a estrutura de simulação, irão ser agora apresentadas algumas simulações, na tentativa de demonstrar a efetividade dos métodos propostos bem como dos seus algoritmos. É claro que o número de simulações a apresentar, não valida o software. No futuro será necessário um trabalho exaustivo de combinação de cenários, bem como a referida análise formal do software para que seja garantido a integridade do sistema.

O objetivo principal das simulações, não é de todo, validar software. A validação dos métodos já foi realizada (provada matematicamente) no Capítulo 3, no entanto uma das preocupações, referidas no início do trabalho, era que uma possível implementação computacional do método proposto tivesse desempenhos computacionais suscetíveis de merecerem uma integração num sistema real e que, efetivamente, resolvesse o problema de prevenção de colisões em tempo real.

Durante as simulações, apenas dinâmicas de UAVs irão ser utilizadas, isto deve-se ao facto de que, não seria muito realista utilizar aeronaves tripuladas sem um estudo prévio do sistema de prioridades. Desta forma, com a utilização de UAVs, o sistema de prioridades não tem impacto em tripulações. Assim, um conjunto de UAVs numa determinada missão serve para testar os algoritmos e aproximar o sistema da realidade.

Parte-se do pressuposto que o AuCAS é um sistema centralizado à imagem do algoritmo 3.3, onde todas as aeronaves comunicam para esse sistema e este, resolve o problema de prevenção de colisões. Como foi referido, o número de aeronaves e o número de direções de procura influenciam o tempo de resolução, assim, levou-se a cabo um estudo do tempo máximo de CPU despendido na resolução em função do número de aeronaves e o número de direções, como ilustrado na figura 5.2. O número das direções não é por acaso, 64800 direções \vec{e} representa um varrimento de 1 grau, já 32400 direções \vec{e} representa mais ou menos um varrimento médio de 1 grau e meio.

Relativamente à distância mínima entre aeronaves, o AuCAS tomará como conflito distâncias

¹A sigla escolhida foi para evitar confusão com o ACAS (Airborne Collision Avoidance System)

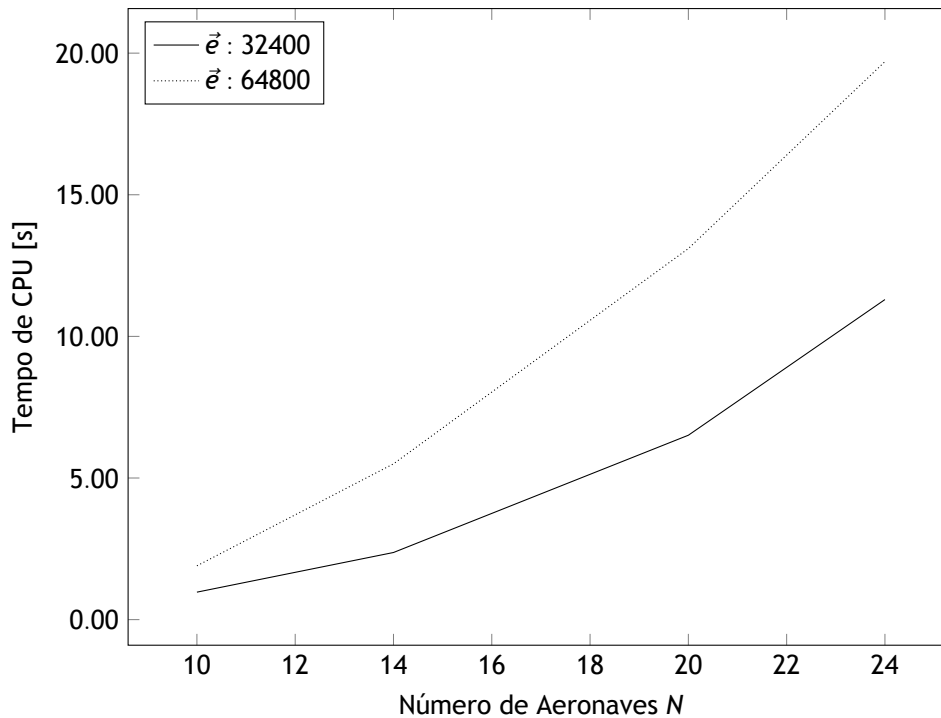


Figura 5.2: Tempo máximo de computação em relação ao número de aeronaves e direções de procura da solução

menores do que 1000 metros entre aeronaves. Enquanto que o tempo entre cada atuação do AuCAS será de 5 segundos para 32400 direções \vec{e} .

As trajetórias, para as simulações, foram construídas através de dois waypoints, um inicial e outro final, ambos definidos em $4D$. Irão ser apresentadas cinco simulações, em cenários hipotéticos, cujas situações de conflito, tentarão tanto quanto possível, aproximar-se de cenários extremos. Assim, em todos os cenários os UAVs, cujas características dinâmicas são iguais, inicialmente estão todos em rota de colisão. Na simulação I irão ser utilizados 10 UAVs, já nas simulações II e III, serão utilizados 14 UAVs.

Sempre com o propósito de aproximar o mais possível as simulações da realidade, quis-se nas simulações IV e V introduzir perturbações no sistema através da presença do vento e turbulência. Foi utilizado o exemplo da simulação I, em que através do modelo de turbulência de Dryden foi adicionado ao modelo dinâmico de navegação (sistema de equações 3.25) uma componente que pretende simular o vento, isto para a simulação IV. Na simulação V a essa perturbação foi adicionado uma variação segundo uma distribuição Gaussiana, para que na medida do possível fosse introduzido na simulação turbulência.

5.3.1 Simulação I

Neste primeiro exemplo irão ser simulados dez UAVs com dinâmicas iguais (Tabela 5.2) e serão enquadrados num cenário, tanto quanto possível, extremo. O plano de voo de cada um é especificado na Tabela 5.1, onde é definido os waypoints a quatro dimensões de partida e de chegada. A configuração inicial pode ser mais perceptível na visualização da Figura 5.3. O plano de voo foi elaborado de tal forma que os UAVs estão todos na mesma altitude, em rota de

colisão uns com os outros e um ponto comum de colisão, na interceção das linhas de trajetórias, representadas na Figura 5.3.

Foi então realizada uma simulação em tempo real para estes planos de voo, em que o SAPC foi iniciado 30 segundos após o início da simulação. Como foi referido a distância mínima especificada entre aeronaves foi de 1000 metros. Após aproximadamente 10 minutos de simulação o resultado das separações mínimas é apresentado na Tabela 5.3 e na Figura 5.4 é possível observar o comportamento da distância ao longo do tempo, dos pares de aeronaves com menor distância mínima.

É possível verificar nos próximos gráficos qual foi o comportamento ao longo do tempo de cada UAV, assim, nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 tem-se os gráficos da Longitude, Latitude e Altitude, respetivamente, para cada aeronave, identificado por A_i com $i = 1 \dots 10$, por sua vez nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 estão representados a Velocidade, Ângulo de Trajetória e Rumo, respetivamente. Por fim, no gráfico 5.8 pode ser analisado o comportamento das trajetórias projetadas no solo.

Posto isto, sem dúvida que os resultados mais importantes são os da Tabela 5.3, onde está descrita qual a distância mínima de separação entre aeronaves que ocorreu durante a simulação. Note-se que a simulação foi considerada completa num momento em que já não havia mais hipotéticas colisões entre as aeronaves, e o sistema de prioridades adotado considerava como aeronave mais prioritária o UAV A_1 , e sucessivamente diminuindo de prioridade até à aeronave menos prioritária, o UAV A_{10} . Neste sentido, mostrou-se de certa forma a eficiência computacional e a efetividade dos métodos propostos.

É possível constatar que os pares A_6, A_1 e A_9, A_4 , não cumpriram a distância de separação mínima (a sombreado na Tabela 5.3). Sendo agora interessante analisar este resultado, como pode ser constatado, os valores a sombreado, não correspondem aos 1000 metros especificados para o SAPC. Tal facto poderá acontecer devido a inúmeras situações, no entanto o que aconteceu nesta simulação é devido ao tempo de intervalo de atuação do SAPC, este atua de 5 em 5 segundos e as trajetórias são computadas para cumprirem exatamente 1000 metros de separação. Imagine-se agora uma situação em que perto dos 1000 metros de separação uma aeronave fica em colisão com outra, como o SAPC só entregará as soluções passados 5 segundos, então as aeronaves poderão entrar em colisão. Sendo claro também, que numa situação dessas poderá mesmo não existir quaisquer solução, daí a importância de uma atuação com janelas temporais relativamente alargadas e da rapidez com que as soluções são computadas.

Tabela 5.1: Plano de Voo para o Exemplo I

Número Aeronave	Número do Waypoint							
	Waypoint ₀				Waypoint ₁			
N	λ_0 [rad]	φ_0 [rad]	h_0 [m]	τ_0 [s]	λ_1 [rad]	φ_1 [rad]	h_1 [m]	τ_1 [s]
1	-0.161856	0.676123	1000.00	0.0	-0.155222	0.676557	1000.00	601.8
2	-0.155223	0.676557	1000.00	0.0	-0.161868	0.676125	1000.00	602.8
3	-0.158023	0.674078	1000.00	0.0	-0.158796	0.679107	1000.00	457.9
4	-0.158792	0.679096	1000.00	0.0	-0.158022	0.674072	1000.00	457.3
5	-0.160925	0.674605	1000.00	0.0	-0.155372	0.678427	1000.00	609.1
6	-0.155374	0.678422	1000.00	0.0	-0.160922	0.674608	1000.00	608.3
7	-0.155827	0.674825	1000.00	0.0	-0.161291	0.678104	1000.00	575.9
8	-0.161291	0.678105	1000.00	0.0	-0.155827	0.674825	1000.00	576.1
9	-0.159423	0.674299	1000.00	0.0	-0.157011	0.679057	1000.00	480.6
10	-0.157010	0.679055	1000.00	0.0	-0.159423	0.674298	1000.00	480.6



Figura 5.3: Projeção Terrestre das Trajetórias Planificadas para a Simulação I

Tabela 5.2: Dinâmica das Aeronaves para o Exemplo I

N	V [m/s]		γ [rad]		Ψ [rad]		\dot{V} [m/s ²]		$\dot{\gamma}$ [rad/s]		$\dot{\Psi}$ [rad/s]	
	V_{min}	V_{max}	γ_{min}	γ_{max}	Ψ_{min}	Ψ_{max}	\dot{V}_{min}	\dot{V}_{max}	$\dot{\gamma}_{min}$	$\dot{\gamma}_{max}$	$\dot{\Psi}_{min}$	$\dot{\Psi}_{max}$
1	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
2	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
3	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
4	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
5	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
6	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
7	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
8	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
9	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
10	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021

Tabela 5.3: Distância Mínima de Separação em Metros Orbitda para o Exemplo I

<i>N</i>	<i>A</i> ₁	<i>A</i> ₂	<i>A</i> ₃	<i>A</i> ₄	<i>A</i> ₅	<i>A</i> ₆	<i>A</i> ₇	<i>A</i> ₈	<i>A</i> ₉	<i>A</i> ₁₀
<i>A</i> ₁	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>A</i> ₂	1001.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>A</i> ₃	4647.8	3958.2	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>A</i> ₄	1415.6	1264.4	1016.7	—	—	—	—	—	—	—
<i>A</i> ₅	1000.1	5084.8	4221.4	4229.0	—	—	—	—	—	—
<i>A</i> ₆	986.8	3368.2	4802.3	4241.1	6114.4	—	—	—	—	—
<i>A</i> ₇	1554.8	2058.5	4496.2	1001.7	4281.8	5215.1	—	—	—	—
<i>A</i> ₈	1859.1	5662.3	1001.2	3694.6	5413.0	3795.8	6927.6	—	—	—
<i>A</i> ₉	3385.6	4235.9	1582.6	976.8	4283.4	4485.3	5080.1	1683.9	—	—
<i>A</i> ₁₀	2021.8	1000.4	2324.5	1540.3	6029.3	2494.4	3279.4	4668.4	3031.2	—

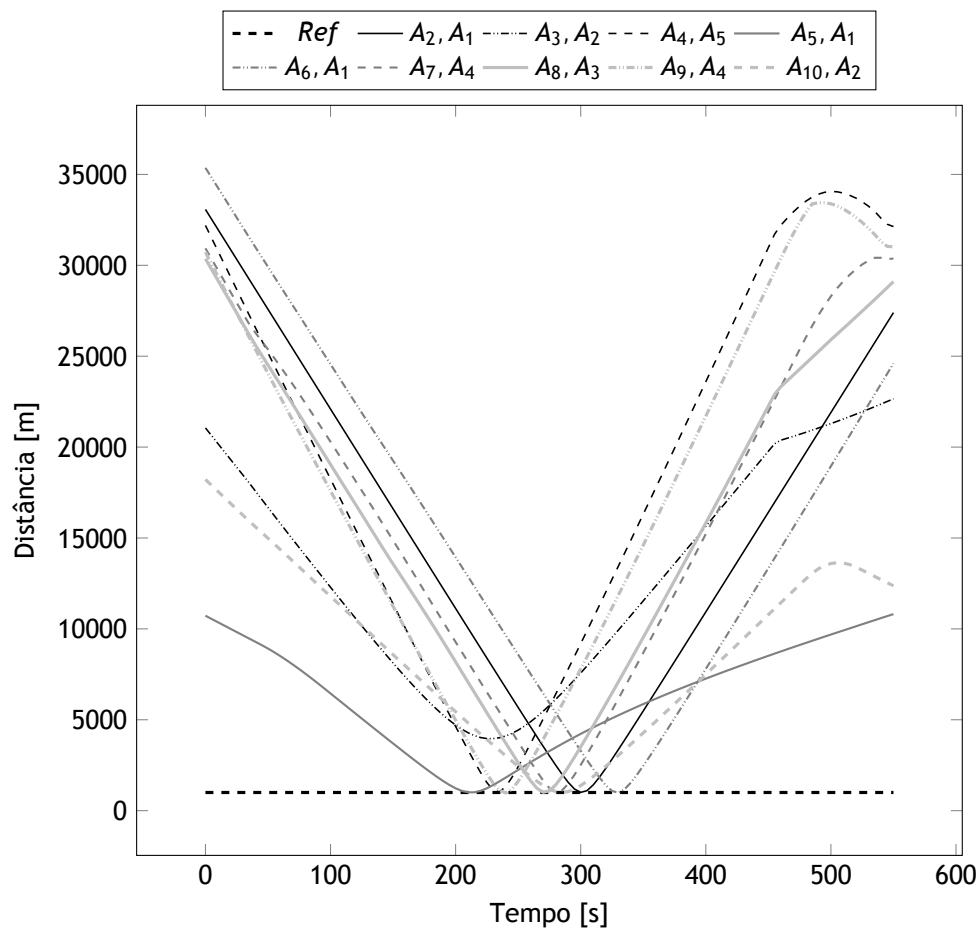


Figura 5.4: Gráfico das Distâncias entre Pares com menor distância para a Simulação I

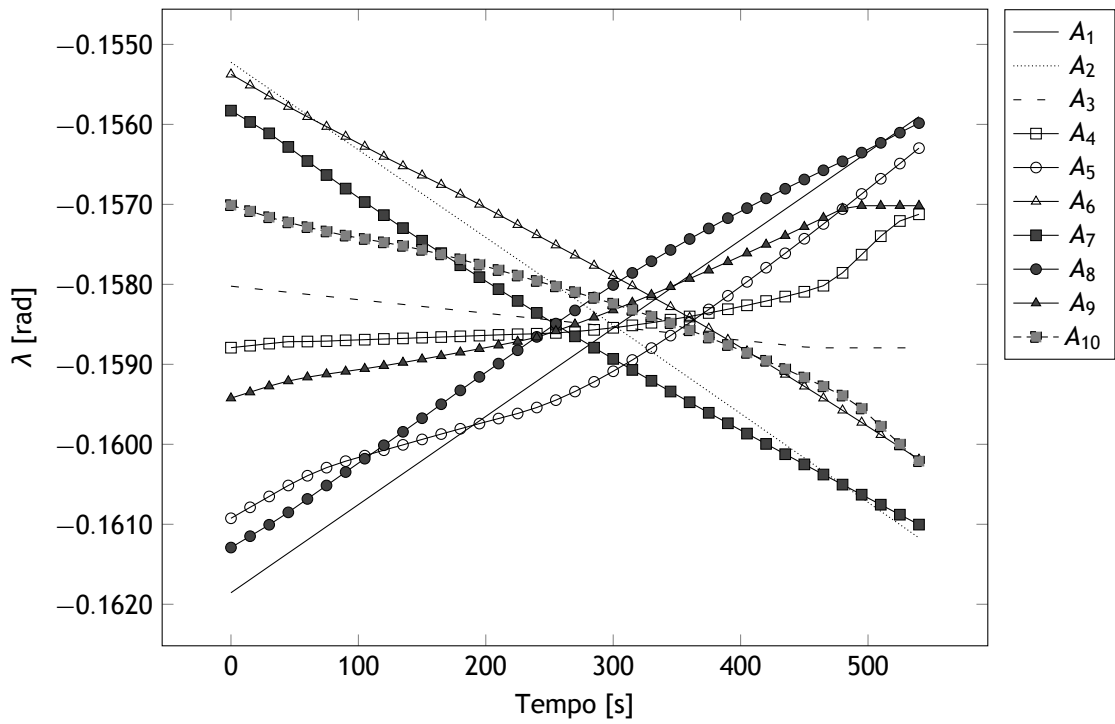


Figura 5.5: Gráfico da Longitude em relação ao Tempo da Simulação I

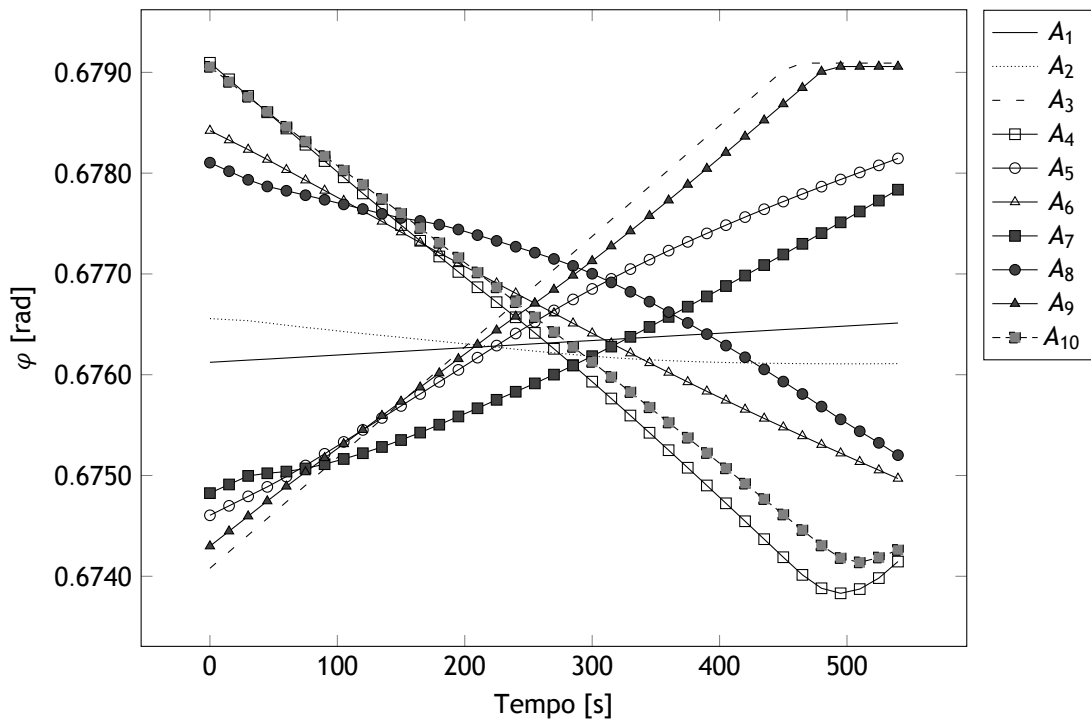


Figura 5.6: Gráfico da Latitude em relação ao Tempo da Simulação I

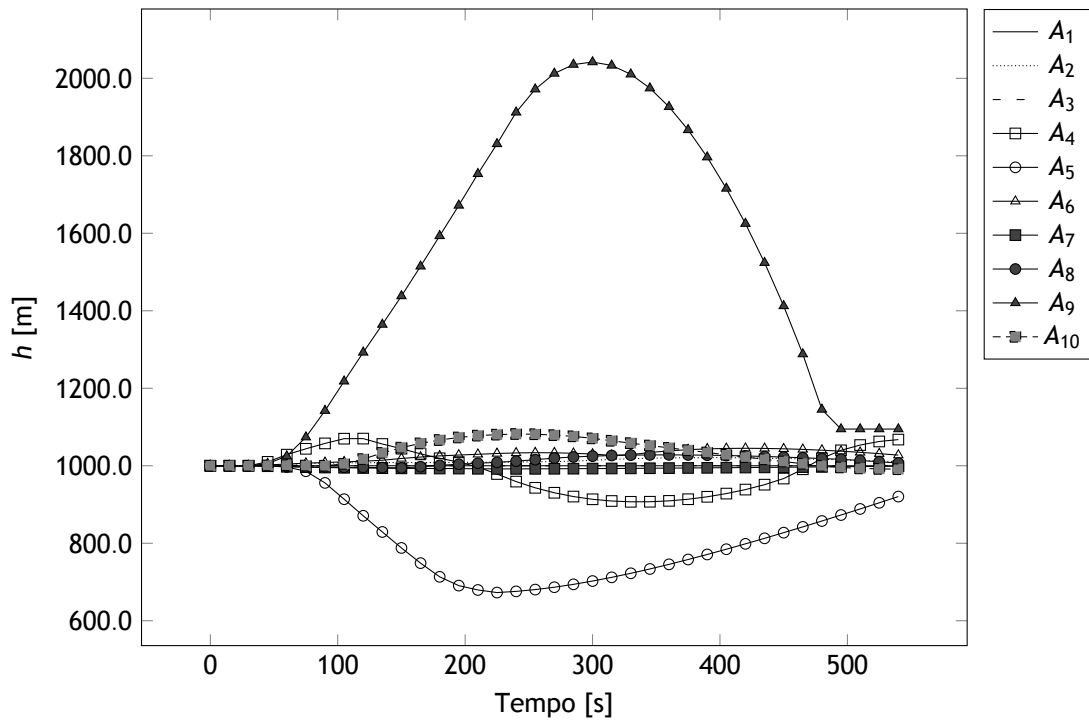


Figura 5.7: Gráfico da Altitude em relação ao Tempo da Simulação I

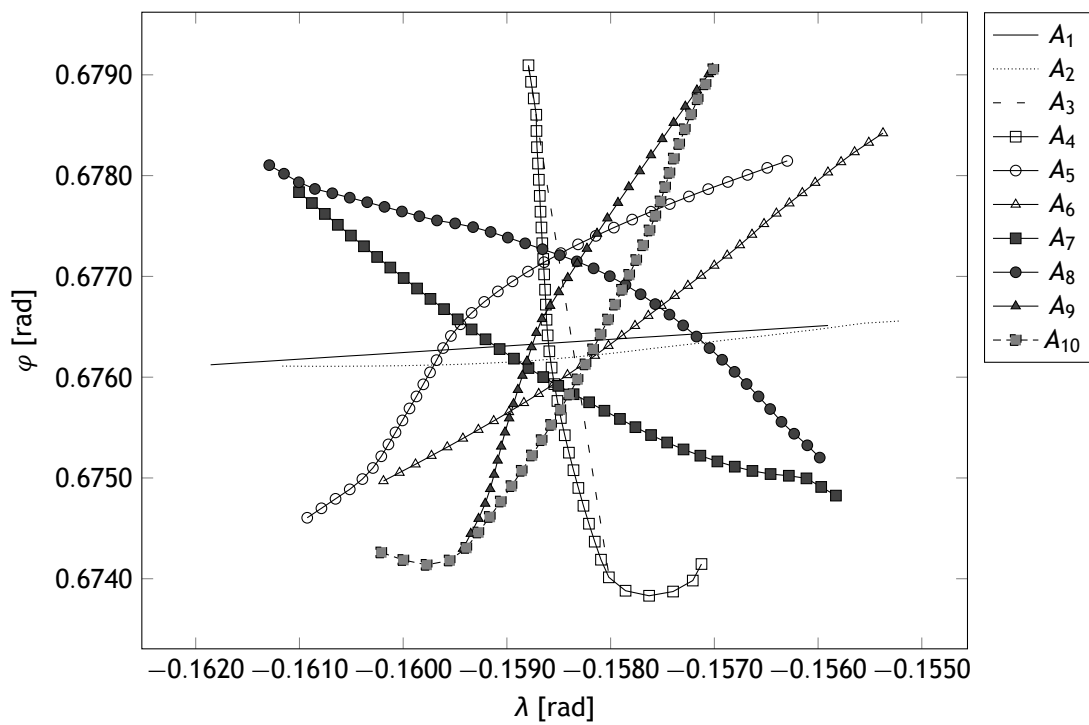


Figura 5.8: Gráfico da Projeção Terrestre da Simulação I

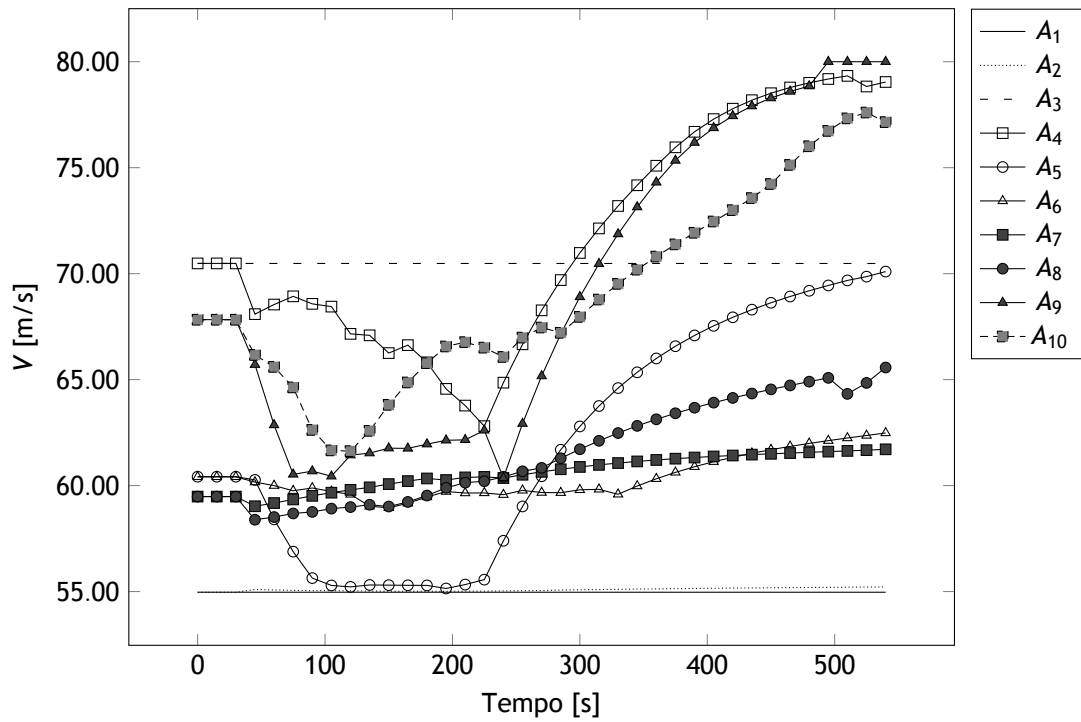


Figura 5.9: Gráfico da Velocidade em relação ao Tempo da Simulação I

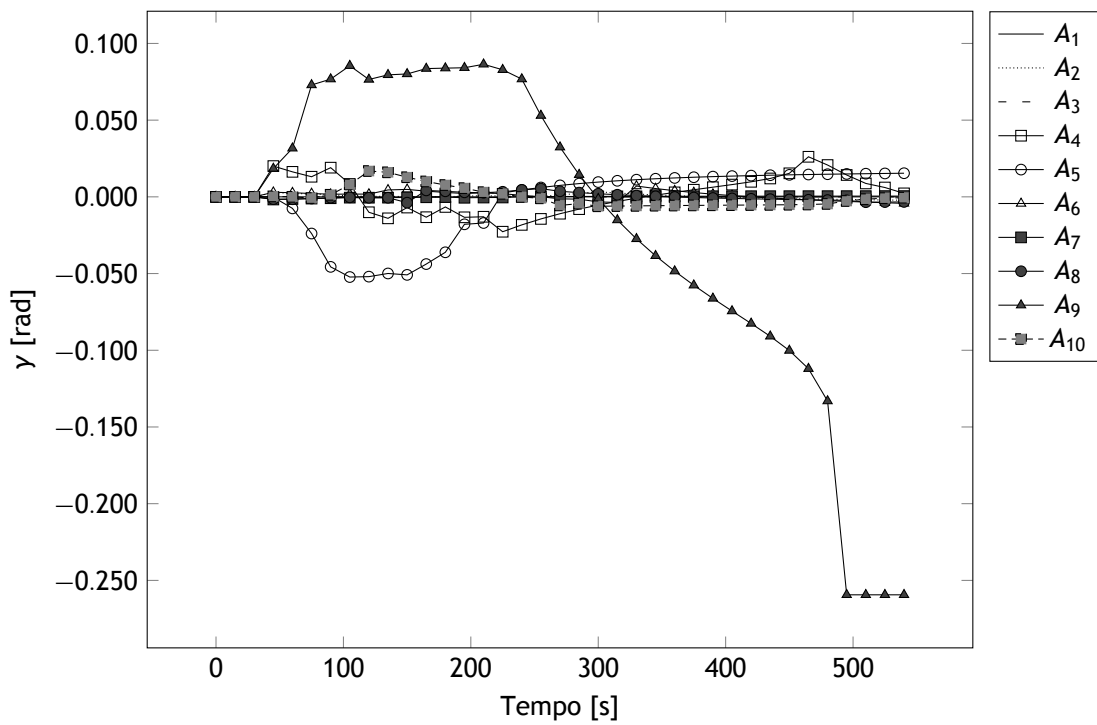


Figura 5.10: Gráfico do Ângulo de Trajetória em relação ao Tempo da Simulação I

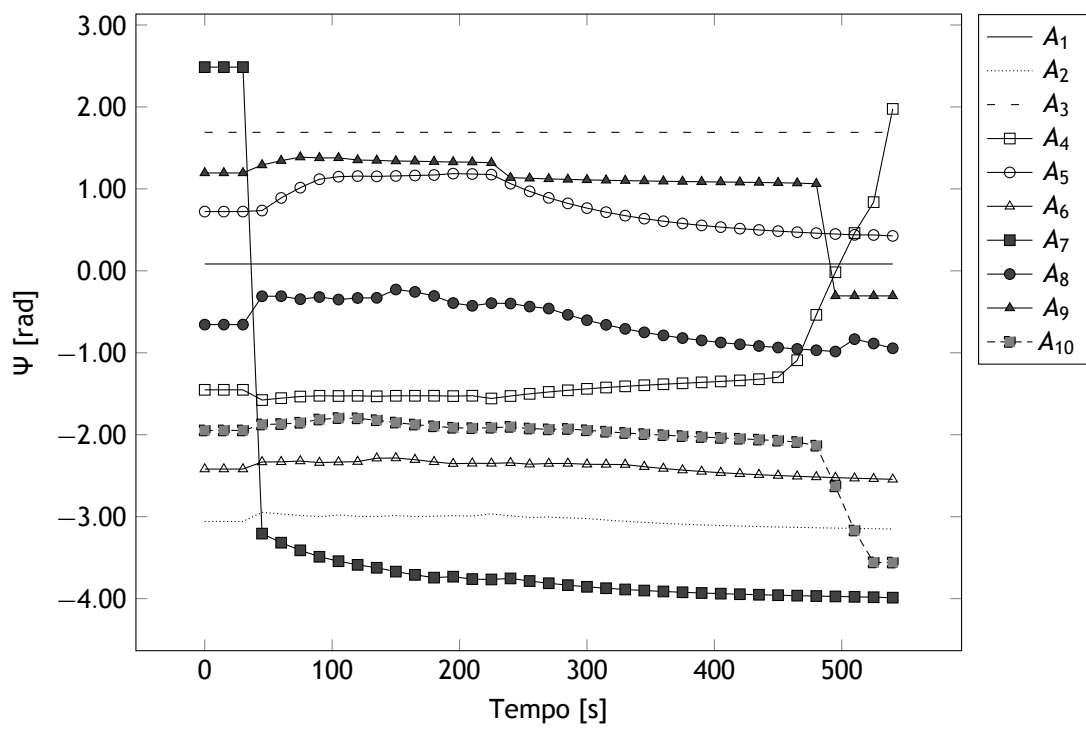


Figura 5.11: Gráfico do Rumo em relação ao Tempo da Simulação I

5.3.2 Simulação II

Neste segundo exemplo o cenário a retratar é idêntico ao da primeira simulação, mas agora com 14 aeronaves. As condições de simulação são as mesmas, o SAPC atua de 5 em 5 segundos, sendo ativado após 30 segundos do início da simulação. A duração da simulação também é cerca de 10 minutos e a distância de separação mínima especificada é de 1000 metros.

O plano de voo para os 14 UAVs cujas dinâmicas são iguais (Tabela 5.5), é descrito na Tabela 5.4. Para uma melhor visualização dos respectivos planos de voo a Figura 5.12 ilustra a projeção terrestre das trajetórias pretendidas por cada uma das aeronaves.

Assim, foi realizada a simulação e os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16, pela Longitude, Latitude e Altitude, respectivamente. Pelas Figuras 5.18, 5.19 e 5.20 são ilustrados a Velocidade, Ângulo de Trajetória e Rumo, respectivamente. Quanto à projeção terrestre as trajetórias tomadas por cada uma das aeronaves pode ser observada na Figura 5.17.

Os resultados obtidos para as distâncias mínimas de separação entre aeronaves são descritos na Tabela 5.6 e no gráfico 5.13 é possível observar o comportamento da distância ao longo do tempo, dos pares de aeronaves com menor distância mínima. É possível constatar que o par A_{12}, A_3 não cumpre a distância de separação mínima (a sombreado na Tabela 5.6), o que acontece devido igualmente ao explicado na simulação anterior.

Tabela 5.4: Plano de Voo para o Exemplo II

Número Aeronave	Número do Waypoint							
	<i>Waypoint₀</i>				<i>Waypoint₁</i>			
<i>N</i>	λ_0 [rad]	φ_0 [rad]	h_0 [m]	τ_0 [s]	λ_1 [rad]	φ_1 [rad]	h_1 [m]	τ_1 [s]
1	-0.161856	0.676123	1000.00	0.0	-0.155222	0.676557	1000.00	648.1
2	-0.155223	0.676557	1000.00	0.0	-0.161868	0.676125	1000.00	649.1
3	-0.158023	0.674078	1000.00	0.0	-0.158796	0.679107	1000.00	493.1
4	-0.158792	0.679096	1000.00	0.0	-0.158022	0.674072	1000.00	492.5
5	-0.160925	0.674605	1000.00	0.0	-0.155372	0.678427	1000.00	656.0
6	-0.155374	0.678422	1000.00	0.0	-0.160922	0.674608	1000.00	655.1
7	-0.155827	0.674825	1000.00	0.0	-0.161291	0.678104	1000.00	620.3
8	-0.161291	0.678105	1000.00	0.0	-0.155827	0.674825	1000.00	620.4
9	-0.159423	0.674299	1000.00	0.0	-0.157011	0.679057	1000.00	517.6
10	-0.157010	0.679055	1000.00	0.0	-0.159423	0.674298	1000.00	517.5
11	-0.155297	0.675718	1000.00	0.0	-0.161817	0.677071	1000.00	649.1
12	-0.161809	0.677071	1000.00	0.0	-0.155276	0.675711	1000.00	650.5
13	-0.154928	0.677618	1000.00	0.0	-0.161564	0.675161	1000.00	689.4
14	-0.161553	0.675161	1000.00	0.0	-0.154917	0.677618	1000.00	689.4



Figura 5.12: Projeção Terrestre das Trajetórias Planificadas para a Simulação II

Tabela 5.5: Dinâmica das Aeronaves para o Exemplo II

N	V [m/s]		γ [rad]		Ψ [rad]		\dot{V} [m/s ²]		$\dot{\gamma}$ [rad/s]		$\dot{\Psi}$ [rad/s]	
	V_{min}	V_{max}	γ_{min}	γ_{max}	Ψ_{min}	Ψ_{max}	\dot{V}_{min}	\dot{V}_{max}	$\dot{\gamma}_{min}$	$\dot{\gamma}_{max}$	$\dot{\Psi}_{min}$	$\dot{\Psi}_{max}$
1	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
2	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
3	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
4	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
5	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
6	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
7	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
8	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
9	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
10	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
11	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
12	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
13	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021
14	50.0	80.0	-0.26	0.26	-3.14	3.14	-1.0	1.0	-0.0021	0.0021	-0.0021	0.0021

Tabela 5.6: Distância Mínima de Separação em Metros Obtida para o Exemplo II

N	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄
A ₁	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₂	1022.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₃	4647.8	4142.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₄	4262.2	1020.4	1828.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₅	1957.7	1171.8	4111.9	2605.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₆	2598.9	5122.8	7474.1	2842.6	3514.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₇	1869.8	1879.7	4965.3	3938.8	2325.1	7036.3	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₈	2014.4	5715.5	1002.1	5349.7	1221.0	4974.5	7189.2	—	—	—	—	—	—	—
A ₉	1299.9	9927.4	4231.5	9668.6	1353.8	14221.3	8377.6	9204.7	—	—	—	—	—	—
A ₁₀	8211.5	5882.0	8225.1	2700.3	7623.8	1007.8	10087.0	8437.2	14963.6	—	—	—	—	—
A ₁₁	3256.2	1001.6	5372.2	3317.9	3304.7	6103.8	1742.2	8172.2	10784.7	8745.0	—	—	—	—
A ₁₂	2520.1	8494.7	998.1	7555.5	1001.2	9446.3	9109.5	2611.8	8086.2	12487.8	10806.8	—	—	—
A ₁₃	11654.6	4633.4	10623.8	4175.3	11152.2	3344.8	10034.6	12140.1	16188.1	2873.7	7452.1	16785.1	—	—
A ₁₄	1018.8	4237.5	3971.6	6885.3	1966.1	6722.2	4176.3	4381.1	1925.1	11439.5	6202.9	3308.2	15117.4	—

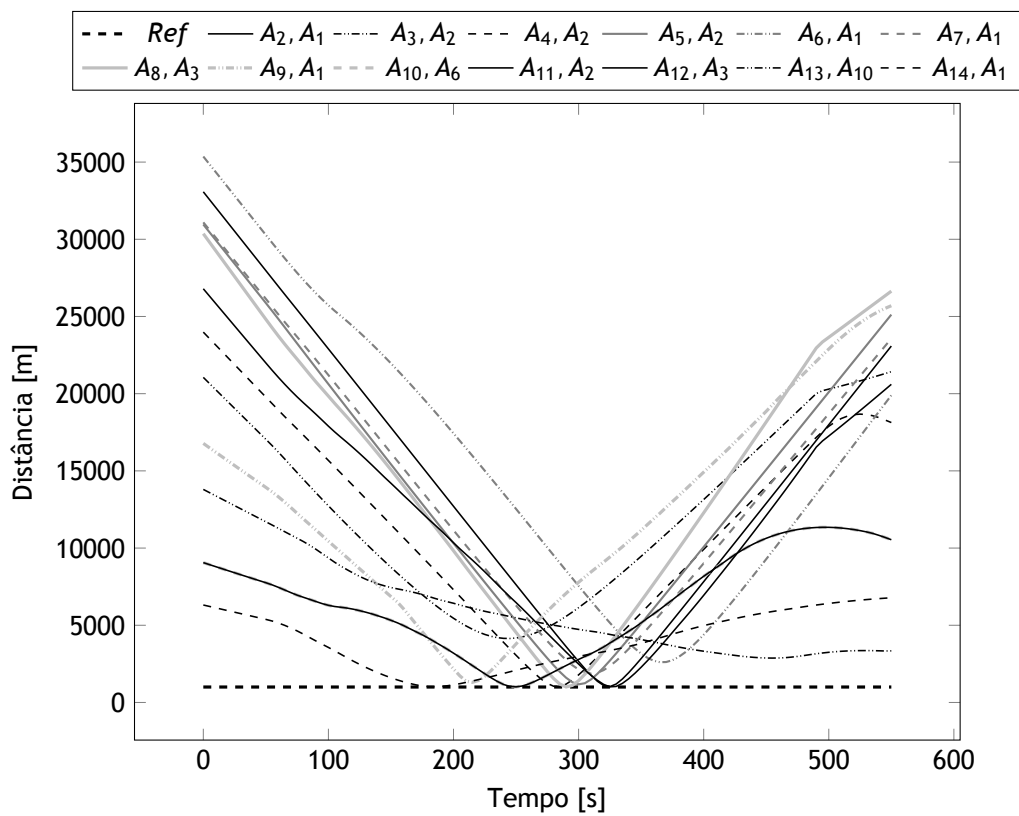


Figura 5.13: Gráfico das Distâncias entre Pares com menor distância para a Simulação II

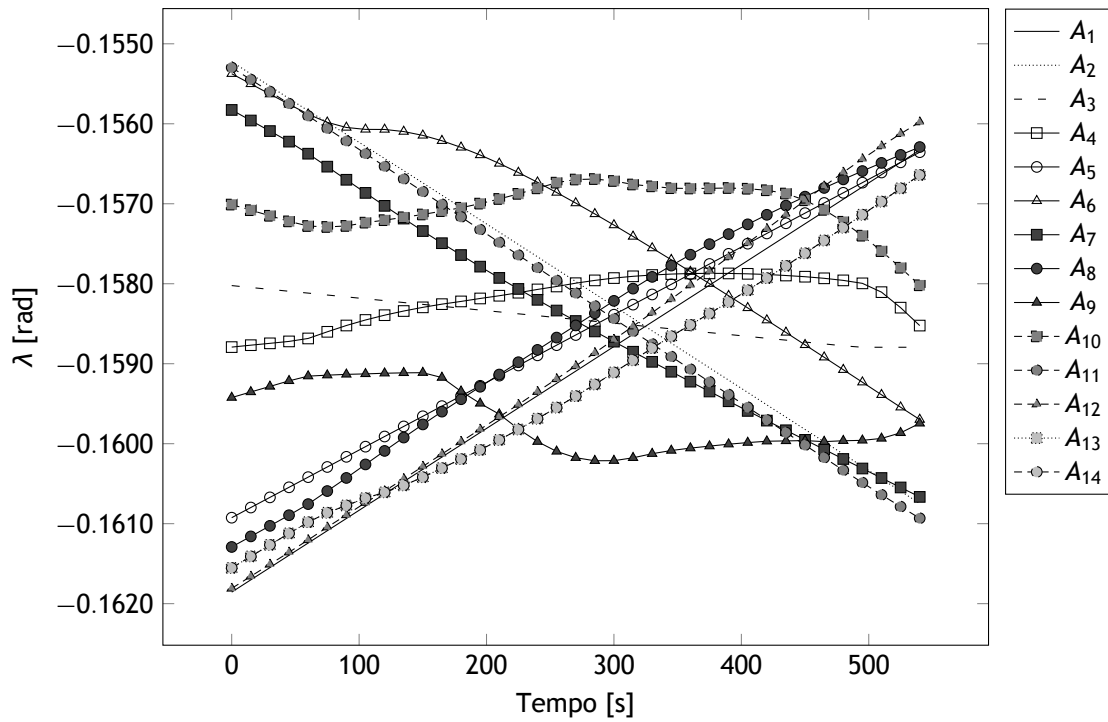


Figura 5.14: Gráfico da Longitude em relação ao Tempo da Simulação II

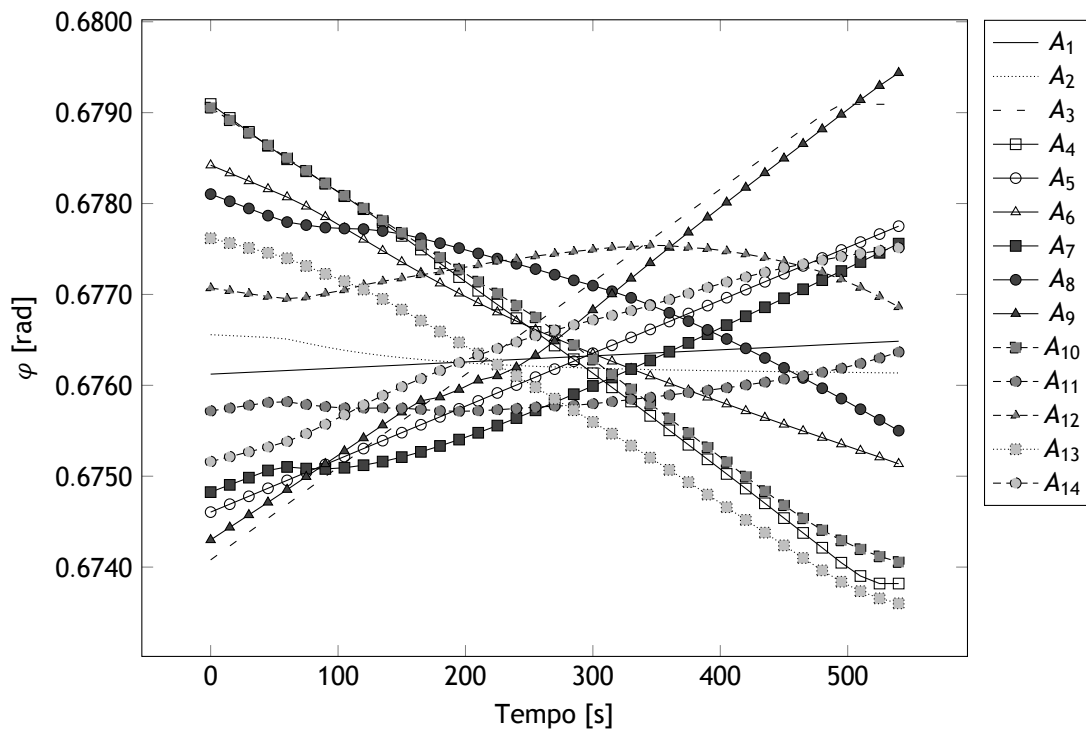


Figura 5.15: Gráfico da Latitude em relação ao Tempo da Simulação II

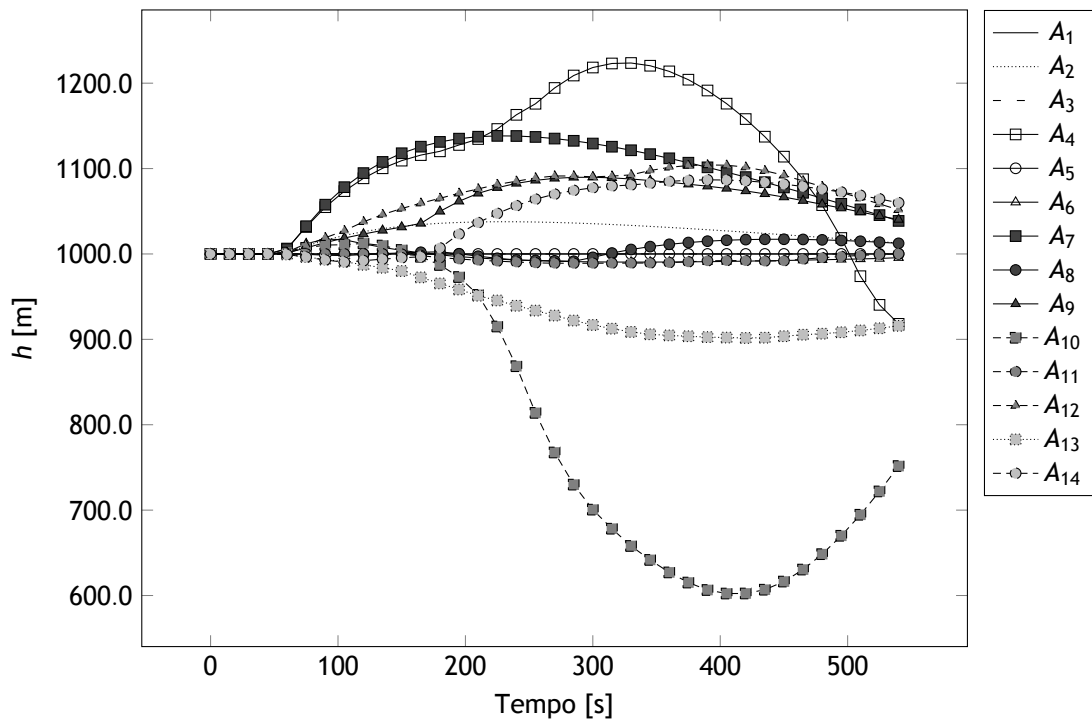


Figura 5.16: Gráfico da Altitude em relação ao Tempo da Simulação II

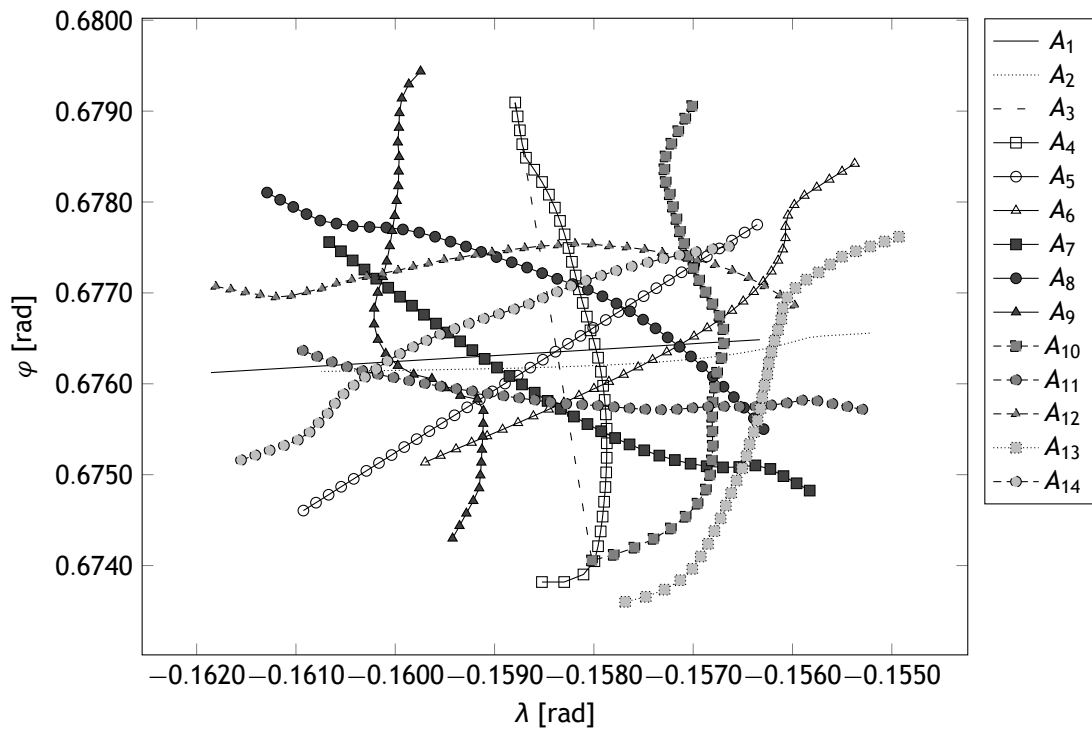


Figura 5.17: Gráfico da Projeção Terrestre da Simulação II

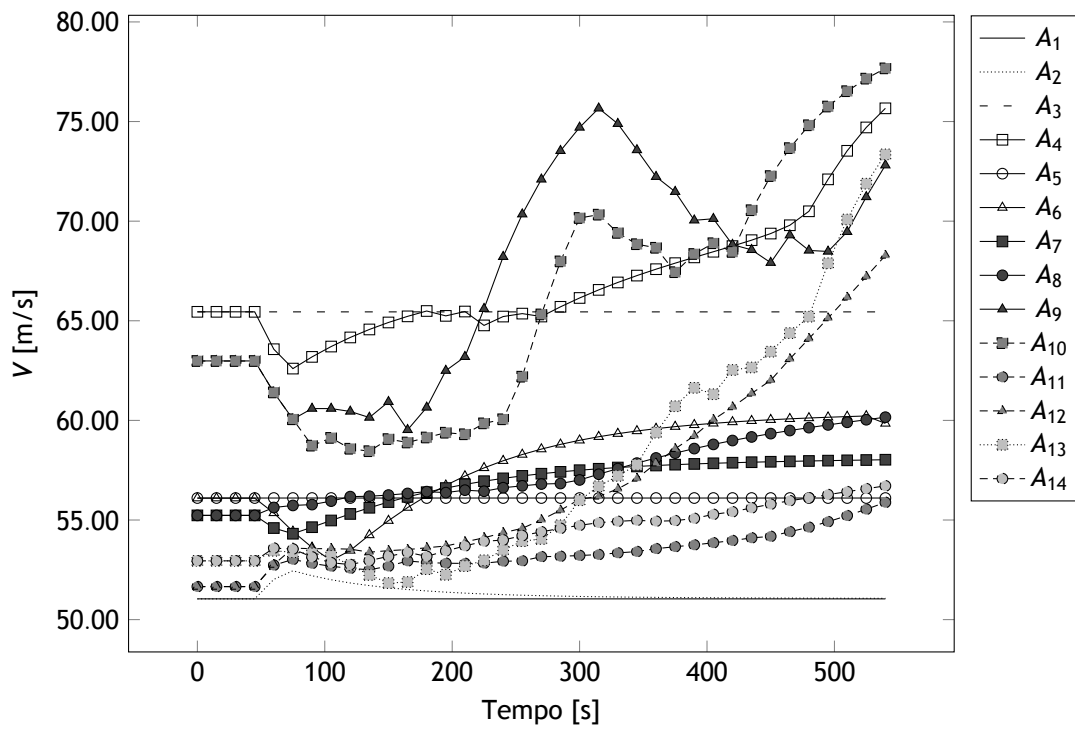


Figura 5.18: Gráfico da Velocidade em relação ao Tempo da Simulação II

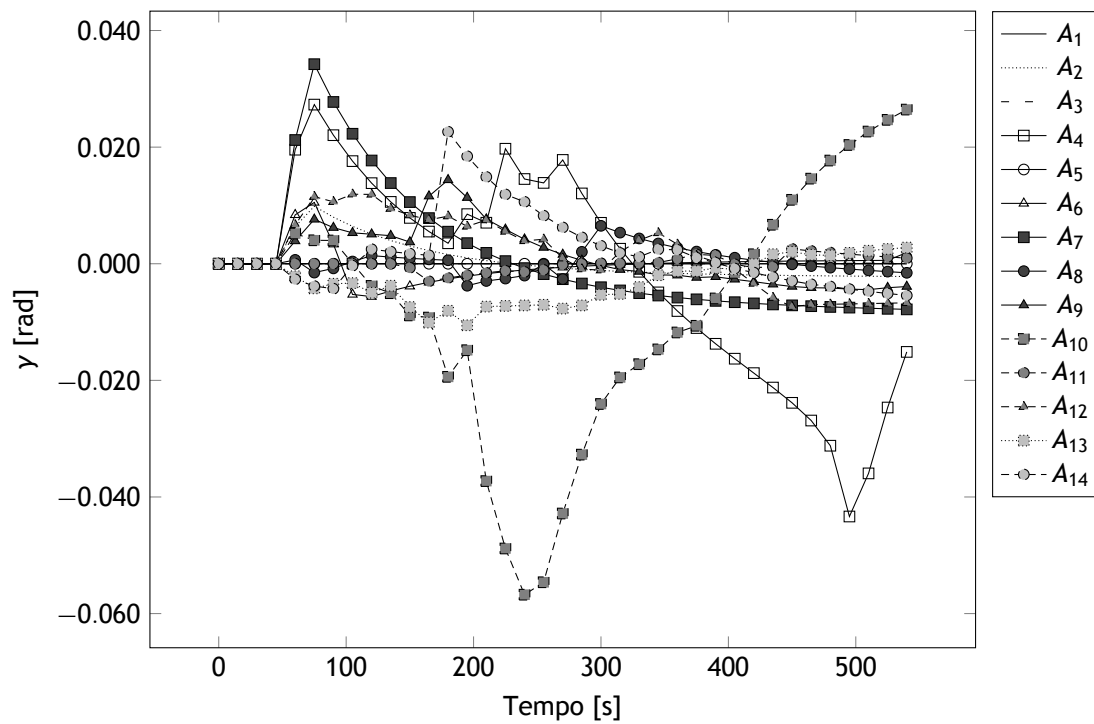


Figura 5.19: Gráfico do Ângulo de Trajetória em relação ao Tempo da Simulação II

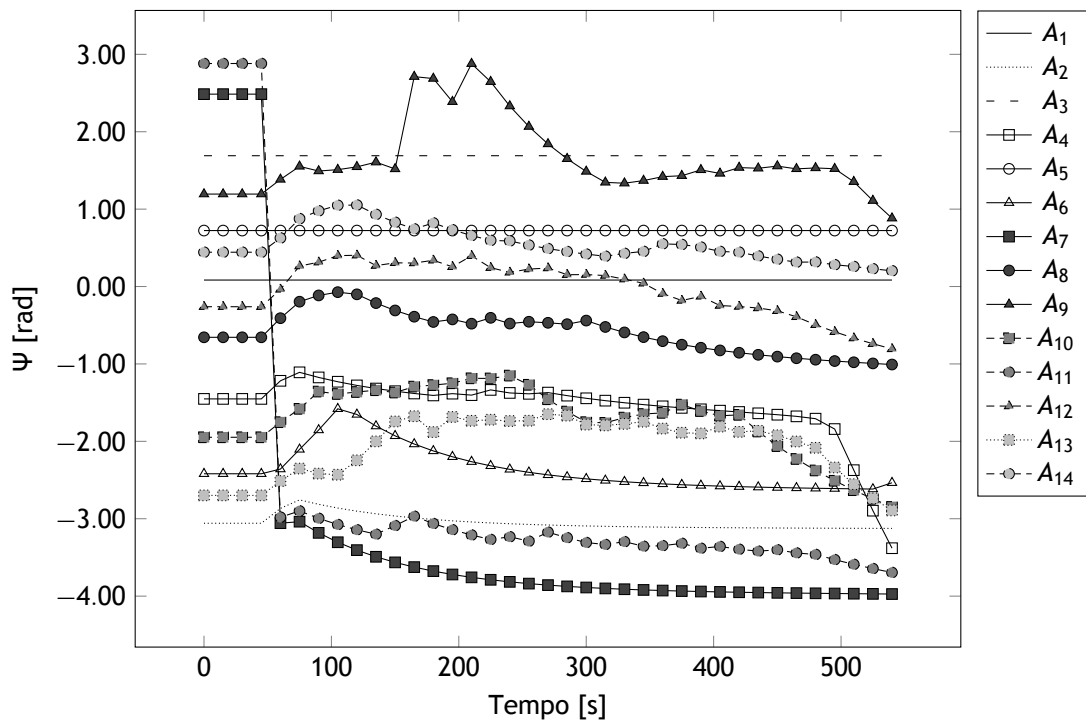


Figura 5.20: Gráfico do Rumo em relação ao Tempo da Simulação II

5.3.3 Simulação III

A terceira simulação é em tudo idêntica à segunda, exceto nas altitudes do plano de voo, como se pode constatar na Tabela 5.7. A configuração inicial das aeronaves é idêntica à da Figura 5.12 relativamente à projeção terrestre, no entanto algumas aeronaves estão em trajetórias ascendentes, outras em trajetórias descendentes.

O objetivo principal era provocar alguma “*entropia*” no cenário e observar o comportamento das aeronaves. Assim, foi realizada a simulação e os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 5.22, 5.23 e 5.24, pela Longitude, Latitude e Altitude, respetivamente. Pelas Figuras 5.26, 5.27 e 5.28 são ilustrados a Velocidade, Ângulo de Trajetória e Rumo, respetivamente. Quanto à projeção terrestre as trajetórias tomadas por cada uma das aeronaves pode ser observada na Figura 5.25.

Sem muito mais a acrescentar, as distâncias mínimas de separação entre aeronaves estão presentes na Tabela 5.8 e na Figura 5.21 é possível observar o comportamento da distância ao longo do tempo, dos pares de aeronaves com menor distância mínima. Desta vez foram os pares A_{10}, A_6 e A_{12}, A_5 que viram as suas distâncias mínimas comprometidas, pelas mesmas razões das simulações anteriores.

Tabela 5.7: Plano de Voo para o Exemplo III

Número Aeronave	Número do Waypoint							
	$Waypoint_0$				$Waypoint_1$			
N	λ_0 [rad]	φ_0 [rad]	h_0 [m]	τ_0 [s]	λ_1 [rad]	φ_1 [rad]	h_1 [m]	τ_1 [s]
1	-0.161856	0.676123	500.00	0.0	-0.155222	0.676557	1500.00	648.1
2	-0.155223	0.676557	1500.00	0.0	-0.161868	0.676125	500.00	649.1
3	-0.158023	0.674078	600.00	0.0	-0.158796	0.679107	1200.00	493.1
4	-0.158792	0.679096	1200.00	0.0	-0.158022	0.674072	600.00	492.5
5	-0.160925	0.674605	400.00	0.0	-0.155372	0.678427	1000.00	656.0
6	-0.155374	0.678422	1000.00	0.0	-0.160922	0.674608	400.00	655.1
7	-0.155827	0.674825	1000.00	0.0	-0.161291	0.678104	1000.00	620.3
8	-0.161291	0.678105	500.00	0.0	-0.155827	0.674825	1500.00	620.4
9	-0.159423	0.674299	1500.00	0.0	-0.157011	0.679057	500.00	517.6
10	-0.157010	0.679055	600.00	0.0	-0.159423	0.674298	1200.00	517.5
11	-0.155297	0.675718	1200.00	0.0	-0.161817	0.677071	600.00	649.1
12	-0.161809	0.677071	400.00	0.0	-0.155276	0.675711	1000.00	650.5
13	-0.154928	0.677618	1000.00	0.0	-0.161564	0.675161	400.00	689.4
14	-0.161553	0.675161	1000.00	0.0	-0.154917	0.677618	1000.00	689.4

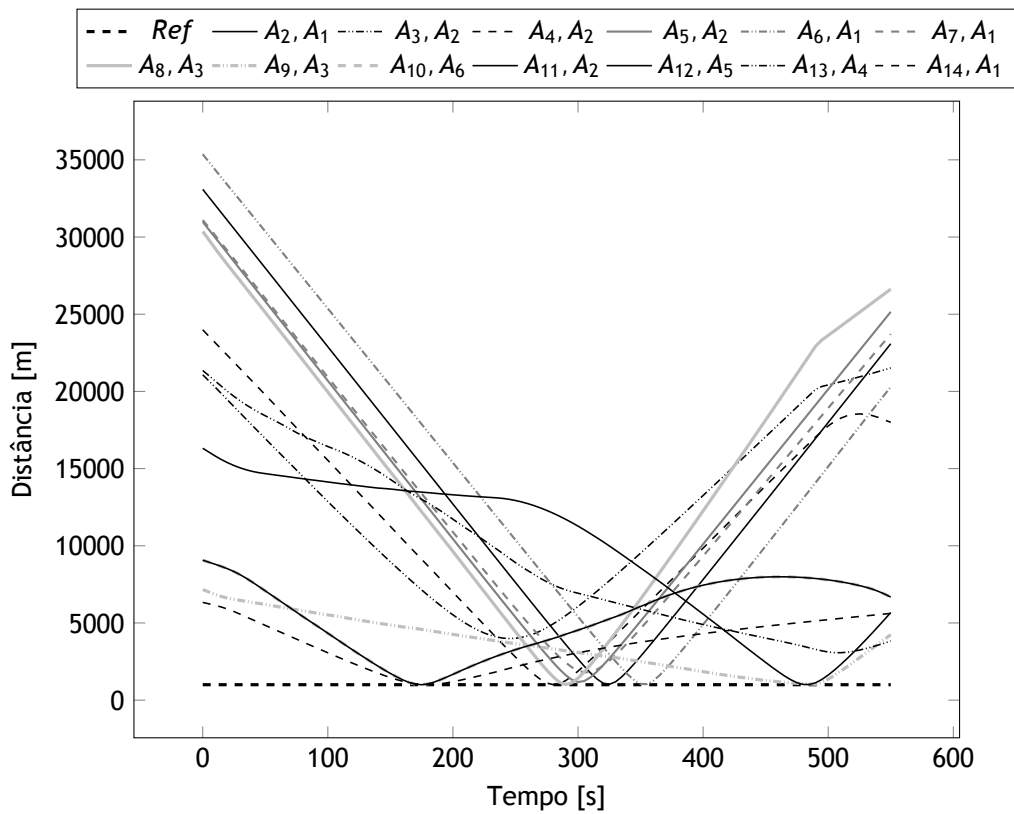


Figura 5.21: Gráfico das Distâncias entre Pares com menor distância para a Simulação III

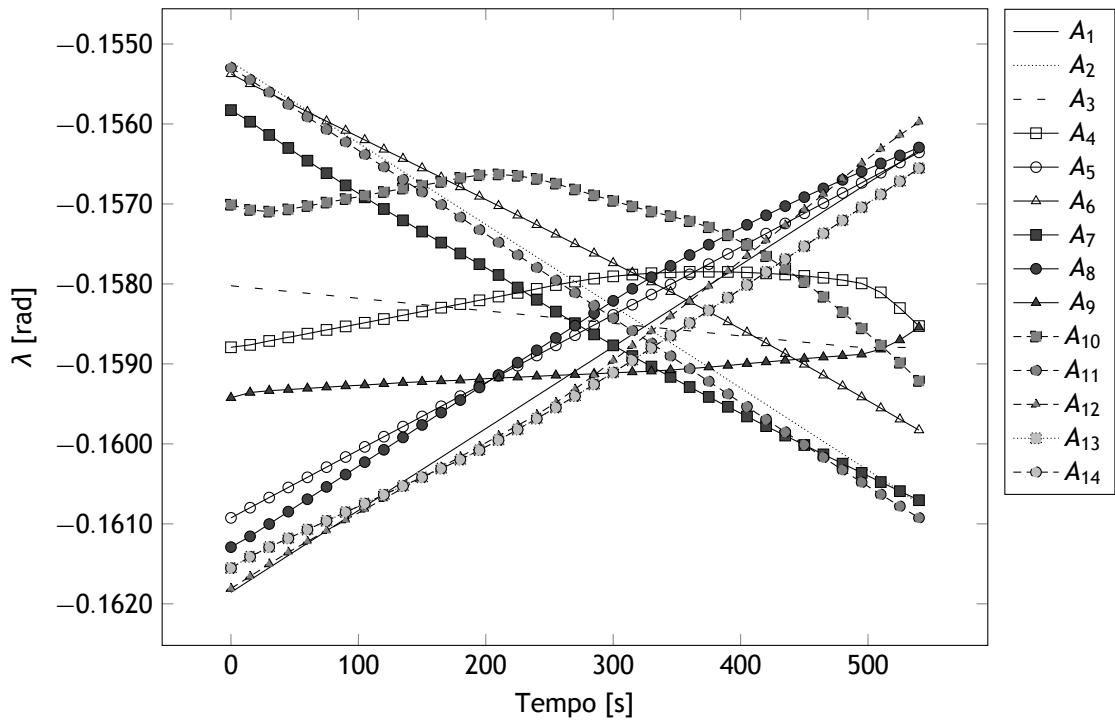


Figura 5.22: Gráfico da Longitude em relação ao Tempo da Simulação III

Tabela 5. 8: Distância Mínima de Separação em Metros Obtida para o Exemplo III

N	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄
A ₁	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₂	1022.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₃	4647.5	3990.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₄	4335.0	1001.6	1906.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₅	1979.4	1169.9	4120.9	2706.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₆	1012.3	3235.9	4683.1	2696.5	1292.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₇	1793.8	2224.9	4344.4	4112.4	2033.3	5294.3	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₈	1989.0	5668.9	1015.3	5278.9	1247.5	3782.3	7245.9	—	—	—	—	—	—	—
A ₉	2180.4	7109.0	1022.2	5500.0	2517.6	7849.8	7152.1	3665.1	—	—	—	—	—	—
A ₁₀	6963.6	5944.4	8303.4	1220.0	6595.4	997.5	9032.0	7992.9	11755.5	—	—	—	—	—
A ₁₁	3028.4	1003.7	5204.7	3212.7	3042.2	4452.7	1922.8	7942.8	8397.4	7639.8	—	—	—	—
A ₁₂	3566.8	11608.4	2162.5	9729.2	999.4	10900.2	11262.7	3312.4	3956.1	15436.0	13461.4	—	—	—
A ₁₃	10473.8	4994.7	10490.6	3069.4	9669.4	5244.3	9198.6	11580.0	14108.4	3646.3	7125.1	19260.3	—	—
A ₁₄	1000.2	4321.5	3887.7	7009.6	2078.4	4724.2	4216.8	4290.3	2129.7	10390.3	6089.7	2832.2	13877.3	—

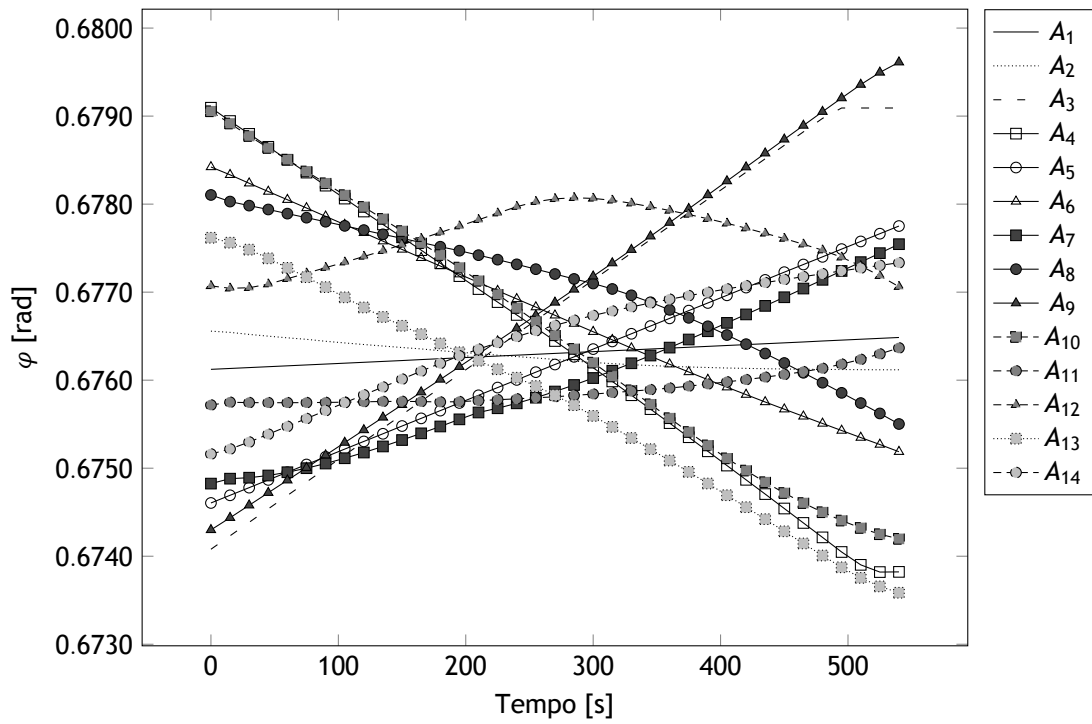


Figura 5.23: Gráfico da Latitude em relação ao Tempo da Simulação III

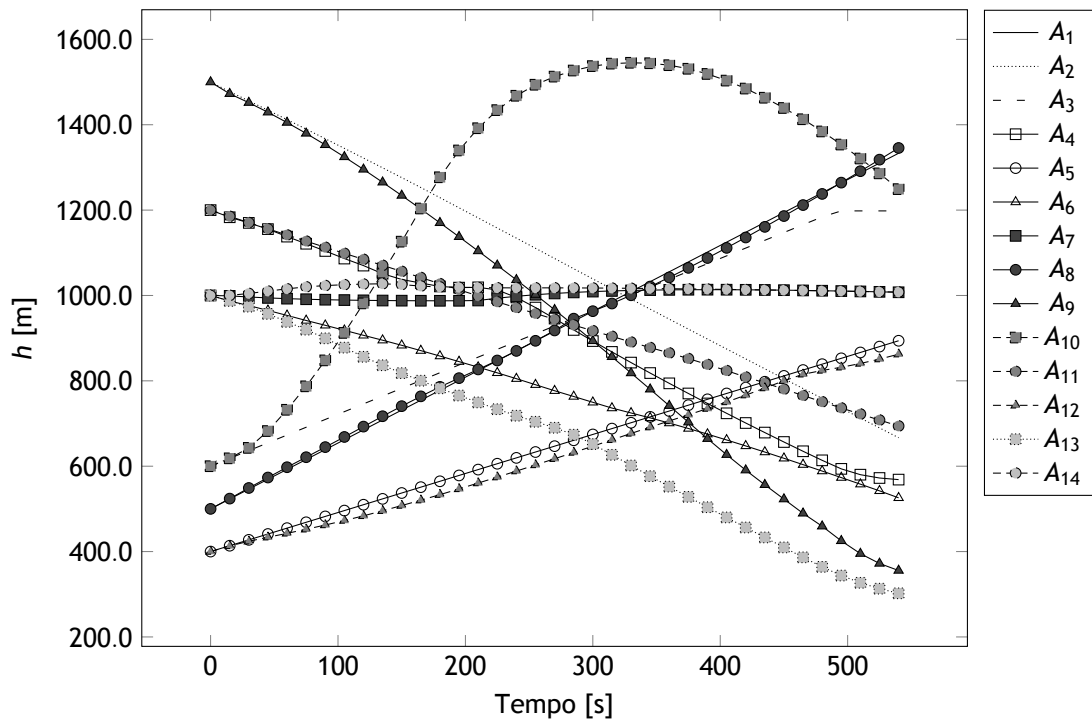


Figura 5.24: Gráfico da Altitude em relação ao Tempo da Simulação III

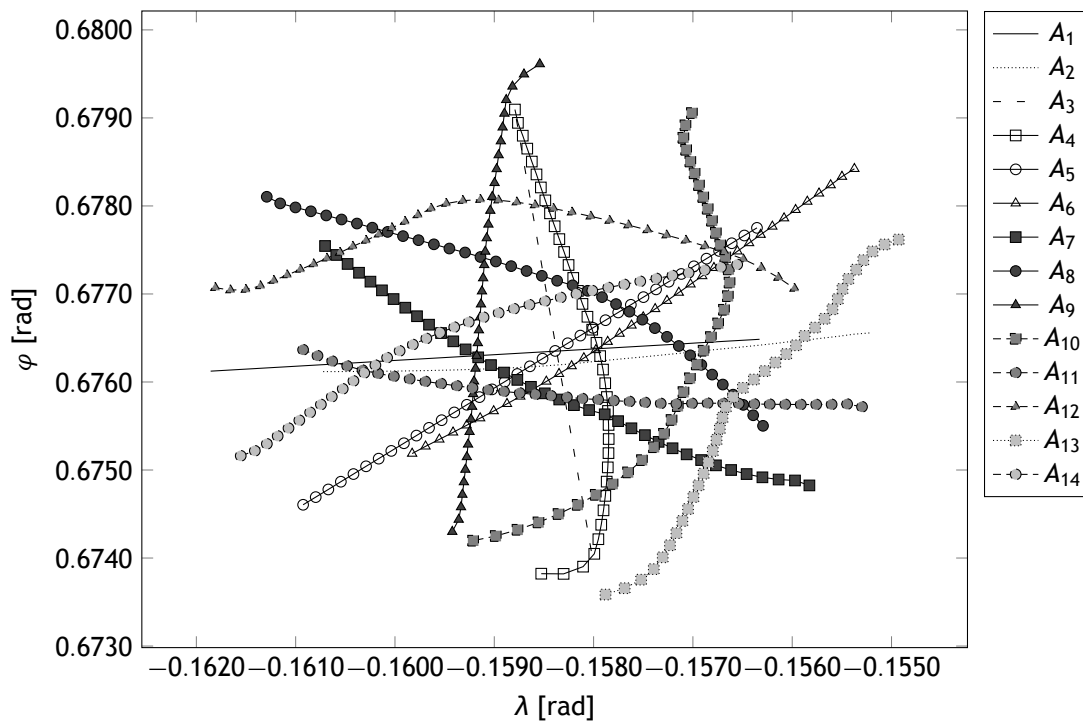


Figura 5.25: Gráfico da Projeção Terrestre da Simulação III

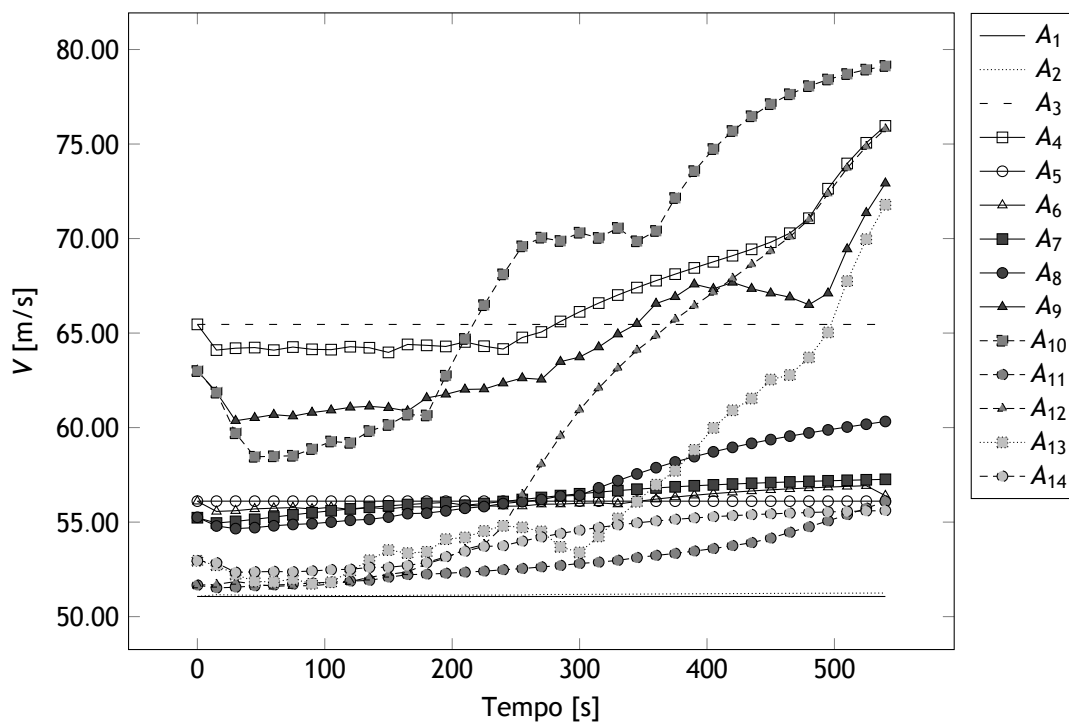


Figura 5.26: Gráfico da Velocidade em relação ao Tempo da Simulação III

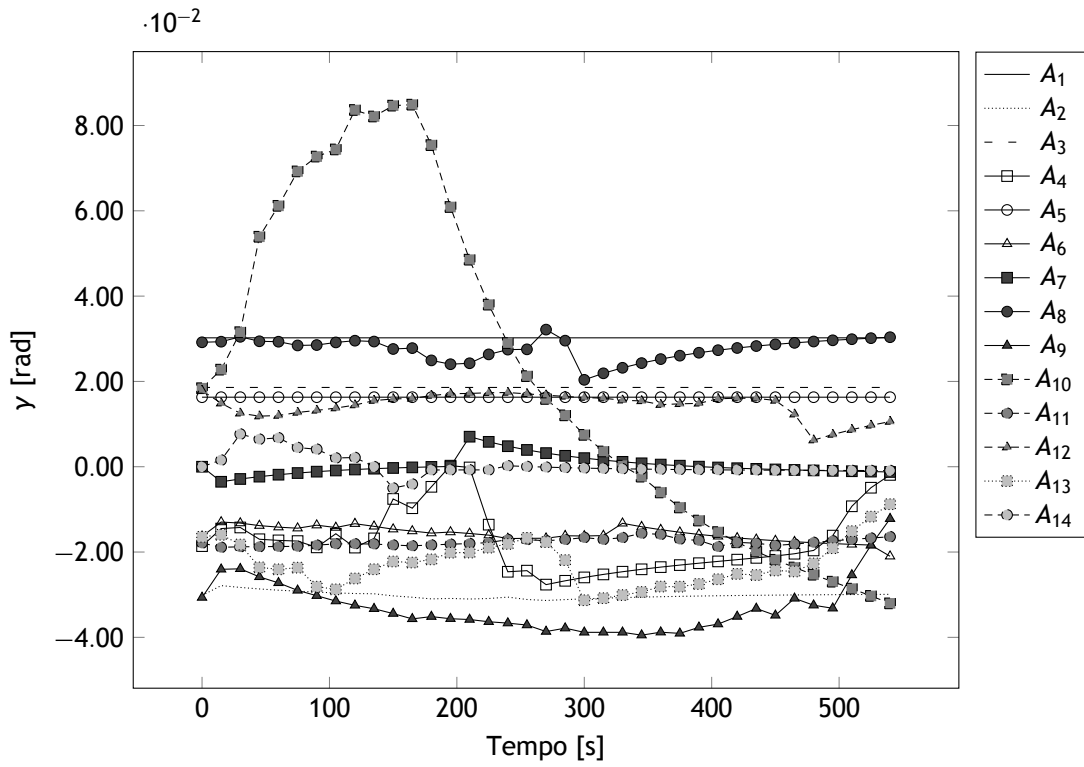


Figura 5.27: Gráfico do Ângulo de Trajetória em relação ao Tempo da Simulação III

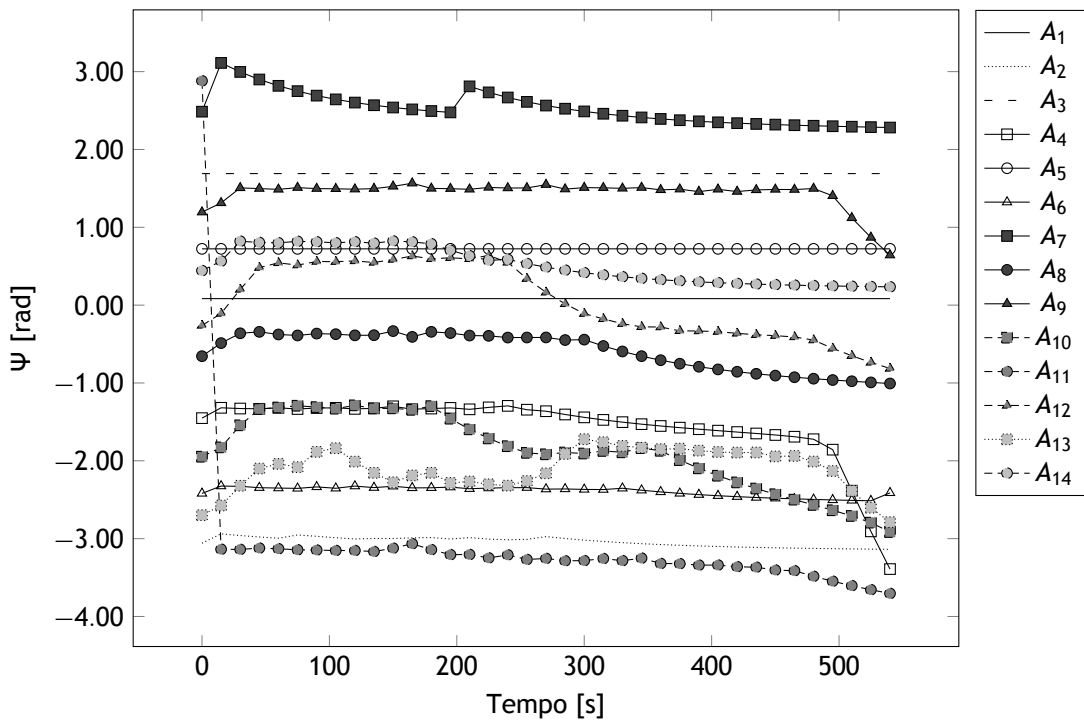


Figura 5.28: Gráfico do Rumo em relação ao Tempo da Simulação III

5.3.4 Simulação IV

Na presente simulação, como explicado no início desta secção, as simulações IV e V destinam-se à análise do comportamento do SAPC na presença de vento e turbulência. O objetivo é realizar uma introdução à validação do sistema sob a presença de fenómenos estocásticos.

Foi então realizada uma simulação em tempo real para a mesma configuração da simulação I, no entanto, é introduzido segundo os modelos de Dryden um parâmetro de vento (com uma direção qualquer). Após aproximadamente 10 minutos de simulação o resultado das separações mínimas é apresentado na Tabela 5.9 e na Figura 5.29 é possível observar o comportamento da distância ao longo do tempo, dos pares de aeronaves com menor distância mínima².

É possível verificar nos próximos gráficos qual foi o comportamento ao longo do tempo de cada UAV, assim, nos 5.30, 5.31 e 5.32 tem-se os gráficos da Longitude, Latitude e Altitude, respetivamente, para cada aeronave, identificado por A_i com $i = 1 \dots 10$, por sua vez nos gráficos 5.34, 5.35 e 5.36 estão representados a Velocidade, Ângulo de Trajetória e Rumo, respetivamente. Por fim, no gráfico 5.33 pode ser analisado o comportamento das trajetórias projetadas no solo.

Em comparação com a simulação I, é possível verificar um ligeiro desvio nas várias trajetórias, o qual é devido à componente do vento. No entanto, e devido ao facto da característica de preditividade do AuCAS é possível continuar a assegurar a distância mínima. Contudo como irá ser visto na próxima simulação, com a introdução de turbulência, que o sistema tem mais dificuldades em lidar com os conflitos.

Tabela 5.9: Distância Mínima de Separação em Metros Obitda para o Exemplo IV

N	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}
A_1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A_2	1000.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A_3	4519.6	3936.8	—	—	—	—	—	—	—	—
A_4	981.5	2672.3	2784.7	—	—	—	—	—	—	—
A_5	1944.6	1087.5	3999.8	2573.6	—	—	—	—	—	—
A_6	1000.6	3452.4	4821.7	4906.6	1400.8	—	—	—	—	—
A_7	1277.7	2021.2	4196.8	1325.1	1546.6	5218.8	—	—	—	—
A_8	1994.5	5074.5	1004.2	2322.1	1091.5	3051.6	6231.6	—	—	—
A_9	3565.8	4719.7	998.7	1505.4	3083.0	5474.6	5046.4	2033.5	—	—
A_{10}	2237.9	1000.8	2308.5	1339.3	1257.6	2584.3	3182.4	4271.5	3367.4	—

²Apesar de se verificar na Tabela 5.9 valores abaixo da distância mínima, estes não são propriamente refletidos na Figura 5.29, pois devido ao número elevado de valores foi necessário realizar uma filtragem para efeitos de uma melhor visualização

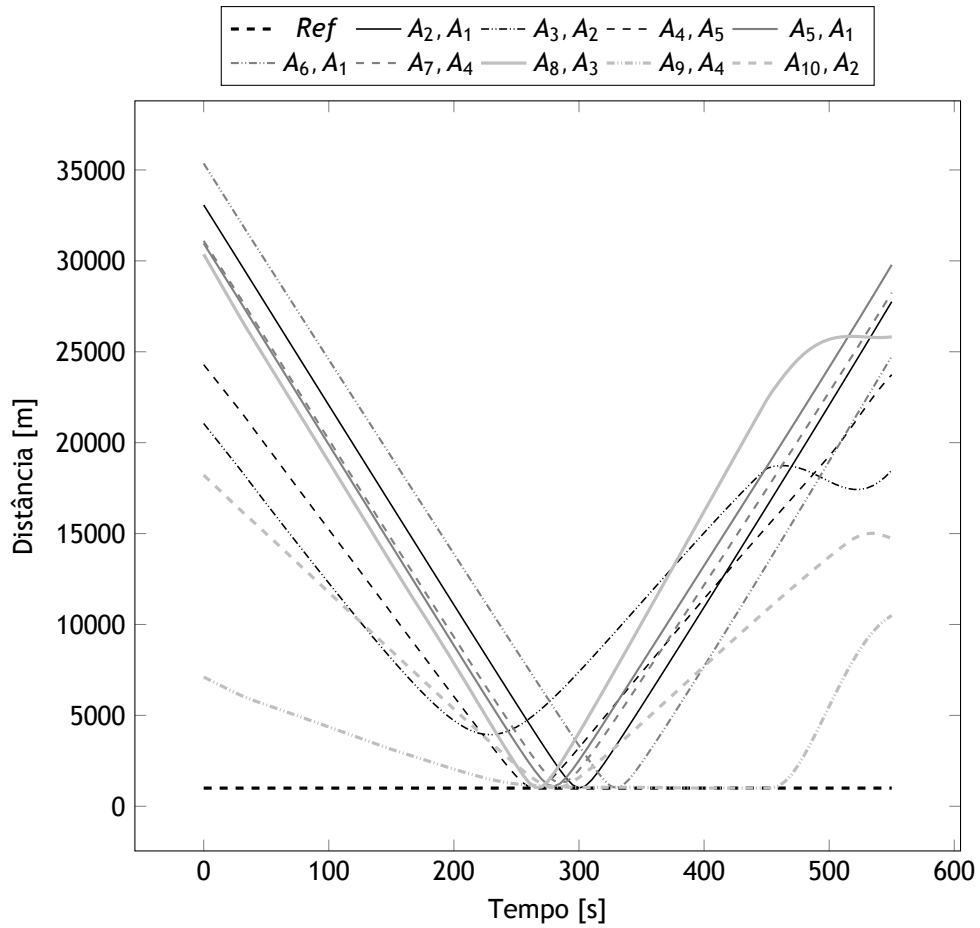


Figura 5.29: Gráfico das Distâncias entre Pares com menor distância para a Simulação IV

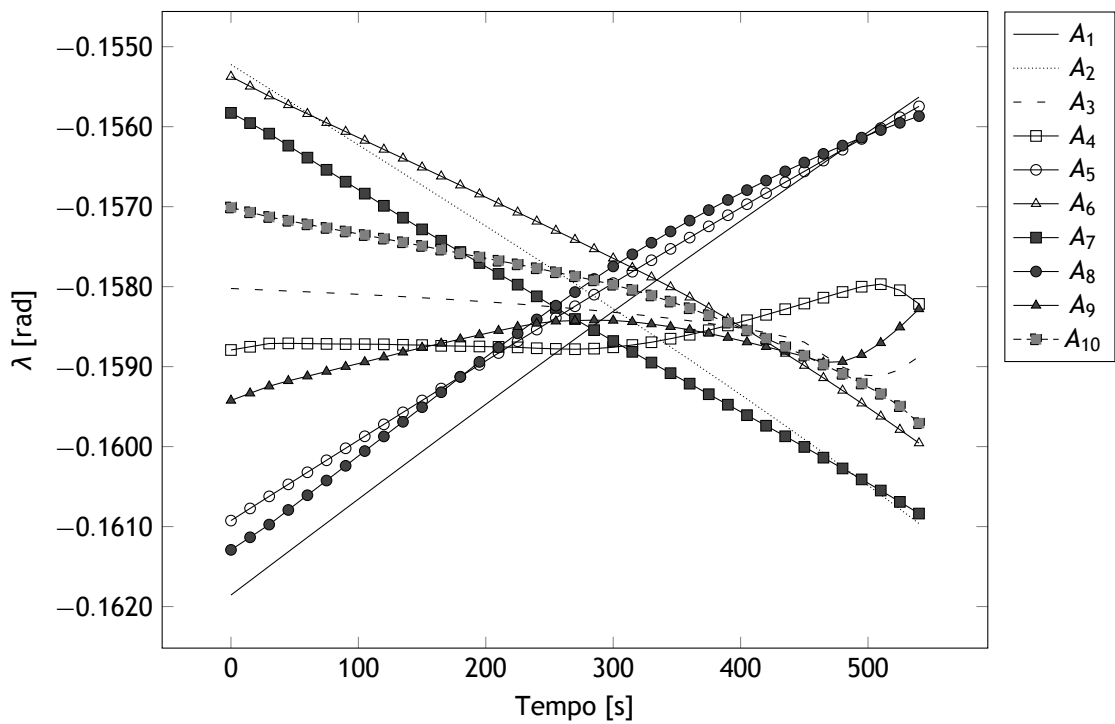


Figura 5.30: Gráfico da Longitude em relação ao Tempo da Simulação IV

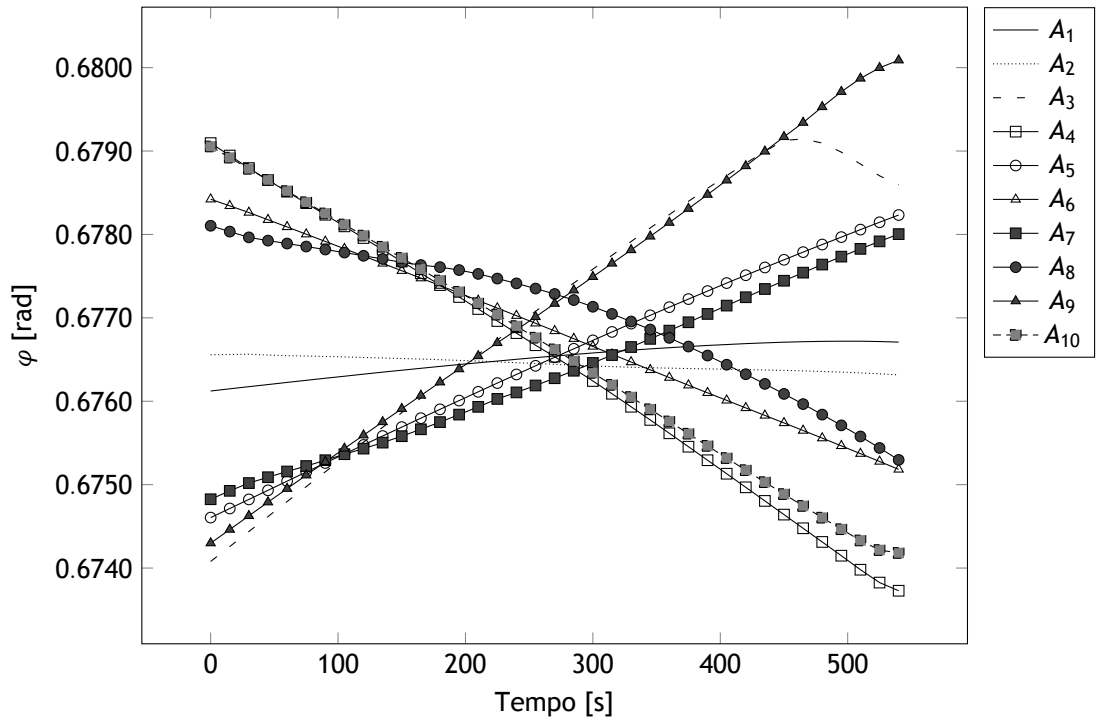


Figura 5.31: Gráfico da Latitude em relação ao Tempo da Simulação IV

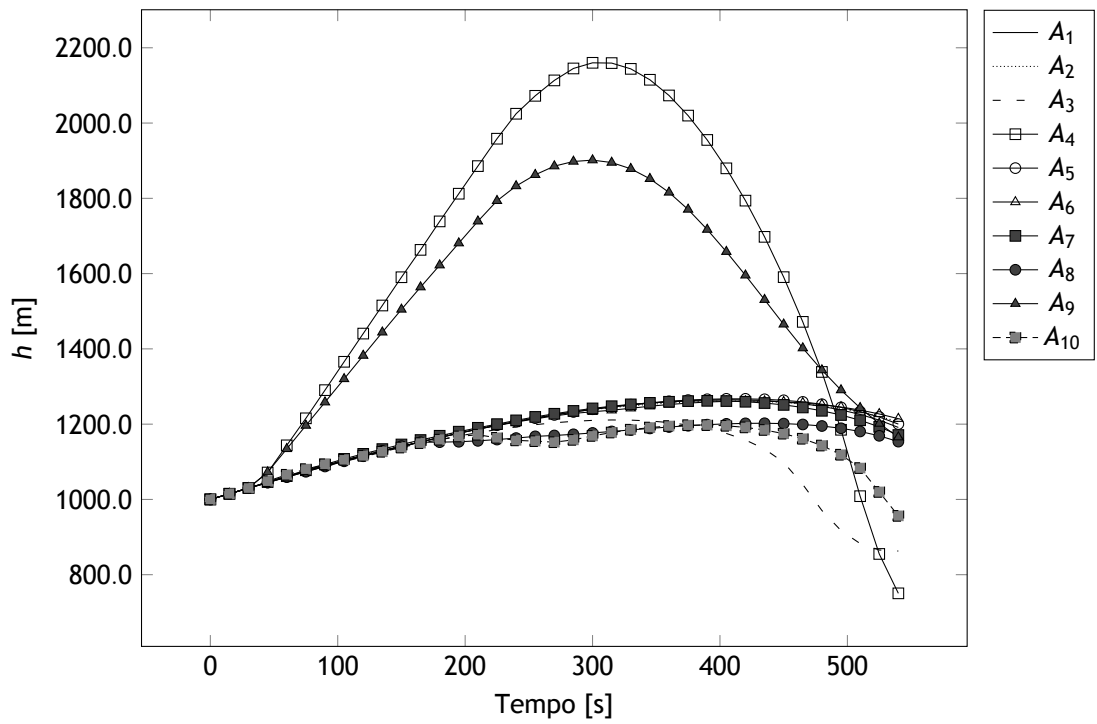


Figura 5.32: Gráfico da Altitude em relação ao Tempo da Simulação IV

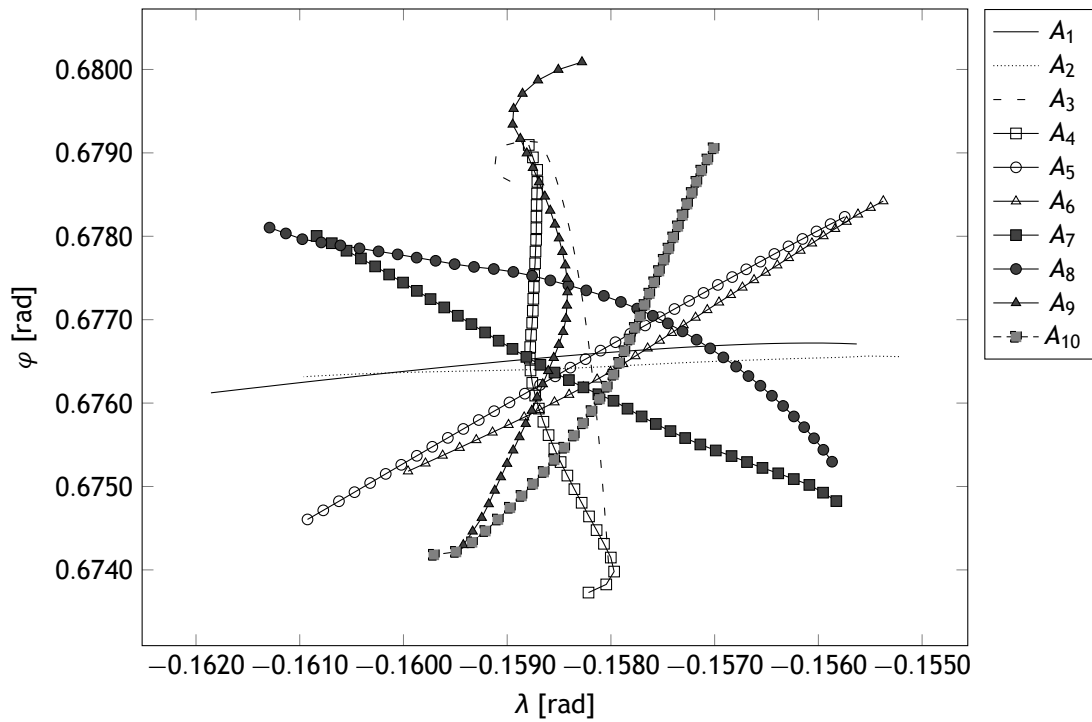


Figura 5.33: Gráfico da Projeção Terrestre da Simulação IV

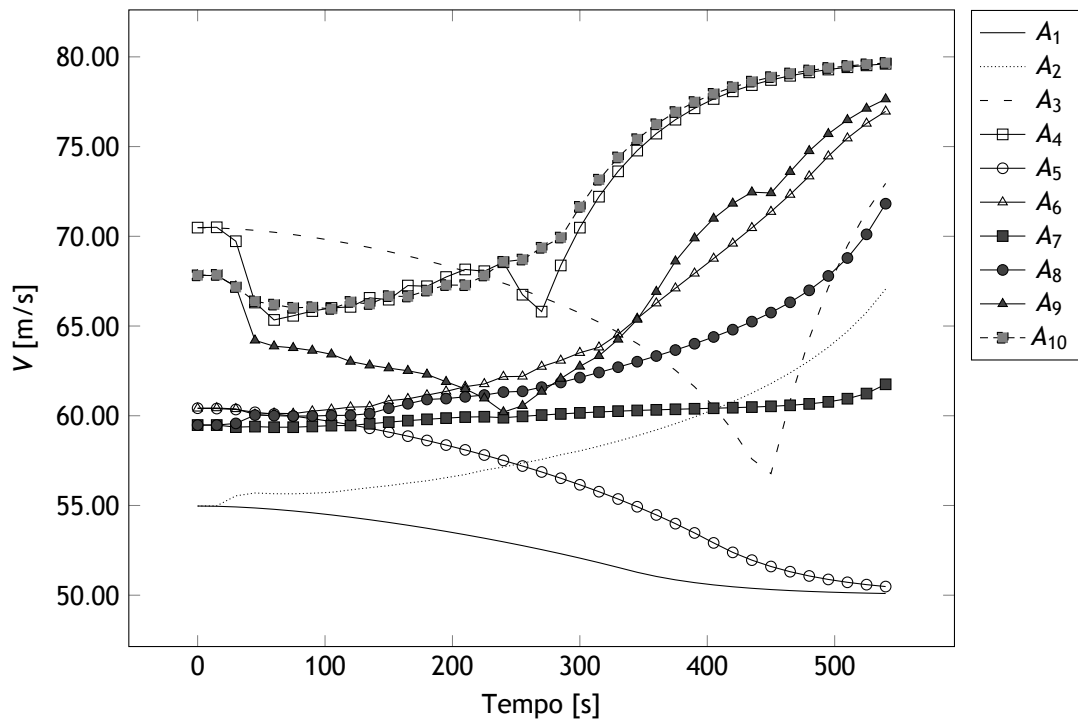


Figura 5.34: Gráfico da Velocidade em relação ao Tempo da Simulação IV

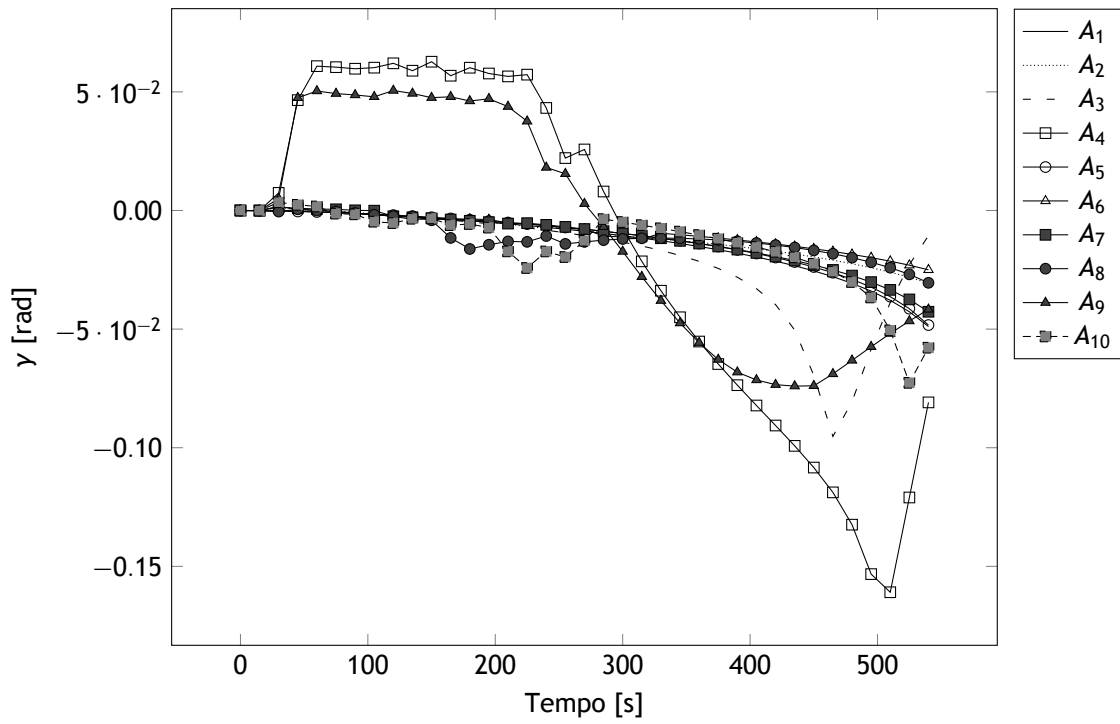


Figura 5.35: Gráfico do Ângulo de Trajetória em relação ao Tempo da Simulação IV

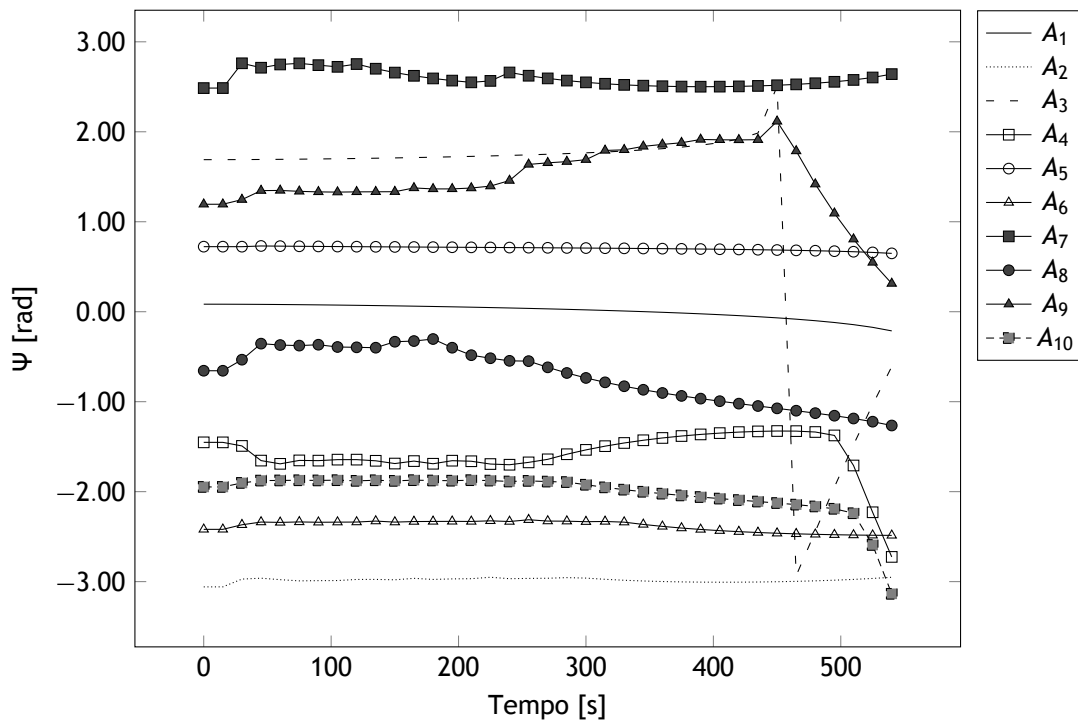


Figura 5.36: Gráfico do Rumo em relação ao Tempo da Simulação IV

5.3.5 Simulação V

No seguimento da simulação anterior, é agora adicionada turbulência por meio de ruído branco no modelo de turbulência de Dryden. Assim e após aproximadamente 10 minutos de simulação o resultado das separações mínimas é apresentado na Tabela 5.10 e no gráfico 5.37 é possível observar o comportamento da distância ao longo do tempo, dos pares de aeronaves com menor distância mínima³.

É possível verificar nos próximos gráficos qual foi o comportamento ao longo do tempo de cada UAV, assim, nos 5.38, 5.39 e 5.40 tem-se os gráficos da Longitude, Latitude e Altitude, respetivamente, para cada aeronave, identificado por A_i com $i = 1 \dots 10$, por sua vez nos gráficos 5.42, 5.43 e 5.44 estão representados a Velocidade, Ângulo de Trajetória e Rumo, respetivamente. Por fim, no gráfico 5.41 pode ser analisado o comportamento das trajetórias projetadas no solo.

O que é realmente necessário salientar aqui, é que já não é tão fácil garantir a distância de separação mínima. Este facto acontece sobretudo por dois motivos, o primeiro, como foi referido o AuCAS computa sempre o waypoint de evasão segundo exatamente a distância de separação mínima. Deste modo, duas aeronaves com uma distância de separação perto da separação mínima, na presença de turbulência, podem perfeitamente comprometer a distância mínima. Tal facto, leva ao segundo motivo, que é das aeronaves, na presença de turbulência terem ou não capacidade de cumprirem as trajetórias de evasão.

Assim, no futuro, deverá ser interessante fazer um estudo mais aprofundado relativamente ao comportamento do AuCAS na presença de turbulência, visto que, é relativamente simples lidar com correções de vento constantes.

Tabela 5.10: Distância Mínima de Separação em Metros Obtida para o Exemplo V

N	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}
A_1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A_2	946.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A_3	3859.1	4321.8	—	—	—	—	—	—	—	—
A_4	1354.2	1746.4	1121.4	—	—	—	—	—	—	—
A_5	1151.2	5561.5	3214.1	4185.9	—	—	—	—	—	—
A_6	895.6	2965.7	5239.3	3771.1	6390.8	—	—	—	—	—
A_7	1214.1	3160.2	3986.7	1564.6	3810.2	6010.4	—	—	—	—
A_8	1396.2	5351.0	1303.8	4227.2	4686.1	3831.3	6513.9	—	—	—
A_9	3241.7	4488.8	813.8	1600.8	3115.4	4913.8	4175.3	1456.4	—	—
A_{10}	1846.2	811.6	2740.6	934.7	6066.8	2226.6	3779.8	4844.0	3208.0	—

³Apesar de se verificar na Tabela 5.10 valores abaixo da distância mínima, estes não são propriamente refletidos na Figura 5.37, pois devido ao número elevado de valores foi necessário realizar uma filtragem para efeitos de uma melhor visualização

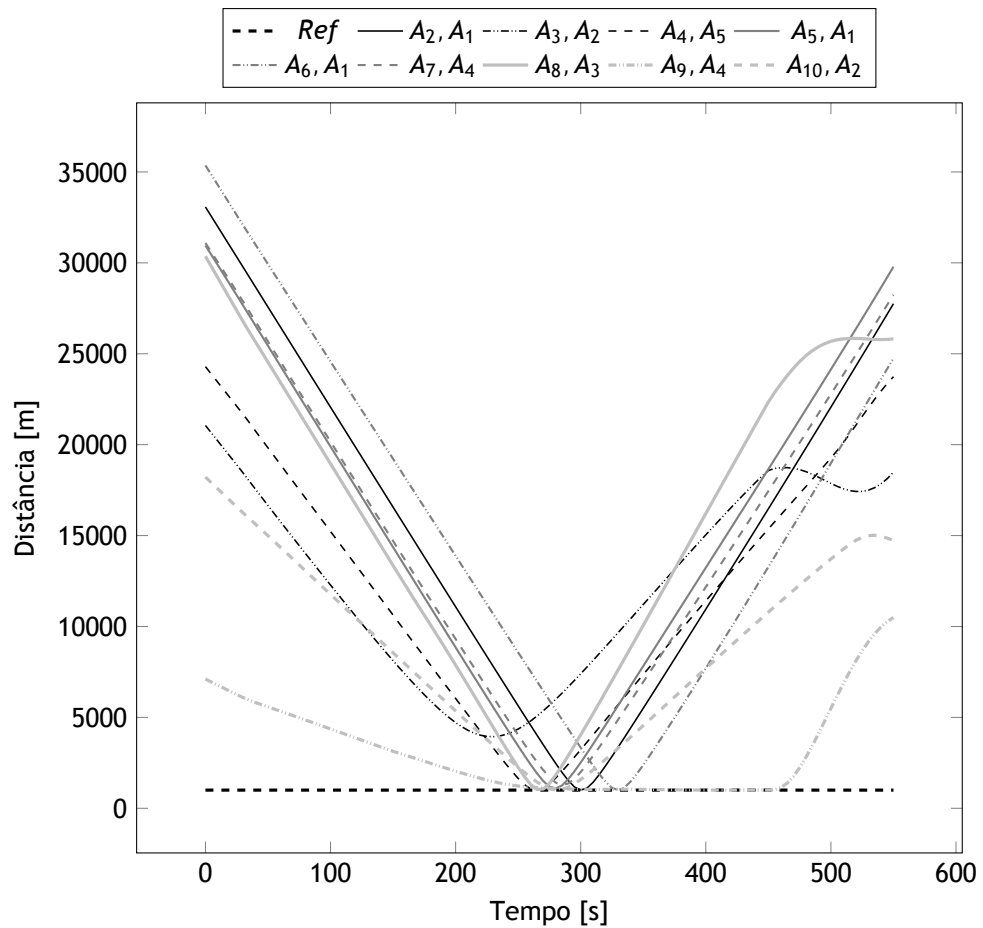


Figura 5.37: Gráfico das Distâncias entre Pares com menor distância para a Simulação V

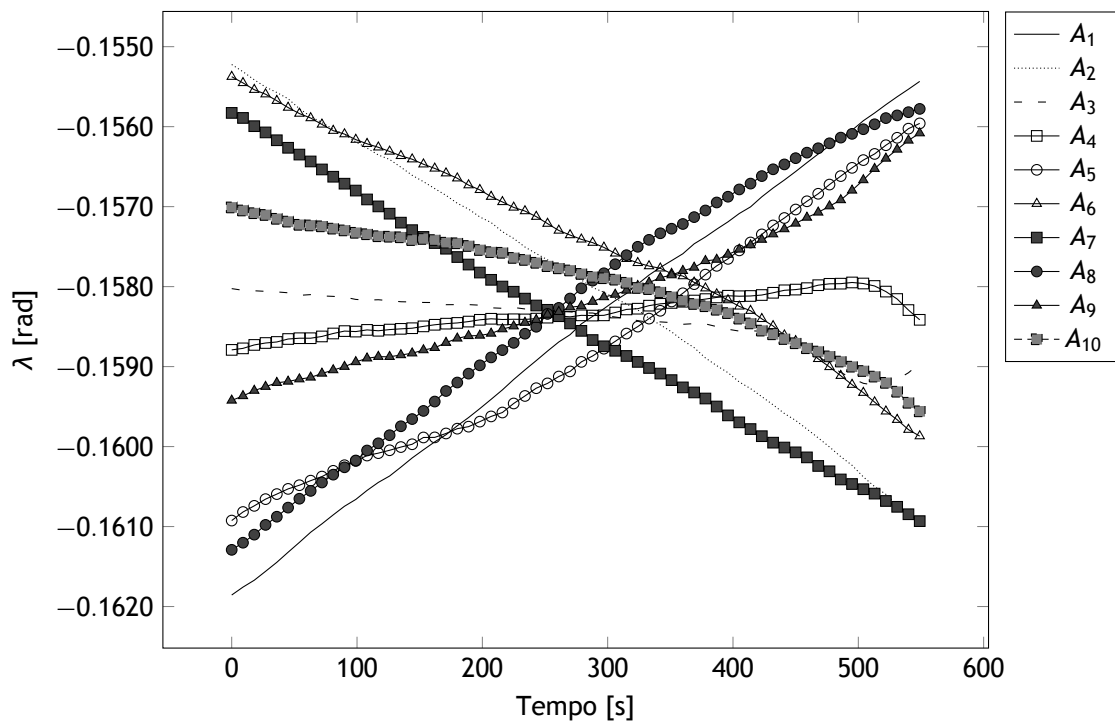


Figura 5.38: Gráfico da Longitude em relação ao Tempo da Simulação V

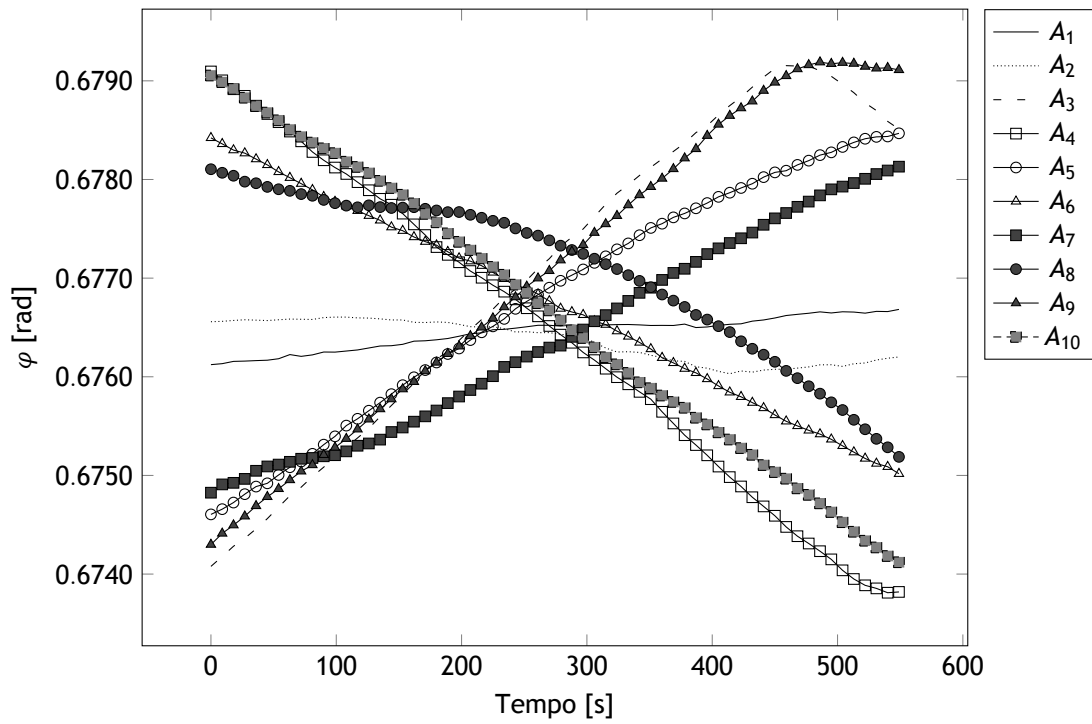


Figura 5.39: Gráfico da Latitude em relação ao Tempo da Simulação V

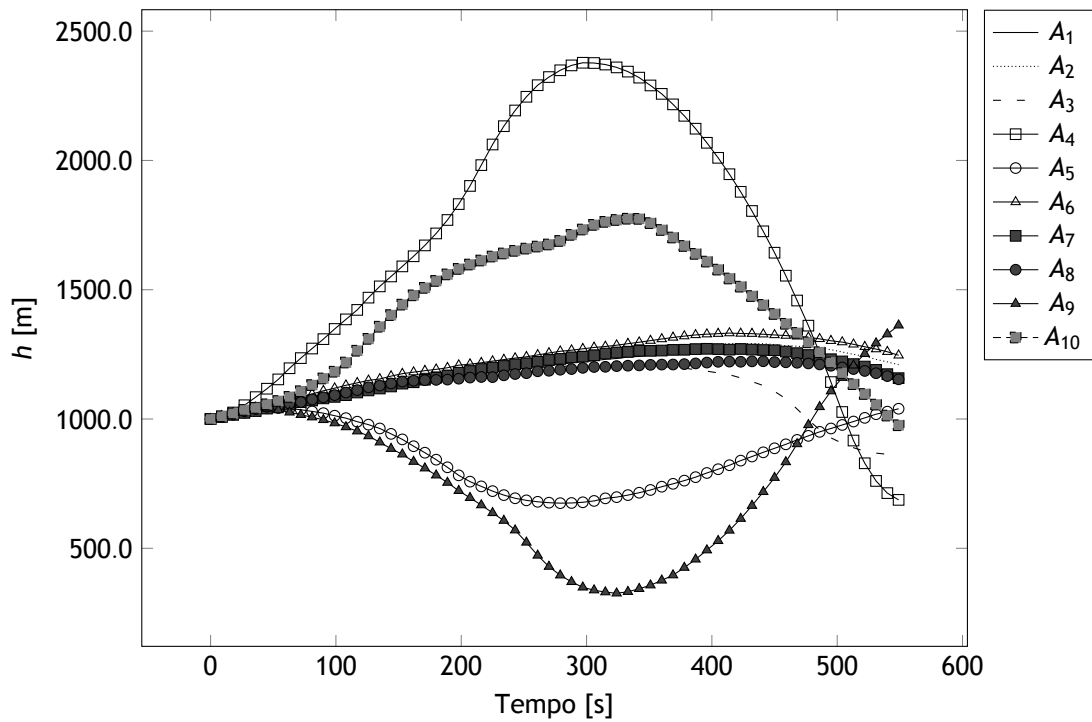


Figura 5.40: Gráfico da Altitude em relação ao Tempo da Simulação V

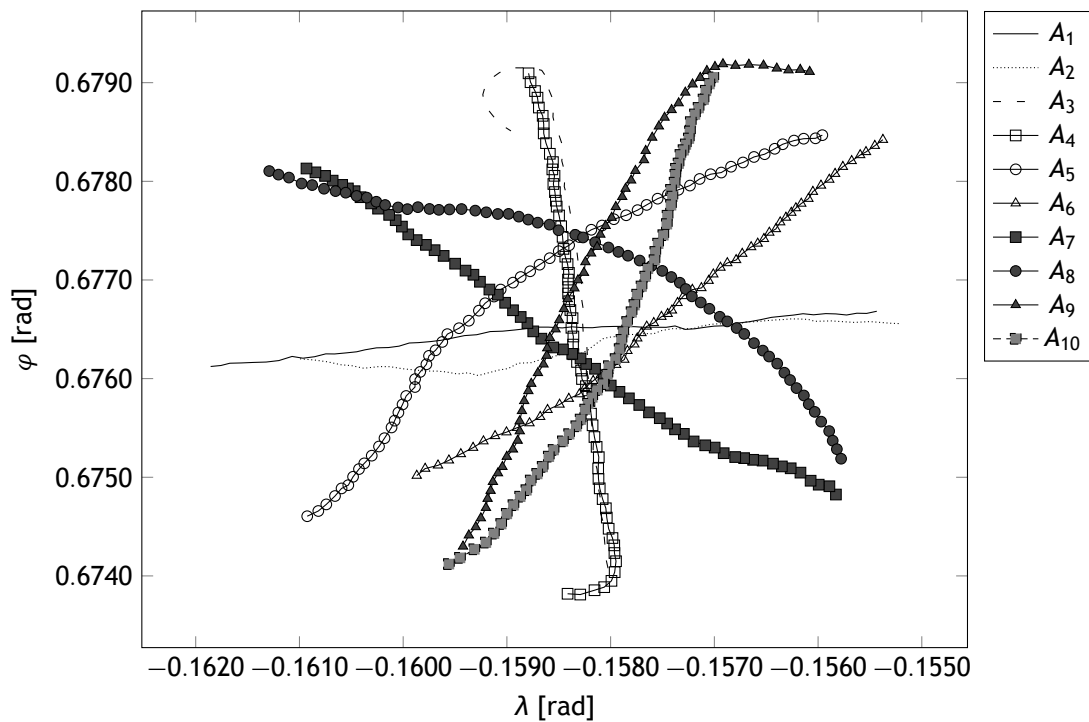


Figura 5.41: Gráfico da Projeção Terrestre da Simulação V

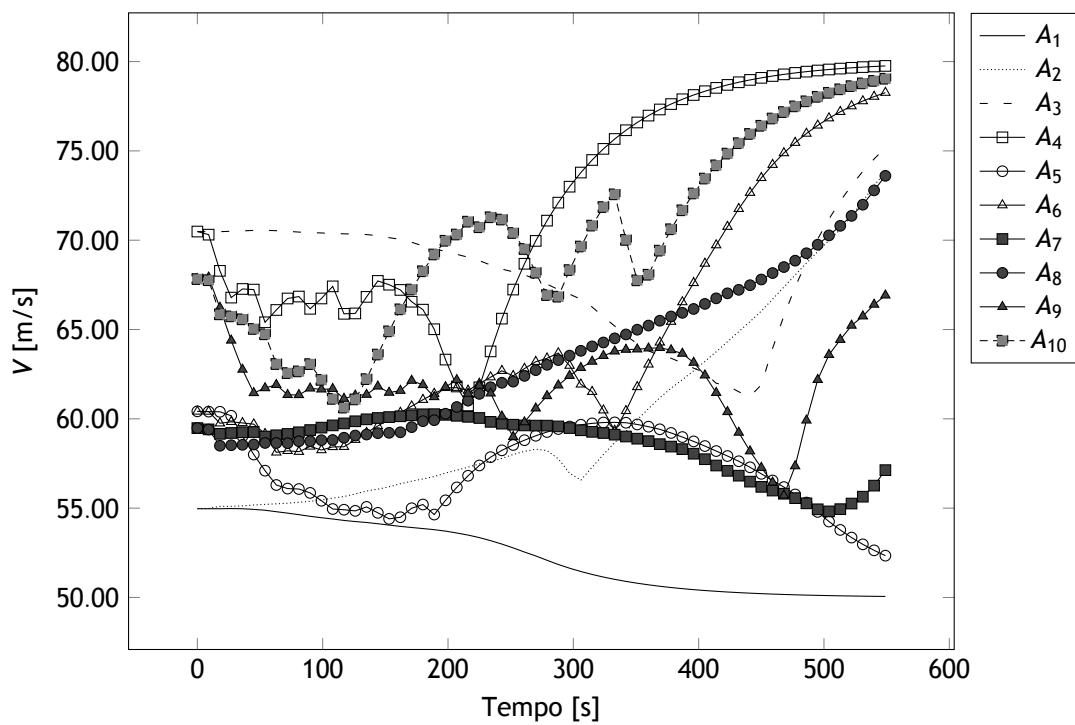


Figura 5.42: Gráfico da Velocidade em relação ao Tempo da Simulação V

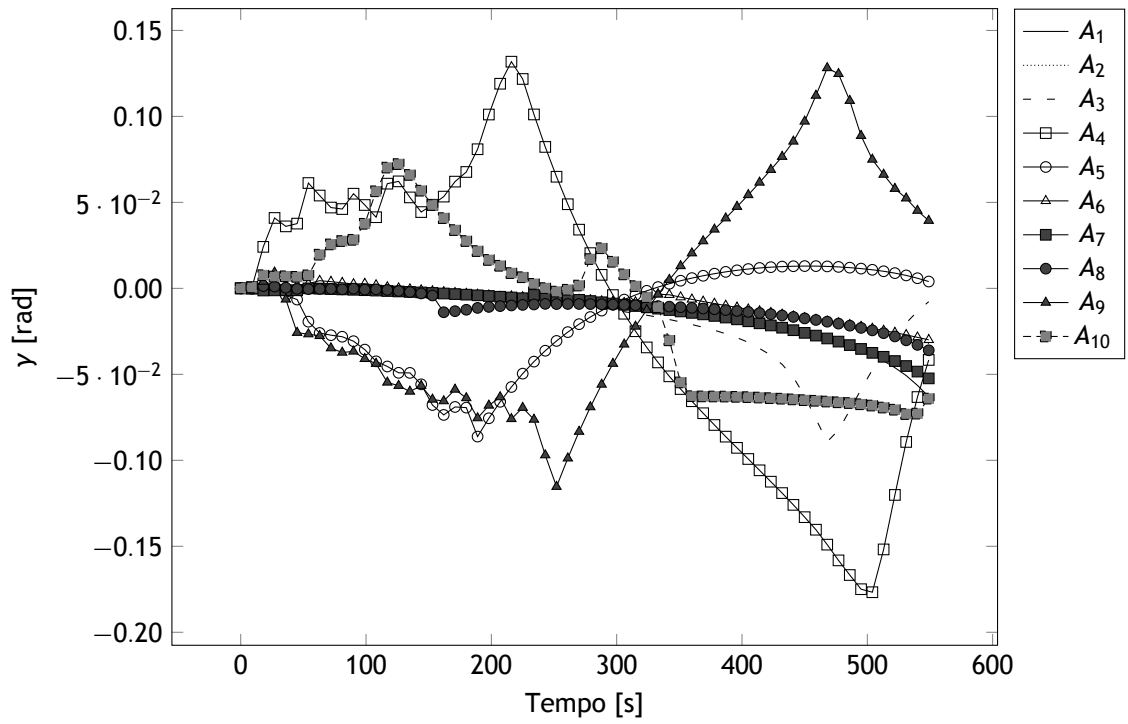


Figura 5.43: Gráfico do Ângulo de Trajetória em relação ao Tempo da Simulação V

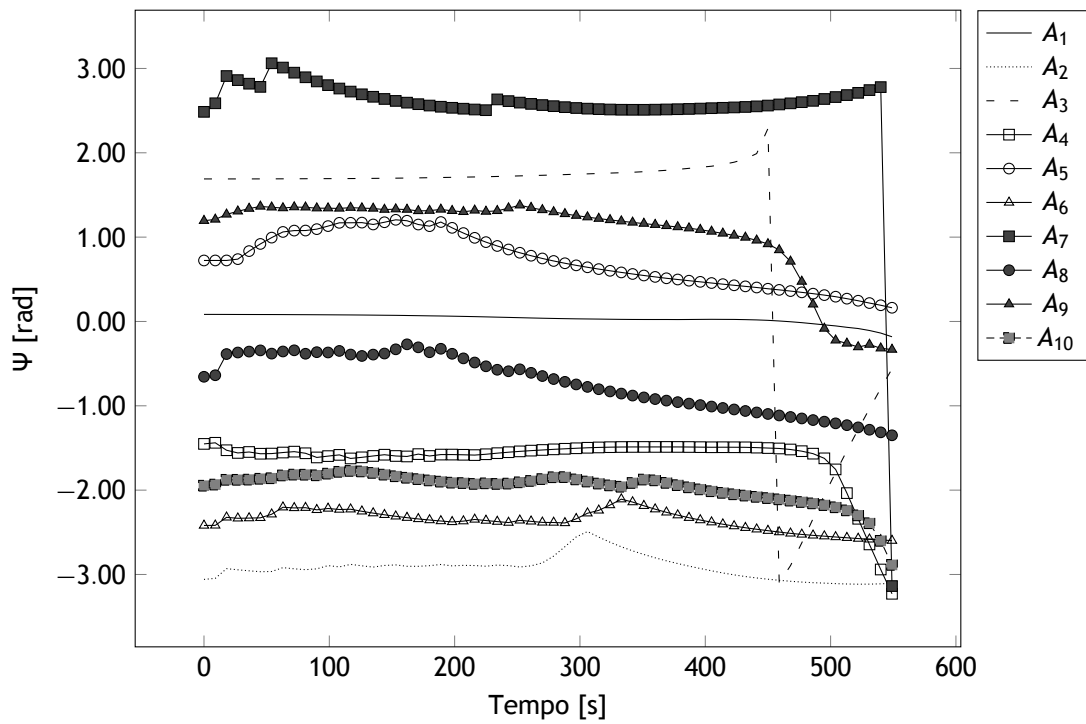


Figura 5.44: Gráfico do Rumo em relação ao Tempo da Simulação V

Capítulo 6

Conclusão e Discussão

Um dos maiores desafios com que a aviação civil se depara nos dias de hoje é com o constante e crescente aumento de tráfego aéreo. Este aumento de tráfego aéreo traduz-se num problema de capacidade e sustentabilidade dos sistemas de gestão de tráfego aéreo, pois problemas de segurança, problemas económicos e problemas ambientais, são apenas algumas das muitas adversidades que autoridades e instituições idóneas terão de resolver para fazer frente a este desafio.

Com vista a progredir neste campo as principais autoridades mundiais da aviação civil começaram a desenvolver planos estratégicos para irem de encontro aos novos desafios. Assim as autoridades americanas, iniciaram o NextGen e a EUROCONTROL iniciou o programa SESAR , tendo estes dois programas em comum o facto de considerarem uma mudança de filosofia dos sistemas de gestão de tráfego aéreo, pois a sua capacidade é principalmente limitada pelas filosofias de Navegação. Neste sentido, existe um consenso que a solução para o aumento do tráfego aéreo passa por introduzir o conceito de *free-flight*.

O *free-flight* não é nada mais do que dar liberdade aos pilotos, operadoras até aos controladores de tráfego aéreo de mudarem/escolherem as suas trajetórias de acordo com as suas necessidades. Este conceito é diferente do que aquele em que as aeronaves estão restritas a espaços/corredores aéreos bastante confinados. No entanto, apesar da simplicidade do conceito a sua implementação é bastante complexa.

Para a aplicação do conceito de *free-flight*, serão necessários sistemas auxiliares de grande complexidade, não bastarão apenas radares ou sistemas de bordo como o TCAS. São necessários sistemas em que seja possível uma constante monitorização e comunicação entre todos os intervenientes, para que acima de tudo seja mantida a segurança. Um exemplo desse progresso, é o já hoje utilizado ADS-B, o qual permite uma constante transmissão de dados entre aeronaves e estações de terra.

Porém, também será necessário algum nível de automação no que diz respeito à prevenção de colisões. Na atualidade, apesar do conceito de *free-flight* já ter começado a ser implementado, são os controladores aéreos uns dos principais agentes na prevenção de colisões de tráfego aéreo, é claro também que os pilotos têm a responsabilidades tanto ao nível preventivo como de atuação, relativamente às colisões aéreas. Contudo, o tratamento do problema de prevenção de colisões aéreas é feito a um nível local, este facto implica que, uma resolução de um determinado conflito ou possível colisão possa induzir outro conflito ou colisão.

É neste sentido, que o presente trabalho se insere, tentar contribuir para uma resolução do problema de prevenção de colisões aéreas globais, na medida em que, a teoria e o método desenvolvido poderão fazer parte da implementação de um sistema autónomo de prevenção de colisões. Na atualidade, apenas sistemas como o CTAS, oferecem um certo nível de automação na prevenção de colisões, no entanto, os métodos de resolução são locais.

Ao problema de implementação do conceito de *free-flight* nos principais espaços aéreos civis,

adiciona-se o facto da inclusão da cada vez mais tendência tecnológica, as aeronaves não tripuladas. Estes sistemas, têm um leque vasto de aplicações possíveis o que faz deles alvo não só do mercado militar, mas também do mercado civil. Deste forma, existe uma constante pressão, tanto da parte militar como civil, para a utilização destes sistemas no espaço aéreo civil. No entanto, uma possível integração de tais sistemas aumentaria ainda a complexidade do problema de prevenção de colisões.

6.1 Contribuição

O presente estudo pretendia servir de base ao desenvolvimento de um sistema de prevenção de colisões, quer centralizado quer descentralizado. O objetivo era construir um método suficientemente expressivo e o mais geral possível, para que pudesse ser adaptado às especificações de sistemas com essa finalidade. Assim, o estado atual das legislações e especificações emitidas pelas autoridades competentes, não eram relevantes para o desenvolvimento pretendido.

Um dos principais problemas no desenvolvimento de um método para a resolução do problema de prevenção de colisões, não é tanto a resolução em si, mas sim a eficiência computacional, em termos temporais, com que a solução é calculada. A literatura é rica em teorias e métodos aplicados ao problema de prevenção de colisões, todavia, uma resolução ao nível local não acarreta problemas computacionais significativos. Acontece que, no problema global de prevenção de colisões, a pertinência da eficiência computacional coloca-se, pois uma resolução tardia põe em causa a segurança de um possível sistema. Assim, os métodos propostos para o problema de prevenção de colisões global, ainda não conseguem ser suficientemente eficientes ao nível computacional para ser aplicáveis numa aplicação de tempo real.

Neste sentido, tentou-se elaborar método baseado na abordagem geométrica, pois devido à sua flexibilidade de modelação é possível alcançar uma expressividade suficientemente geral para modelar o problema de prevenção global e conseqüentemente encontrar a solução para este mesmo problema. A abordagem consistiu, em generalizar o conceito do cone de colisão baseado num sistema de prioridades, no qual é possível estabelecer uma relação entre o vetor velocidade relativa e o cone definido entre um objeto e a esfera de segurança do outro objeto. Deste modo, identificou-se concretamente o conjunto de soluções para o problema e assim desenvolveu-se um algoritmo que computa de forma eficiente apenas soluções desse mesmo conjunto, mais ainda, restringiu-se o conjunto de soluções quando são tidos em conta os atributos dinâmicos do objeto.

Todavia as soluções encontradas são aplicáveis apenas num tempo específico, o que invalidaria uma possível aplicação real, visto que aplicar uma variação instantânea de velocidade é de todo irrealista. Assim, houve a necessidade de elaborar um mecanismo de gerar trajetórias para prever o comportamento da aplicação da solução. As técnicas utilizadas para resolver o modelo dinâmico de navegação foram os métodos pseudo-espectrais, e deste modo foi alcançada a previsibilidade das trajetórias sob a aplicação da solução. Por fim, desenvolvidos os métodos de computação da solução e geração de trajetórias, elaborou-se um último algoritmo, baseado na filosofia do controlo preditivo, para juntar estes dois métodos, deste modo, uniu-se à eficiência de computação da solução a capacidade de previsibilidade desejada num problema de prevenção de colisões.

Os métodos propostos foram então implementados computacionalmente com o intuito de ser verificada a eficácia na resolução bem como a eficiência computacional. Foram criados enquadramentos, cujos cenários pretendiam retratar situações extremas num contexto em que a prevenção era centralizada, o que implica uma maior exigência computacional. Deste modo, constatou-se nos casos apresentados a efetividade do métodos, mais ainda, o estudo da eficiência computacional revelou o potencial de uma possível aplicação real do método proposto.

No entanto, as aplicações apresentadas destinavam-se a aeronaves não tripuladas visto que o método desenvolvido é assente num esquema de prioridades e nenhum estudo acerca das implicações de diferentes prioridades na estabilidade do sistema foi realizado, então achou-se demasiado precoce aplicar o método a aeronaves tripuladas.

6.2 Perspetivas Futuras

Este trabalho, como já foi referido, pretende disponibilizar uma base ou estrutura para desenvolver um Sistema Autónomo de Prevenção de Colisões. Entenda-se com isto, que a principal preocupação era criar um método suficientemente geral para que se pudesse adaptar a diversas situações. Todavia, existe ainda bastante trabalho a realizar para uma possível integração num sistema real. Posto isto, sugere-se nos itens seguintes desenvolvimentos futuros.

- O sistema de prioridades necessitará de um estudo exaustivo, com vista a ser entendida a relação entre prioridades e as dinâmicas/tipos das aeronaves, para que no futuro seja possível agilizar a prevenção de colisões e talvez mesmo reforçar a segurança do sistema. Pensa-se que será também possível utilizar um esquema de prioridades dinâmicas, para tornar ainda mais flexível o método.
- O método devido à sua generalidade deverá ser facilmente adaptável a situações de prevenção de colisões entre terreno, zonas restritas e perigos meteorológicos. Assim, uma futura extensão do método proposto poderá ter em conta este tipo de situações.
- A implementação computacional dos algoritmos propostos, já realizada no âmbito deste estudo, contudo, carecerá de uma validação exaustiva tanto a nível do código elaborado como da arquitetura de implementação. Sugere-se ainda, uma validação formal da implementação, pois o tipo de sistemas a que a aplicação se destina requer um nível de fiabilidade extrema.
- Serão também necessários, estudos exaustivos do comportamento do sistema nas mais variadas situações e nas diferentes topologias, através de simulações. No presente trabalho a implementação foi centralizada, contudo será necessário uma implementação descentralizada e entender quais são as vantagens e limitações numa implementação do género.
- No seguimento do item anterior, sugere-se uma implementação computacional distribuída com o objetivo de melhorar ainda mais a performance computacional.

O desenvolvimento do método proposto, pressupõe a existência de sistemas de comunicação de posicionamento, de velocidade entre outros, semelhantes ao existente ADS-B ou integrado

neste. Este facto, não foi muito relevante para o desenvolvimento da teoria, contudo numa implementação onde seja prevista uma não precisão dos dados (o que na verdade é a realidade), então seria interessante, e talvez imprescindível, um estudo estocástico aprofundado, e assim, analisar todo o processo de deteção do conjunto de soluções bem como o cálculo da solução e enquadrar o controlo preditivo neste processo.

Bibliografia

- [1] ADS-B. <http://www.ads-b.com/home.htm>, (Visitado em Outubro de 2013).
- [2] D. Alejo, R. Conde, J.A. Cobano, and A. Ollero. Multi-uav collision avoidance with separation assurance under uncertainties. In *ICM 2009 - IEEE International Conference on Mechatronics, Malaga - Spain*, pages 1-6, 2009.
- [3] CA Authority. CAP 722 Unmanned Aircraft System Operations in UK Airspace—Guidance. *Directorate of Airspace Policy*, 2010.
- [4] R.M. Baiada. Free Flight: Reinventing ATC-digital avionics a non-solution. In *14th DASC Digital Avionics Systems Conference, Los Angeles - USA*, pages 100-105, 1995.
- [5] M. Baumgartner. One safe sky for Europe : A revolution in European ATM. *The Controller*, pages 8-12, 2003.
- [6] A. Bayen, P. Grieder, G. Meyer, and C. Tomlin. Lagrangian Delay Predictive Model for Sector-Based Air Traffic Flow. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, volume 28(5):pages 1015-1026, 2005.
- [7] V.V. Belkin and F.J. Yanovsky. Aircraft collision avoidance system. In *IEEE Aerospace Conference, Montana - USA*, pages 1-9, 2007.
- [8] K. Bousson. Automatic Guidance of Aircraft For Collision Avoidance in Terminal Areas. *Russian-American Journal of Actual Problems of Aviation and Aerospace Systems*, volume 6(12):pages 49-57, 2001.
- [9] K. Bousson. Waypoint-Constrained Free-Flight Collision Avoidance. In *SAE Advances Aviation Safety Conference, Vancouver - Canada*, 2003.
- [10] K. Bousson. Model predictive control approach to global air collision avoidance. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, volume 80(6):pages 605-612, 2008.
- [11] K. Bousson and P.F.F. Machado. 4D flight trajectory optimization based on pseudospectral methods. In *Proceedings of The WASET International Conference on Aeronautical and Astronautical Engineering*, volume 45, pages 551-557, 2010.
- [12] K. Bousson and P.F.F. Machado. 4D trajectory generation and tracking for waypoint-based aerial navigation. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, volume 8(3):pages 105-119, 2013.
- [13] P. Brooker. Airborne Collision Avoidance Systems and Air Traffic Management Safety. *Journal of Navigation*, volume 58(1):pages 1-16, 2005.
- [14] P. Brooker. STCA, TCAS, Airproxes and Collision Risk. *Journal of Navigation*, volume 58(03):pages 389-404, 2005.
- [15] M.E. Campbell and E. Scholte. Robust Nonlinear Model Predictive Control With Partial State Information. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, volume 16(4):pages 636-651, 2008.
- [16] L.M.B.C. Campos. Probability of collision of aircraft with dissimilar position errors. *Journal of Aircraft*, volume 38(4):pages 593-599, 2001.

- [17] L.M.B.C. Campos and J.M.G. Marques. On the probability of collision between climbing and descending aircraft. *Journal of Aircraft*, volume 44(2):pages 550-557.
- [18] L.M.B.C. Campos and J.M.G. Marques. On safety metrics related to aircraft separation. *Journal of Navigation*, 55(1):pages 39-63, 2002.
- [19] L.M.B.C. Campos and J.M.G. Marques. On the probability of collision for crossing aircraft. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, volume 83(5):pages 306-314, 2011.
- [20] C. Carbone, U. Ciniglio, F. Corrado, and S. Luongo. A novel 3D geometric algorithm for aircraft autonomous collision avoidance. In *45th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego - USA*, pages 1580-1585, 2006.
- [21] CARE. http://www.eurocontrol.int/care/public/subsite_homepage/homepage.html, (Visitado em Outubro de 2013).
- [22] A. Chakravarthy and D. Ghose. Obstacle avoidance in a dynamic environment: a collision cone approach. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, volume 28(5):pages 562-574, 1998.
- [23] M.A Christodoulou and S.G. Kodaxakis. Automatic commercial aircraft-collision avoidance in free flight: the three-dimensional problem. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, volume 7(2):pages 242-249, 2006.
- [24] J.C. Clements. Optimal simultaneous pairwise conflict resolution maneuvers in air traffic management. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, volume 25(4):pages 2-5, 2002.
- [25] R. Dai and J.E. Cochran. Path Planning and State Estimation for Unmanned Aerial Vehicles in Hostile Environments. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, volume 33(2):pages 595-601, 2010.
- [26] T.J. Davis, H. Erzberger, S.M. Green, and W. Nedell. Design and evaluation of an air traffic control final approach spacing tool. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, volume 14(4):pages 848-854, 1991.
- [27] DallasG. Denery and Heinz Erzberger. The center-tracon automation system: Simulation and field testing. In *Modelling and Simulation in Air Traffic Management*, Transportation Analysis, pages 113-138. Springer, 1997.
- [28] N. Durand, J.M. Alliot, and O. Chansou. Optimal resolution of en route conflicts. *Air Traffic Control Quarterly*, volume 3(3):pages 139-161, 1995.
- [29] M.S. Eby and W.E. Kelly. Free flight separation assurance using distributed algorithms. In *IEEE Aerospace Conference, Aspen - USA*, volume 2, pages 429-441, 1999.
- [30] A. Eele and A. Richards. Path-Planning with Avoidance Using Nonlinear Branch-and-Bound Optimization. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, volume 32(2):pages 384-394, 2009.
- [31] H. Erzberger. CTAS: Computer intelligence for air traffic control in the terminal area. 1992.
- [32] H. Erzberger, T.J. Davis, and S. Green. Design of center-TRACON automation system. In *AGARD, Machine Intelligence in Air Traffic Management, Berlin - Germany*, 1993.

- [33] H. Erzberger and B. Nedell. *Design of automated system for management of arrival traffic*. National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center, 1989.
- [34] H. Erzberger, R.A. Paielli, D.R. Isaacson, and M.M. Eshow. Conflict detection and resolution in the presence of prediction error. In *1st USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Saclay - France*, page 17-20, 1997.
- [35] EUROCONTROL. <http://www.eurocontrol.int>, (Visitado em Outubro de 2013).
- [36] EUROCONTROL. Eurocontrol specifications for the use of military remotely piloted aircraft as operational air traffic outside segregated airspace. *European Organisation For The Safety Of Air Navigation*, (2.0), 2012.
- [37] FAA. <http://www.faa.gov/>, (Visitado em Outubro de 2013).
- [38] Q. Gong, L.R. Lewis, and I.M. Ross. Pseudospectral Motion Planning for Autonomous Vehicles. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, volume 32(3):pages 1039-1045, 2009.
- [39] S. Han, H. Bang, and C. Yoo. Proportional navigation-based collision avoidance for UAVs. *International Journal of Control, Automation and Systems*, volume 7(4):pages 553-565, 2004.
- [40] J.C. Hill, F.R Johnson, J.K. Archibald, R.L. Frost, and W.C. Stirling. A cooperative multi-agent approach to free flight. In *AAMAS '05 - Fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, Utrecht - Netherlands*, pages 1083-1090, 2005.
- [41] ICAO. <http://www.icao.int/>, (Visitado em Outubro de 2013).
- [42] Y. Ikeda and J. Kay. An Optimal Control Problem For Automatic Air Collision Avoidance. volume 7, pages 242-249, 2003.
- [43] H. Jianghai, M. Prandini, and S. Sastry. Optimal maneuver for multiple aircraft conflict resolution: a braid point of view. In *39th IEEE Conference on Decision and Control, Sydney - Australia*, volume 4, pages 4164-4169, 2000.
- [44] M.J. Kochenderfer, M.W.M. Edwards, L.P. Espindle, J.K. Kuchar, and J.D. Griffith. Airspace Encounter Models for Estimating Collision Risk. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, volume 33(2):pages 487-499, 2010.
- [45] M.J. Kochenderfer, J.E. Holland, and J.P. Chryssanthacopoulos. Next-generation airborne collision avoidance system. *Lincoln Laboratory Journal*, volume 19(1), 2012.
- [46] James K. Kuchar. Markov model of terrain for evaluation of ground proximity warning system thresholds. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, volume 24(3):pages 428-435, 2001.
- [47] J.K. Kuchar and L.C. Yang. A review of conflict detection and resolution modeling methods. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, volume 1(4):179-189, 2000.
- [48] S.M. LaValle. *Planning algorithms*. Cambridge university press, 2006.

- [49] L.R Lewis, I.M. Ross, and Q. Gong. Pseudospectral motion planning techniques for autonomous obstacle avoidance. In *46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans - USA*, pages 5997-6002, 2007.
- [50] Ping Lu and Nguyen X. Vinh. Optimal control problems with maximum functional. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 14(6):1215-1223, November 1991.
- [51] S. Luongo, C. Carbone, F. Corraro, and U. Ciniglio. An Optimal 3D Analytical Solution for Collision Avoidance Between Aircraft. In *IEEE International Conference on Mechatronics, 2009. ICM 2009*, pages 1-6, 2009.
- [52] I. Lymeropoulos and J. Lygeros. Improved multi-aircraft ground trajectory prediction for air traffic control. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, volume 33(2):pages 347-362, 2010.
- [53] P.F.F. Machado. Dissertação de Mestrado, Optimização e Controlo de Trajectórias 4D Definidas por Waypoints, 2008.
- [54] P.F.F. Machado and K. Bousson. Generalization of collision cone concept for unmanned aircraft flight collision avoidance. In Prof. Dr. Ebru OCALLIR-AKUNAL, editor, *Using Decision Support Systems for Transportation Planning Efficiency*. IGI Publisher, 2014.
- [55] F. Maracich. Flying Free Flight: Pilot perspective and system integration requirement. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, volume 21(7):pages 3-7, 2006.
- [56] D. Nakamura and W. Royce. Operational Benefits of performance-based navigation. *Boeing Aero Quarterly*, issue 3, 2008.
- [57] NextGen. <http://www.faa.gov/about/initiatives/nextgen/>, (Visitado em Outubro de 2013).
- [58] R.A. Paielli and H. Erzberger. Conflict probability estimation for free flight. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, volume 20(3):pages 588-596, 1997.
- [59] R.A. Paielli and H. Erzberger. Conflict probability estimation generalized to non-level flight. *Air Traffic Control Quarterly*, volume 7(3):pages 195-222, 1999.
- [60] J.W. Park, H.D. Oh, and M.J. Tahk. UAV collision avoidance based on geometric approach. In *SICE Annual Conference, Tokyo - Japan*, pages 2122-2126, 2008.
- [61] A.U. Raghunathan, V. Gopal, D. Subramanian, L.T. Biegler, and T. Samad. Dynamic optimization strategies for three-dimensional conflict resolution of multiple aircraft. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, volume 27(4):pages 586-594, 2004.
- [62] Final Report. Integration of Unmanned Aerial Vehicles into Future Air Traffic Management. (December):1-153, 2001.
- [63] A. Richards and J.P. How. Aircraft trajectory planning with collision avoidance using mixed integer linear programming. In *Proceedings of American Control Conference, Anchorage - USA*, volume 3, pages 1936-1941, 2002.
- [64] J. Samek, D. Sislak, P. Volf, and M. Pechoucek. Multi-party collision avoidance among unmanned aerial vehicles. In *IAT '07 - IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology, Silicon Valey - USA*, pages 403-406, 2007.

- [65] SESAR. <http://www.eurocontrol.int/sesar>, (Visitado em Outubro de 2013).
- [66] G.M. Siouris. *Missile guidance and control systems*. Springer, 2004.
- [67] David J Smith. *Air Traffic Control Handbook: The Complete Guide for all Aviation and Air Band Enthusiasts*. Haynes Publishing, 2010.
- [68] A. Tsourdos, B. White, and M. Shanmugavel. *Cooperative path planning of unmanned aerial vehicles*, volume 32. Wiley, 2010.
- [69] G. Valkanas, P. Natsiavas, and N. Bassiliades. A collision detection and resolution multi agent approach using utility functions. In *BCI '09 - Fourth Balkan Conference in Informatics, Thessaloniki - Greece*, pages 3-7, 2009.
- [70] J.L. Yepes, I. Hwang, and M. Rotea. New Algorithms for Aircraft Intent Inference and Trajectory Prediction. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, volume 30(2):pages 370-382, 2007.