



**COPPE/UFRJ**

UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DETERMINÍSTICO DO ESTABELECIMENTO DO  
FLUXO DE TRÁFEGO DE UM SISTEMA AÉREO AUTOMATIZADO DE CARGA

Pedro José Garcia Chavarro

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientador: Amaranto Lopes Pereira.

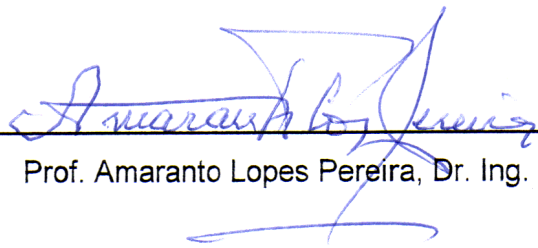
Rio de Janeiro  
Setembro de 2010

UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DETERMINÍSTICO DO ESTABELECIMENTO DO  
FLUXO DE TRÁFEGO DE UM SISTEMA AÉREO AUTOMATIZADO DE CARGA

Pedro José Garcia Chavarro

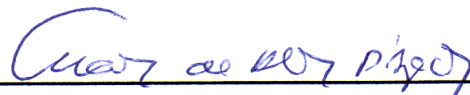
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:



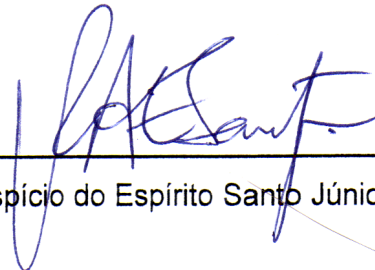
---

Prof. Amaranto Lopes Pereira, Dr. Ing.



---

Prof. Márcio de Almeida D'Agosto, D. Sc.



---

Prof. Respício do Espírito Santo Júnior, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
SETEMBRO DE 2010

Chavarro, Pedro José Garcia

Uma Contribuição ao Estudo Determinístico do Estabelecimento do Fluxo de Tráfego de um Sistema Aéreo Automatizado de Carga/ Pedro José Garcia Chavarro. - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XX, 114 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Amaranto Lopes Pereira

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2010.

Referências bibliográficas: p. 111-114.

1. Teoria de fluxo de tráfego aéreo para Veículos Aéreos Não Tripulados. 2. Sistema Aéreo Automatizado de Carga, SAAC. I. Pereira, Amaranto Lopes. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

## **DEDICATÓRIA**

À memória de Don Rodrigo Javier Garcia Valladolid, meu ancestral, cuja sabedoria  
ultrapassou séculos.

*“At every point of this shell there is a flow of heat from the hotter surface to the colder surface through the substance of the shell.*

*The direction of the flow is perpendicular to the surface of the shell, and the rate of flow is greater the thinner the shell is at the place, and the greater is its conductivity.”*

James Clerk Maxwell, em *Theory of Heat*, p.256, Longmans, Green & Co., Londres, 1888.

## **AGRADECIMENTOS**

Com profunda gratidão a meu orientador, o ilustre professor emérito da UFRJ,  
Amaranto Lopes Pereira, Dr. Ing.

Imensamente em dívida com a Dra. Luzia Motta por ter disposto a meu serviço, sua  
esplêndida biblioteca.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DETERMINÍSTICO DO ESTABELECIMENTO DO  
FLUXO DE TRÁFEGO DE UM SISTEMA AÉREO AUTOMATIZADO DE CARGA

Pedro José Garcia Chavarro

Setembro/2010

Orientador: Amaranto Lopes Pereira.

Programa: Engenharia de Transportes.

Os Sistemas de Veículos Aéreos Não Tripulados vêm apresentando desenvolvimento e crescente uso no transporte de carga civil, dentre outras atividades. As condições operativas dos Sistemas Aéreos Automatizados de Carga (SAAC) redefinem os elementos do sistema de transporte aéreo. Dentro destes elementos, as aerovias, e em particular a navegação aérea, apresenta-se como um dos aspectos que mais preocupa aos pesquisadores e desenvolvedores; o tráfego aéreo para os SAACs não possui uma base teórica formal como aquela que se encontra para o tráfego terrestre de veículos.

Neste trabalho se adotam alguns dos modelos clássicos da teoria de fluxo de tráfego terrestre, da teoria do controle de tráfego aéreo e da teoria de sistemas, acrescentada com métodos matemáticos, para determinar um conjunto de relações a caracterizar o tráfego aéreo de SAACs.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

A CONTRIBUTION TO DETERMINISTIC STUDY FOR ESTABLISHMENT OF  
TRAFFIC FLOW FOR AN AUTOMATED AIRBORNE CARGO SYSTEM

Pedro José Garcia Chavarro

September/2010

Advisor: Amaranto Lopes Pereira.

Department: Transport Engineering.

The Unmanned Aircraft Systems had been in developing and crescent use for civil freight, as for other applications. The operative conditions of Automated Airborne Cargo Systems (AACS) redefine the elements of aerial transport system. Among these elements the airways, with aerial navigation in particular, is presented as one of aspects more worry the developers and investigators; there is not a formal theoretical basis for traffic flow for AACS, as that existing for terrestrial traffic flow.

This work is intended to adapt some of the classic models of the road traffic flow theory, the air traffic control theory and Systems Theory, adding some mathematical methods, in order to determine a set of relations that characterize the air traffic of AACS.



## SUMÁRIO

Lista de figuras	xii
Lista de tabelas	xiii
Nomenclatura	xiv
Sistema de unidades	xvi
Definição de termos	xvii
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	2
1.2 JUSTIFICATIVA	5
1.3 OBJETIVOS	8
1.4 METODOLOGIA	8
1.5 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	12
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	12
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>14</b>
2.1 A ABORDAGEM SISTÊMICA	14
2.2 FLUXO DE FLUIDOS NO INTERIOR DE DUTOS	15
2.3 FLUXO DA CORRENTE ELÉTRICA NO INTERIOR DE UM CONDUTOR	17
2.4 DOS SISTEMAS AÉREOS AUTOMATIZADOS DE CARGA	19
2.5 ORGANIZAÇÃO DA AERONÁUTICA CIVIL	21
2.6 SISTEMA DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO NO BRASIL	21
2.7 DA TEORIA DE FLUXO DE TRÁFEGO AÉREO	24
<b>3. ESTABELECIMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DO FLUXO DE TRÁFEGO AÉREO</b>	<b>26</b>
3.1 PROPRIEDADES INTRÍNSECAS	26
3.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS E PRESSUPOSTOS	28
3.2.1 <b>As Leis de conservação</b>	28
3.2.2 <b>Compressibilidade do fluxo de tráfego</b>	30
<b>4. DEFINIÇÃO DE VARIÁVEIS RELEVANTES NO ESTUDO DAS CORRENTES DE FLUXO DE TRÁFEGO</b>	<b>31</b>
4.1 TOPOLOGIA DAS AEROVIAS	31

4.2 VELOCIDADES	33
4.3 MASSA TOTAL AEROTRANSPORTADA	35
4.4 FLUXO	37
4.5 DENSIDADE, CONCENTRAÇÃO E AGRUPAMENTO	39
4.6 ESPAÇAMENTO, INTERVALO E OCUPAÇÃO	42
4.7 MARGENS DE SEGURANÇA	45
4.8 DEDUÇÕES E DEMONSTRAÇÕES NO ESTUDO DO FLUXO DE TRÁFEGO	49
4.8.1 <b>Determinação da massa de gás aerotransportada em um turboventilador</b>	49
4.8.2 <b>Dedução do espaçamento em termos do agrupamento</b>	51
4.8.3 <b>Dedução da densidade em termos das concentrações</b>	55
4.8.4 <b>Dedução de relações para cálculo numérico, no deslocamento em grupo</b>	57
4.8.5 <b>Relação da velocidade de grupo com o fluxo e o agrupamento</b>	61
4.8.6 <b>Dedução da equação do fluxo de massa</b>	63
5. <b>DEFINIÇÃO DOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO</b>	65
5.1 <b>MEDIÇÃO EM UM PONTO</b>	67
6. <b>ESTABELECIMENTO DE UM MODELO DE COMPORTAMENTO DA CORRENTE DE FLUXO DE TRÁFEGO</b>	71
6.1 <b>INTRODUÇÃO</b>	71
6.2 <b>MODELO MATEMÁTICO CONTÍNUO E COERENTE</b>	74
6.3 <b>DADOS DE ENTRADA PARA O CÁLCULO NUMÉRICO</b>	75
6.4 <b>DETECÇÃO DE ULTRAPASSAGENS</b>	76
6.5 <b>ESTABELECIMENTO DOS ESPAÇAMENTOS INDIVIDUAIS</b>	76
6.6 <b>CÁLCULO DAS ACELERAÇÕES INDIVIDUAIS</b>	77
6.6.1 <b>Estabelecimento do sinal da aceleração individual</b>	77
6.6.2 <b>Estabelecimento da norma da aceleração individual</b>	83
6.7 <b>CÁLCULOS CINEMÁTICOS</b>	85
6.7.1 <b>Estabelecimento das mudanças de posição das aeronaves</b>	85
6.7.2 <b>Estabelecimento das novas velocidades individuais</b>	85
6.7.3 <b>Estabelecimento dos novos espaçamentos</b>	86
6.8 <b>SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO PROPOSTO</b>	86
6.8.1 <b>Dados usados como exemplo no cálculo numérico do modelo</b>	87
6.8.2 <b>Comentários sobre os gráficos obtidos</b>	88
7. <b>INFORMAÇÃO COMPLEMENTAR SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DE UM</b>	

<b>SISTEMA AÉREO AUTOMATIZADO DE CARGA (SAAC)</b>	94
7.1 MODELO CONCEITUAL SIMBÓLICO DO SAAC	94
7.2 CARACTERIZAÇÃO FUNCIONAL DOS SUBSISTEMAS	96
7.2.1 <b>Subsistema de aerovia</b>	96
7.2.2 <b>Subsistema de aeronave</b>	99
7.2.3 <b>Subsistema de terminal</b>	101
7.2.4 <b>Subsistema de carga</b>	102
7.2.5 <b>Subsistema de controle</b>	103
7.3 RELAÇÕES DE DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS	105
<b>8. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	108
<b>9. CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	110
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	111

## Lista de figuras

Fig. 1	Um Mapa Conceitual geral da Teoria de fluxo de tráfego para SAACs	2
Fig. 2	Diagrama funcional do SAAC	3
Fig. 3	Componentes gerais do Sistema de Tráfego Aéreo Automatizado de Carga	4
Fig. 4	Diagrama simbólico da Teoria de Fluxo de Tráfego para SAACs	5
Fig. 5	Estabelecimento de variáveis fundamentais de fluxo de tráfego	9
Fig. 6	Estabelecimento das variáveis secundárias de fluxo de tráfego	10
Fig. 7	Estabelecimento das variáveis de terceiro nível de fluxo de tráfego	11
Fig. 8	Correntes elétricas convergem e divergem de um nodo	18
Fig. 9	Topologia geral da aerovia	32
Fig. 10	Espaçamento entre duas aeronaves sucessivas	43
Fig. 11	Comportamento do espaçamento de segurança com respeito à velocidade	48
Fig. 12	Um grupo de aeronaves, com seu movimento congelado no instante $t = t_0$ .	52
Fig. 13	Agrupamento versus Espaçamento numa simulação de tráfego de SAACs.	54
Fig. 14	Quadro de referência do estudo da velocidade de um grupo de aeronaves.	58
Fig. 15	Métodos de obtenção de informação de fluxo de tráfego	65
Fig. 16	Medição em um ponto: um sensor detecta a passagem de aeronaves	67
Fig. 17	Oscilograma obtido na medição em um ponto	68
Fig. 18	Dois fluxos convergem com fases individuais	68
Fig. 19	Oscilogramas dos fluxos a e b, com fases diferentes	69
Fig. 20	Espaçamento entre duas aeronaves com velocidades diferentes	71
Fig. 21	Dependência do tempo crítico $t_{CRIT}$ , com a diferença de velocidades	74
Fig. 22	Um exemplo de diagrama de <i>Karnaugh</i> de 3 entradas e uma saída	79
Fig. 23	Diagrama de <i>Karnaugh</i> de 3 variáveis de entrada e uma saída	80
Fig. 24	Diagrama de <i>Karnaugh</i> para o sinal da aceleração	81
Fig. 25	Comportamento da aceleração com respeito ao espaçamento relativo	84
Fig. 26	Comportamento das velocidades individuais no tempo	88
Fig. 27	Comportamento da velocidade de grupo com o fluxo	89
Fig. 28	Comportamento da velocidade de grupo no tempo	91
Fig. 29	Comportamento da velocidade de grupo com a posição do centro de massa	92
Fig. 30	Diagrama funcional geral do SAAC com suas entradas e saídas	94
Fig. 31	Diagrama funcional geral do SAAC com seus subsistemas funcionais	95
Fig. 32	Diagrama conceitual simbólico do SAAC	107

## Lista de tabelas

Tabela 1	Evolução do número de decolagens comerciais no Brasil.	6
Tabela 2	Aeroportos com maior número de decolagens no ano 2008 no Brasil.	7
Tabela 3	Parâmetros de operação do motor CFM56-7	36
Tabela 4	Dados coletados em voo comercial	66
Tabela 5	Sinal da aceleração de uma aeronave na aerovia	78
Tabela 6	Equivalências adotadas para a conversão binária de dados	80
Tabela 7	Sinal da aceleração em representação binária	81
Tabela 8	Comprovação computacional do sinal da aceleração	82
Tabela 9	Parâmetros iniciais no exemplo de modelo matemático	87
Tabela 10	Valores das coordenadas iniciais no exemplo apresentado	87
Tabela 11	Velocidades iniciais como exemplo para cálculo numérico	88
Tabela 12	As variáveis do SAAC e suas relações de definição	105

## Nomenclatura

- $C_A$  Consumo de ar em peso, em kg/s, de um motor de combustão interna.
- $C_F$  Consumo de combustível em peso, em kg/s, de um motor de combustão interna.
- $e_{VKJ}$  Erro absoluto de velocidade que a aeronave k apresenta com respeito à velocidade padrão da aerovia j.
- $e_{AKJ}$  Erro absoluto de altitude que a aeronave k apresenta com respeito à altitude padrão da aerovia j.
- $e_{RKJ}$  Erro absoluto de rumo que a aeronave k apresenta com respeito ao rumo padrão da aerovia j.
- $E_{VJ}$  Erro absoluto de velocidade máximo permitido para qualquer aeronave, com respeito à velocidade padrão da aerovia j, onde a aeronave se desloca.
- $E_{AJ}$  Erro absoluto de altitude máximo permitido para qualquer aeronave, com respeito à altitude padrão da aerovia j, onde a aeronave se desloca.
- $E_{RJ}$  Erro absoluto de rumo máximo permitido para qualquer aeronave, com respeito ao rumo padrão da aerovia j, onde a aeronave se desloca.
- $m_{md}$  Massa total da aeronave em ordem de decolagem. Se compõe da massa da aeronave vazia, mais carga útil e carga total de combustível, de óleo e fluido hidráulico.
- $m_{ta}$  Massa total aerotransportada, variável medida em um instante e ponto definidos. Se compõe da massa da aeronave vazia, mais carga útil e carga de combustível, óleo e fluido hidráulico. Usa-se a mesma função de  $m_{ta}$  para cada aerovia em particular, obtido como a função média do comportamento de todas as aeronaves em essa aerovia.
- t Representação dimensional do tempo ou intervalo de tempo.

- s Representação dimensional do espaço em uma dimensão ou comprimento.
- x Representação dimensional do espaço na dimensão longitudinal.
- $v_P$  Velocidade de perda de uma aeronave.
- y Representação dimensional do espaço na dimensão transversal (ou lateral).
- z Representação dimensional do espaço na dimensão vertical ou altura.
- 
- $\alpha$  Relação ar/combustível num motor de combustão interna.
- $\alpha$  Ângulo de arfagem (elevação) do vetor velocidade da aeronave (rota).
- $\beta$  Ângulo de rolagem (inclinação) do vetor velocidade da aeronave (rota).
- $\gamma$  Ângulo de guinada (desvio) do vetor velocidade da aeronave (rota).
- $\eta$  Coeficiente de atenuação da propagação de onda.
- $\mu$  Fator de amplificação de ressonância.
- $\nu$  Eficiência mecânica.

## Sistema de unidades

Neste trabalho se usa o sistema internacional de medidas (SI), e o conjunto de seus múltiplos e submúltiplos:

<b>PREFIXO</b>	<b>VALOR</b>	<b>SÍMBOLO</b>
tera	$10^{12}$	T
giga	$10^9$	G
mega	$10^6$	M
quilo	$10^3$	k
unidade	$10^0$	-
mili	$10^{-3}$	m
micro	$10^{-6}$	u
pico	$10^{-9}$	p
femto	$10^{-12}$	f
ato	$10^{-15}$	a

Na expressão de cifras decimais se usa a notação da regra dos 6N, adotada pelo Brasil e outros Estados-membros para o Sistema Internacional de Pesos e Medidas na IX Conferência Internacional de Pesos e Medidas em Paris em 1949, (Houaiss, 2004), a saber:

<b>NOME</b>	<b>VALOR</b>
mil bilhões	$10^{15}$
Bilião	$10^{12}$
mil milhões	$10^9$
Milhão	$10^6$
Milhar	$10^3$
Centena	$10^2$
Dezena	$10^1$
Unidade	$10^0$
Décimo	$10^{-1}$
Centésimo	$10^{-2}$
Milésimo	$10^{-3}$
Milionésimo	$10^{-6}$
milmillionésimo	$10^{-9}$
Billionésimo	$10^{-12}$

A notação dimensional usada é de unidades dentro de colchetes, por exemplo, para quilogramas por segundo, usa-se [kg/s], e para grandezas adimensionais, usa-se [.]



## **Definição de termos**

### **AERODINÂMICA**

Parte da mecânica dos fluidos que estuda os gases em movimento, e em particular o movimento relativo entre o ar e os corpos sólidos. (HOUAIS, 2008).

### **AERÓDINO**

Designação genérica (excetuados os aeróstatos) de quaisquer dos aparelhos de voo mais pesados que o ar como, p.ex., aviões, helicópteros, autogiros etc., cuja sustentação provém, principalmente, de forças aerodinâmicas. (ANAC 2008b).

### **AERÓDROMO**

Espaço delimitado, em terra ou na água, provido de relativa infra-estrutura para o pouso e decolagem de aeronaves destinadas ao transporte de passageiros ou de cargas diversas. (HOUAIS, 2008; ANAC, 2008b).

### **AEROMODELO**

Modelo ou miniatura de aeronave usada para fins experimentais, esportivos ou recreativos. (HOUAIS, 2008).

### **AEROMOTOR**

Propulsor de aeronaves. (HOUAIS, 2008).

### **AERONAUTA**

Pessoa que comanda ou tripula veículo aéreo, ou que, a bordo, exerce função específica da aeronavegação. (HOUAIS, 2008).

### **AERONAVE**

Qualquer aparelho capaz de se sustentar e se conduzir no ar e que tem como função transportar pessoas e/ou objetos. (HOUAIS, 2008). A definição do Código Brasileiro de Aeronáutica, Título IV, Capítulo I, artigo 160, a saber: “Considera-se aeronave todo aparelho manobrável em vôo, que possa sustentar-se e circular no espaço aéreo, mediante reações aerodinâmicas, apto a transportar pessoas ou coisas”, (BRASIL, 2009), considera-se inexata na frase “mediante reações aerodinâmicas”. Em efeito, os balões tripulados, por exemplo, devem sua

sustentação fundamentalmente a reações aerostáticas, e são, de fato, considerados aeronaves tanto no campo jurídico, quanto desde o ponto de vista da engenharia.

#### AEROVIA

Espaço aéreo delimitado, de largura, altitude e posição geográfica especificadas segundo convenção internacional, que serve para organizar e controlar o tráfego de *aeronaves* entre *aeroportos*. (HOUAIS, 2008). As aerovias se compõem de *rotas aéreas, interseções e portas de entrada/saída*.

#### ANT (Aeronave Não Tripulada)

Vide *VANT, Veículo Aéreo Não Tripulado*.

#### ÁREA DE APROXIMAÇÃO

Porção do espaço contíguo à *área terminal*, delimitado em três dimensões e destinado às manobras de espera, aproximação para pouso, subida após decolagem e espera para entrada na *aerovia*, a serem realizadas pelas *aeronaves* que chegam e saem do terminal. (ROGÉRIO, 2009)

#### ÁREA DE CRUZEIRO

Porção do espaço especificado em três dimensões destinado a conter uma ou mais aerovias, onde as aeronaves realizam deslocamento ininterrupto à velocidade de *cruzeiro*.

#### ÁREA TERMINAL

Porção do espaço em cujo centro se encontra o *terminal aéreo*, delimitado no nível do solo por um círculo de raio igual à *distância de operação do terminal*, e por uma altura igual à *altura de operação do terminal*. (ROGÉRIO, 2009)

#### CRUZEIRO

Padrão estabelecido para a altitude e velocidade das aeronaves, dentro dos limites do desempenho de maior eficiência e economia. (HOUAIS, 2008).

#### NÍVEL (de operação aérea)

Classificação dada à altura em que as aeronaves podem se deslocar no espaço aéreo de uma região ou país. Distingue-se três níveis, o *nível superior*, acima de

6.850 m (sobre o nível do mar), *nível inferior*, igual ou inferior a 6.850 m (sobre o nível do mar) e o *nível não controlado*, localizado em uma altura igual a 300 m (sobre o nível do mar), que se encontre fora de qualquer área terminal. (PÉRIO, 1974), (ROGÉRIO, 2009). O nível não controlado é o limite inferior do espaço aéreo em que os órgãos de controle aéreo exercem sua função.

#### PONTO DE MEDIÇÃO

Chamado também simplesmente *ponto*, refere-se ao lugar de medição de uma variável da corrente de fluxo de tráfego numa aerovia, quando essa é realizada com um sensor cuja abrangência de detecção compreende um pequeno espaço. Embora as variáveis de fluxo não sejam atribuídas a um ponto, mas a uma área ou volume, é num ponto ao longo da aerovia em que se realiza a medição. Neste caso a medição é de tipo *pontual*.

#### ROTA (AÉREA)

Segmento de *aerovia*, delimitado em três dimensões, com origem e destino específicos, onde as *aeronaves* realizam deslocamento e manobras de entrada e saída da *aerovia*, à altura, velocidade e rumo preestabelecidos por convenção internacional. Uma rota aérea pode ter dois rumos, sendo um de ida e outro de retorno, sendo preferencialmente paralelos e sem se afastar mais do que 50 km um do outro.

#### SENTINELA

Veículo aéreo automatizado, dotado dos sensores necessários para aquisição, armazenamento e transmissão de dados de fluxo de tráfego, deslocando-se no interior da corrente de tráfego. Representa o observador móvel no método de medição de variáveis correspondente.

#### SAAC

Sigla de Sistema Aéreo Automatizado de Carga. Em inglês *Automated Airborne cargo System*, (AACS). Sistema de transporte aéreo de carga que usa automação em todos os processos e níveis operativos, incluindo aeronaves sem tripulação. Na classificação da OACI os SAACs se enquadram no grupo de Sistemas de Veículos Aéreos Não Tripulados (SVANTs).

## TERMINAL (AÉREO)

Aeródromo que conta com facilidades para a chegada e saída de passageiros e carga, incluso a conexão com outros modos de transporte. Sinônimo de *aeroporto*.

## TOPOLOGIA

Parte da matemática que estuda as propriedades geométricas de um corpo, que não sejam alteradas por uma deformação contínua. (HOUAIS, 2008).

## VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado)

Equivalente ao inglês UAV, (*Unmanned Aerial Vehicle*), é o engenho aéreo projetado para voar sem pessoal de comando ou de controle a bordo, passível de realizar missões aéreas de forma autônoma ou comandado à distância. Este tipo de aeronave é diferente de arma propulsada, arma guiada, aeromodelo ou modelo de prova de voo ou aparelho aéreo para prática de tiro.

## VELOCIDADE DE PERDA

Respeito de uma aeronave, é a velocidade abaixo da qual as reações aerodinâmicas nas suas superfícies de sustentação atingem um valor apenas acima do peso da aeronave. O termo *perda* se refere então à força de elevação, que a essa velocidade vira insuficiente para sustentar a aeronave no ar, ou de outra forma, à perda de controle da aeronave porque as superfícies de controle já não reagem adequadamente.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Através do presente trabalho, fez-se um percurso interdisciplinar do conhecimento a servir de base à construção de uma teoria de fluxo de tráfego, aplicável na resolução dos problemas próprios do tráfego automatizado de Veículos Aéreos Não Tripulados de carga.

De forma dedutiva, tomaram-se os fundamentos de diferentes fenômenos de transporte para adaptá-los ao âmbito aéreo automatizado. Inicialmente, a Teoria Geral de Sistemas aportou a plataforma necessária para o estudo científico do problema. Já os modelos de fluxo de tráfego baseados em analogias da mecânica de fluidos caracterizaram o fenômeno e derivaram em definição de variáveis de interesse. Por sua vez, estas variáveis foram moldadas de acordo com a natureza específica dos sistemas automatizados de carga, as particularidades inerentes ao transporte aéreo com aeronaves não tripuladas, as delimitações do controle do espaço aéreo, das organizações reguladoras e da teoria de fluxo de tráfego aéreo convencional.

Na caracterização do problema, assim obtida, salientam por sua importância, as propriedades intrínsecas ao fenômeno, assim como os pressupostos (complementados com as leis da Física de Fluidos) e as variáveis características, tais como velocidade, fluxo, densidade, concentração, espaçamento, intervalo e ocupação. Dentre as leis da Física de Fluidos as de conservação serviram para alavancar a dedução do modelo proposto.

Para o passo seguinte, a dedução das relações matemáticas entre as variáveis, aplicadas no modelo proposto, expõe-se uma descrição dos métodos de medição, (os mesmos métodos de medição de fluxo de tráfego terrestre adaptados ao espaço aéreo automatizado), importantes ferramentas para a comprovação da teoria exposta. Esta se apresenta em um modelo dividido em duas partes que se complementam mutuamente, a saber, o Modelo de Fluxo Contínuo Simples e o Modelo Contínuo Coerente, ambas também mostradas em uma simulação computadorizada.

As deduções mais extensas são apresentadas no final do capítulo 4, na seção de Deduções e Demonstrações. Apresenta-se também uma informação complementar

sobre caracterização de um Sistema Aéreo Automatizado de Carga (SAAC), com o propósito de servir como referência de estudo.

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como fontes de estudo do tráfego aéreo para Veículos Aéreos Não Tripulados foi oportuno analisar a teoria de fluxo de tráfego terrestre e a teoria de controle de tráfego aéreo do sistema convencional. Isto, porque não se conhecem estudos teóricos ou empíricos referentes à teoria de fluxo de tráfego aéreo para SAACs.

Na figura 1 se mostram as áreas de conhecimento que, em princípio, aportam conceitos fundamentais à teoria de tráfego aéreo automatizado para SAACs. Estas áreas interdisciplinares se classificam em geral em três grandes grupos, a saber:

- O fundamento interdisciplinar,
- A base teórica especializada,
- As características particulares do estudo.

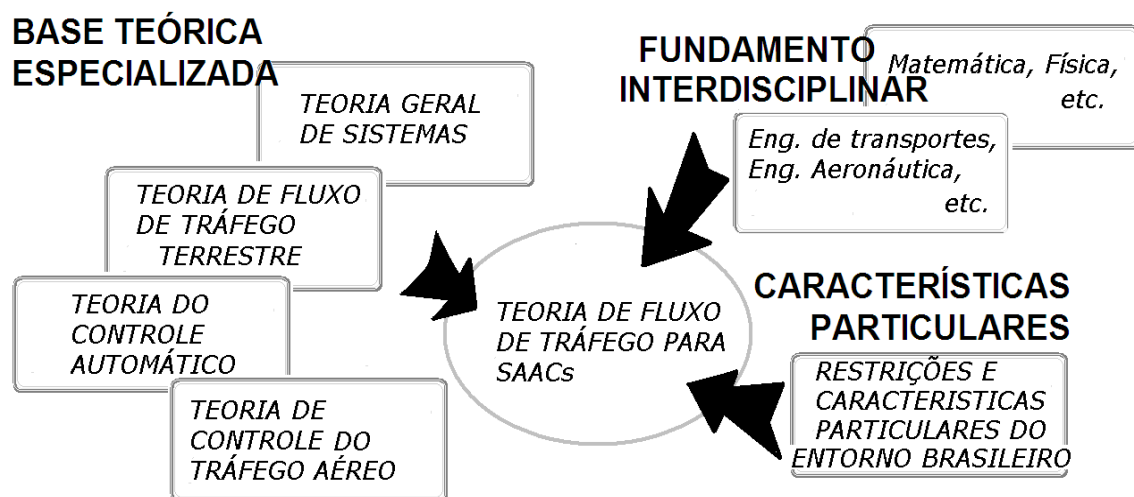


Figura 1. Um mapa conceitual geral da Teoria de Fluxo de Tráfego Aéreo para SAACs. (Fonte: O autor).

O *fundamento interdisciplinar* está constituído pelas ciências básicas necessárias em todo estudo científico, que não requerem uma demonstração rigorosa no contexto do

presente trabalho, nem citação de fonte de informações, por serem áreas de suficiente divulgação e aceitação no meio científico. É o caso da matemática, física, e outras disciplinas fundamentais, assim como os conhecimentos inerentes das engenharias, (Aeronáutica, Automotiva, Ferroviária, Naval, Mecânica, Eletrônica, etc.)

A *Base Teórica Especializada* compreende o estudo rigoroso dos fenômenos de transporte, seja nas áreas de aplicação (aéreo, terrestre, informática, etc.) ou na infraestrutura necessária para seu desempenho. (Teoria geral de sistemas, teoria de redes, etc.). Neste campo, encontra-se diferentes abordagens do estudo teórico do fluxo de tráfego que aportam elementos para estruturar uma teoria de fluxo de tráfego aéreo para SAACs.

Já nas *Características Particulares* do sistema, um conjunto de requisitos, necessidades, objetivos e ideais do tráfego aéreo, particularmente propostos, vêm a se coadunar na produção da teoria de fluxo de tráfego aéreo para SAACs adaptada a um contexto específico. Uma representação do sistema em estudo em frente a suas características particulares se mostra em forma geral na figura 2.

Este trabalho não almeja o nível das características particulares, limitando-se à formulação geral de uma teoria de tráfego aéreo automatizado de carga. Este estudo visa sobre o fluxo de tráfego de um sistema automatizado que não está amplamente difundido e implantado atualmente, desconhecendo-se muitas das suas características. Um melhor detalhamento sobre os objetivos e alcances do trabalho é apresentado nos itens 1.3 e 1.5 respectivamente, à frente.

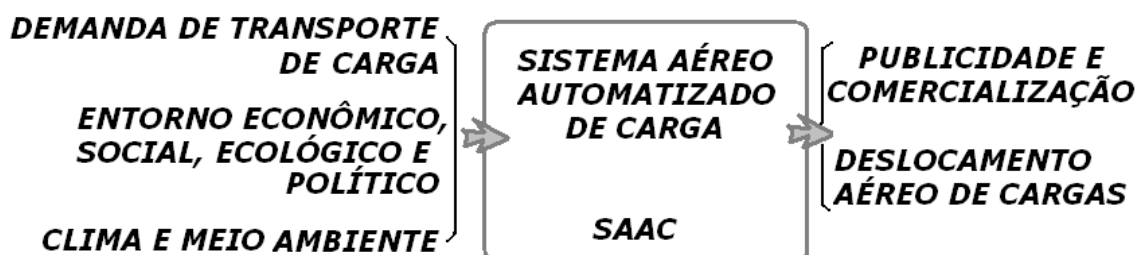


Figura 2. Diagrama funcional do SAAC.

(Fonte: O autor).

Para esclarecer mais o conceito de Sistema de Transporte Aéreo Automatizado se apresenta o capítulo 7, em que se faz um estudo mais detalhado das relações entre suas áreas com descrição de seus subsistemas. O diagrama funcional mostrado na

figura 2 se apresenta conforme à Teoria Geral de Sistemas, explicada com maior detalhe no item 2.1.

Os componentes necessários para o controle de tráfego aéreo, de uso comum atualmente em muitos dos países membros da OACI, se ilustram na figura 3. Uma explicação mais oportuna sobre estes componentes se apresenta no capítulo 7.

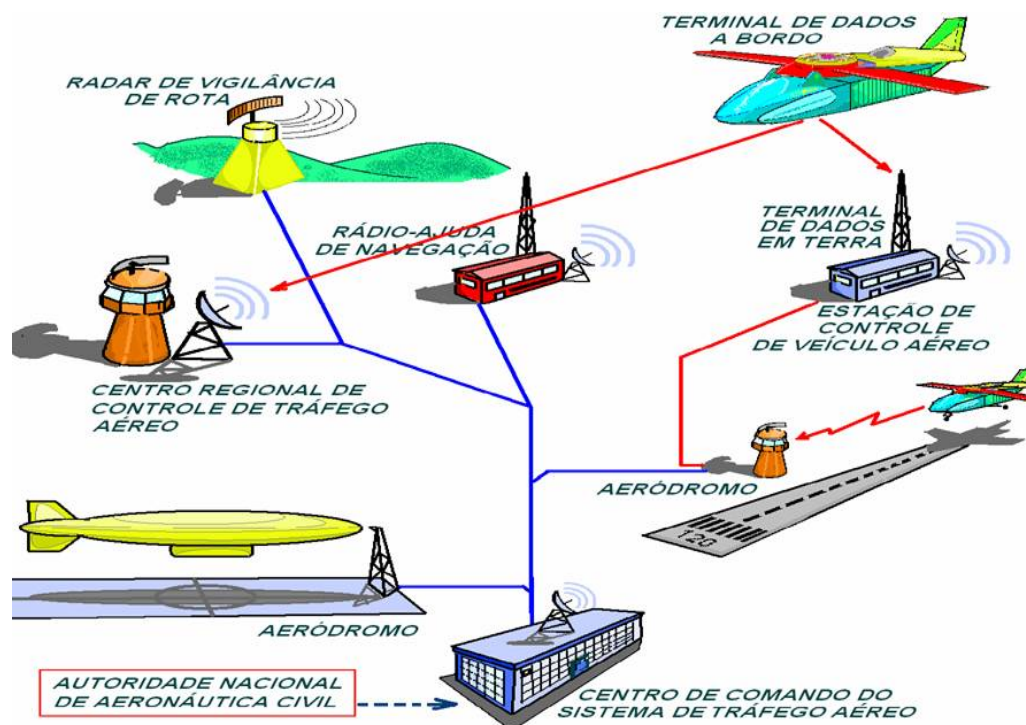


Figura 3. Componentes Gerais do Sistema de Tráfego Aéreo Automatizado de Carga.

(Fonte: O autor).

Note-se que o sistema representado na figura 3 é similar ao sistema de transporte aéreo convencional; no que se refere à sua forma geral não há diferença substancial para aquele que se precisa definir para os SAACs. O sistema de tráfego aéreo para SAACs vem a ser em última análise, um subsistema do sistema de controle de tráfego aéreo convencional.

Apresenta-se na figura 4, um diagrama simbólico do comportamento do fluxo de tráfego relativo aos SAACs, mostrando as relações existentes entre os blocos funcionais, da forma abordada no presente trabalho. Em efeito, cada bloco representa uma variável relevante ou um princípio base na construção de uma teoria de fluxo de tráfego. As conexões entre os blocos são então as relações que se estabelecem nos capítulos seguintes.



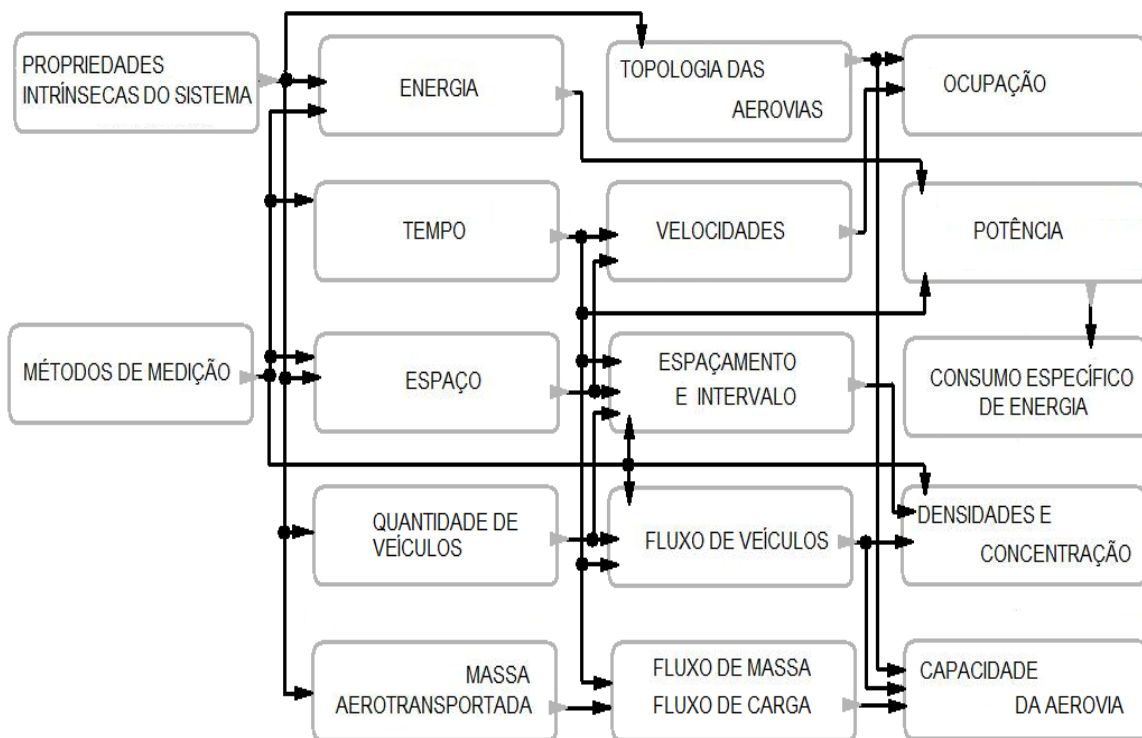


Figura 4. Diagrama simbólico da Teoria de Fluxo de Tráfego de SAACs.

(Fonte: O autor).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Um dos aspectos importantes do transporte é a automação crescente, presente em muitas das atividades humanas ainda desde os primórdios da civilização, como forma de melhorar o desempenho dos sistemas. Por outra parte, o transporte aéreo é regulamentado principalmente tendo em vista a segurança, objetivo que demanda utilização da automação na navegação aérea. Múltiplas tarefas do transporte aéreo envolvem o uso de sistemas e dispositivos que substituem algumas das funções dos operadores humanos, seja porque ajudam a este nas suas tarefas ou porque os equipamentos ou sistemas automatizados são os que fazem possível atingir os níveis de eficiência e eficácia exigidos. Automação é cada vez mais usada nas áreas de navegação aérea, controle de tráfego aéreo, atividades de armazenamento, controle de pedidos, etc.

Acaso contraditoriamente, as regulamentações aeronáuticas atuais impedem que aeronaves sem tripulação realizem voos automatizados no espaço aéreo controlado. De uma parte a tendência a automatizar o transporte promete melhoras na segurança e no desempenho do sistema, e por outra parte a ausência de operadores humanos a

bordo de aeronaves, para "resolver problemas" continua se considerando contra a segurança aérea dentro da filosofia regulamentar. (ANAC, 2008c) Em que pese esta aparente contradição, se os Sistemas de Veículos Aéreos Não Tripulados seguissem a tendência de melhora tecnológica assinalada anteriormente, apresentariam potenciais vantagens nos aspectos de segurança, econômico, uso da energia e cuidado do meio ambiente.

Os estudos teóricos e empíricos do tráfego aéreo são frequentemente orientados aos sistemas de aeronaves tripuladas, com controle de tráfego realizado por operadores humanos. Muitas vezes estes trabalhos admitem explícita ou tacitamente que o tráfego aéreo é inerentemente de baixa concentração, e os processos de controle do mesmo a se enquadrar em paradigmas operacionais de baixa eficiência e eficácia.

No ano 2006, no Brasil houve por volta de 552.400 decolagens na aviação comercial (aeronaves tripuladas) só na operação nacional, (ANAC, 2006). A evolução do número de decolagens dos últimos anos, no Brasil, se mostra na tabela 1, considerando somente os voos comerciais. Completando alguns cálculos gerais de tráfego aéreo, tem-se que decolaram perto de 68 aeronaves a cada hora, em todo o território nacional, 63 delas pousando em destinos no espaço aéreo brasileiro.

Tabela 1. Evolução do número de decolagens comerciais no Brasil.

<b>Ano</b>	<b>Nacional</b>	<b>Internacional</b>	<b>Total anual</b>
2005	524.598	50.867	575.465
2006	552.367	45.327	597.694
2007	571.989	52.261	624.250
2008	624.915	57.478	682.033

(ANAC, 2005, 2006, 2007 e 2008a)

Se a distribuição de decolagens fosse uniformemente distribuída em todos os 161 aeroportos civis considerados no relatório da ANAC do ano 2008, e nas 24 horas do dia, cada um deles só teria que cuidar de uma decolagem (e um pouso) a cada duas horas e meia. Mas, por volta do 59% das decolagens se concentra nos dez mais movimentados aeroportos do país.

Na tabela 2 se classificam em ordem descendente os 10 aeroportos com maior atividade no país, incluindo todas as decolagens e pousos do ano 2008. De acordo com esses dados, os aeroportos de Congonhas, Brasília, Guarulhos e do Rio de

Janeiro somaram 591.274 decolagens e pousos durante o ano, significando que os controladores de tráfego aéreo da região sudeste prestaram ajuda a uma aeronave em voo a cada 53 segundos, o que significa um árduo trabalho que exige concentração permanente.

Tabela 2. Aeroportos com maior número de decolagens no ano 2008 no Brasil.

UF	AEROPORTO	DECOLAGENS	POUSOS
SP	CONGONHAS	80.607	83.164
DF	INT. DE BRASILIA	73.354	70.538
SP	INT. DE SAO PAULO	71.594	74.461
RJ	INT. DO RIO DE JANEIRO	68.117	69.439
BA	INT. DOIS DE JULHO	48.850	47.737
PE	INT. GUARARAPES	38.300	37.926
RS	INT. SALGADO FILHO	37.057	39.996
PR	INT. AFONSO PENA	36.267	34.420
MG	INT. TANCREDO NEVES	34.253	34.487
AM	EDUARDO GOMES	26.145	27.490
	<b>TOTAL</b>	514.544	519.658
	<b>TOTAL DO ANO</b>	882.600	882.600

(ANAC, 2008a.)

Note-se que ainda com estes valores, o tráfego aéreo brasileiro é de baixa concentração, pois sua separação é em média de 9,4 km. Nas condições de operação dos SAACs o tráfego aéreo pode ser de concentrações elevadas, ainda maiores das observadas para o tráfego do sistema aéreo convencional. A JAA (*Joint Aviation Authorities*) já se preocupou com este aspecto, mencionado no relatório pp 026\_3 de 26 de Outubro de 2000 (JAA, 2000), em que menciona que não existem considerações a respeito do tráfego aéreo de ANTs, (no espaço aéreo europeu<sup>1</sup>), e ressalta a necessidade de desenvolver critérios e soluções para incorporar os ANTs ao espaço aéreo regular, acompanhado simultaneamente com a regulamentação de aeronavegabilidade para estes sistemas. As variáveis envolvidas no tráfego de tais sistemas automatizados não são bem conhecidas nas condições de alta concentração e de variedade de velocidades em três dimensões.

Precisa-se conhecer como adaptar os aspectos do tráfego aéreo convencional para acolher tal classe de sistemas de transporte automatizados. Este conhecimento é vasto e deve preceder o suficiente às tendências da técnica. Os trabalhos em

<sup>1</sup>Ainda que a JAA se refere somente à sua área de abrangência, o espaço aéreo europeu, esta condição se observa também no mundo inteiro, sendo a OACI quem concentra os esforços de regulamentação, em conjunto com as autoridades aeronáuticas da Europa, Japão, Reino Unido, Estados Unidos dentre outras.

desenvolvimento nas áreas de Teoria de Sistemas, Fluxo de Tráfego Terrestre, Fluxo de Fluidos em Dutos e Controle de Tráfego Aéreo fornecem uma base condizente com o aperfeiçoamento teórico para uma completa descrição do tráfego de SAACs.

### **1.3 OBJETIVOS**

De um modo geral, no desenvolvimento do presente trabalho, faz-se uma revisão das variáveis e dos fundamentos envolvidos nos diferentes modelos teóricos e heurísticos de fenômenos de transporte, procedentes de áreas diversas tais como as redes de computadores, de circuitos elétricos, e de tráfego terrestre e aéreo. Estes conceitos servirão para formular um conjunto de relações que possam descrever com propriedade o comportamento do tráfego aéreo dos SAACs.

Especificamente, os objetivos do trabalho são:

1. Estabelecer as variáveis essenciais que caracterizem o tráfego aéreo de Sistemas Automatizados de Carga, chamadas de variáveis características do sistema.
2. Formular um conjunto de relações entre as variáveis características do sistema, chamadas Relações Terminais do Sistema, a serem estabelecidas na descrição do tráfego aéreo de SAACs.

### **1.4 METODOLOGIA**

O processo de determinação das variáveis relevantes e de suas relações se dividiu em 4 fases importantes, diferenciadas pelo nível de generalidade dos conceitos estabelecidos.

Na primeira fase, compilou-se diferentes conceitos e estudos sobre fenômenos de transportes, provenientes de áreas diversas como a hidráulica, a teoria de fluxo de tráfego terrestre e tráfego aéreo. As informações obtidas nesta fase foram comparadas com o fluxo de tráfego de veículos não tripulados para extrair conceitos relativos aos objetivos deste trabalho.

Na segunda fase, ilustrada na figura 5, declararam-se as variáveis fundamentais que podem caracterizar o comportamento do fluxo de tráfego, a partir dos pressupostos e características inerentes a este tipo de fluxo e dos métodos de medição sugeridos. Neste nível, as variáveis correspondem com as variáveis mais gerais da física, como o espaço, o tempo, massa, quantidade de veículos e energia, não pretendendo que sejam as únicas ou as melhores variáveis fundamentais.

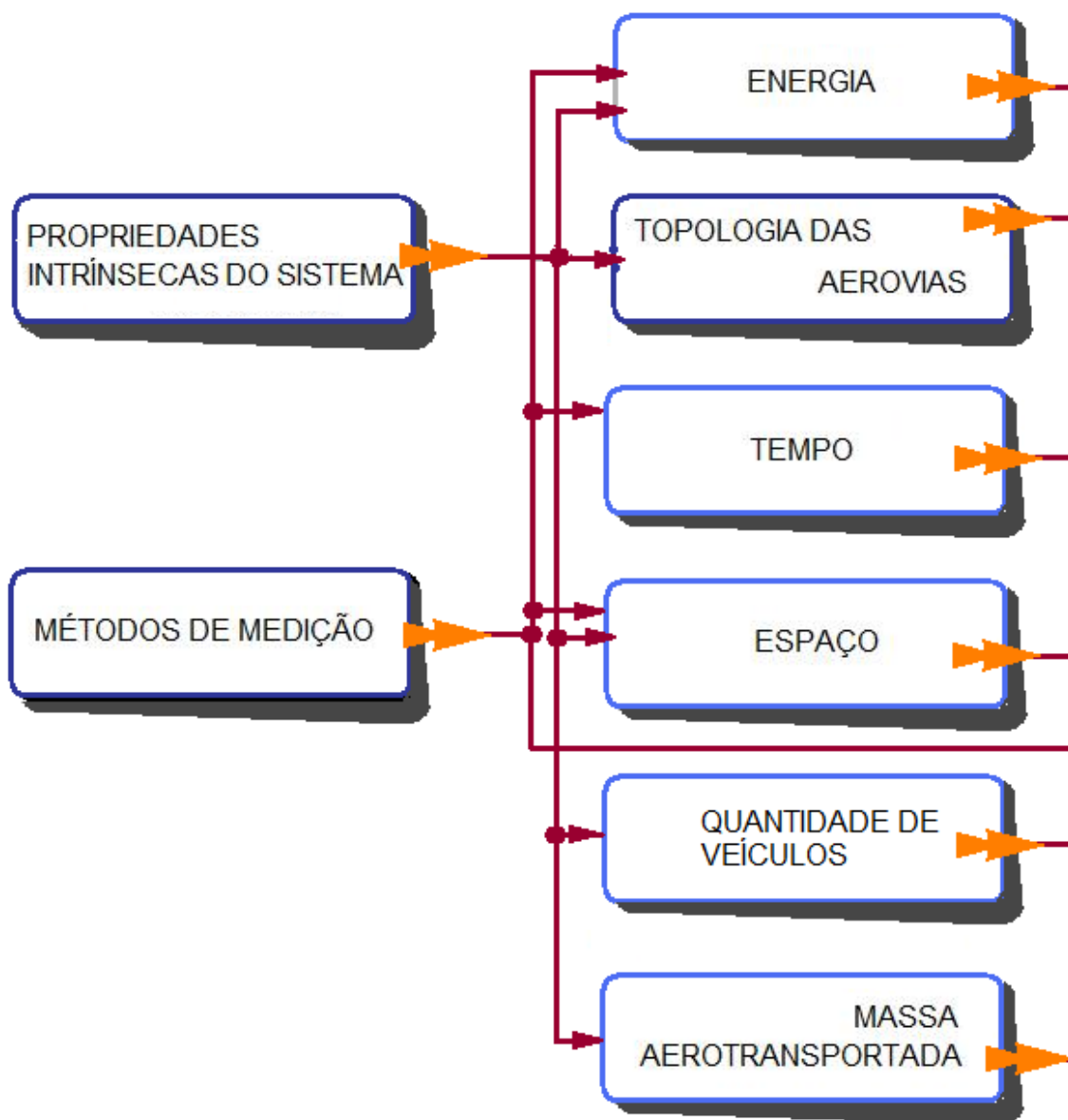


Figura 5. Estabelecimento de variáveis fundamentais de fluxo de tráfego.

(Fonte: O autor).

Na figura 6 se mostra um diagrama da terceira fase da metodologia, em que se tomaram as variáveis produzidas na primeira fase para serem combinadas e completadas com relações matemáticas para obter um nível superior de novas variáveis, como as velocidades, espaçamento e fluxo. Como complemento, dentro de esta fase, foram aproveitadas leis da física geral, como as leis de conservação, que serviram para encontrar as relações de constrangimento do sistema.

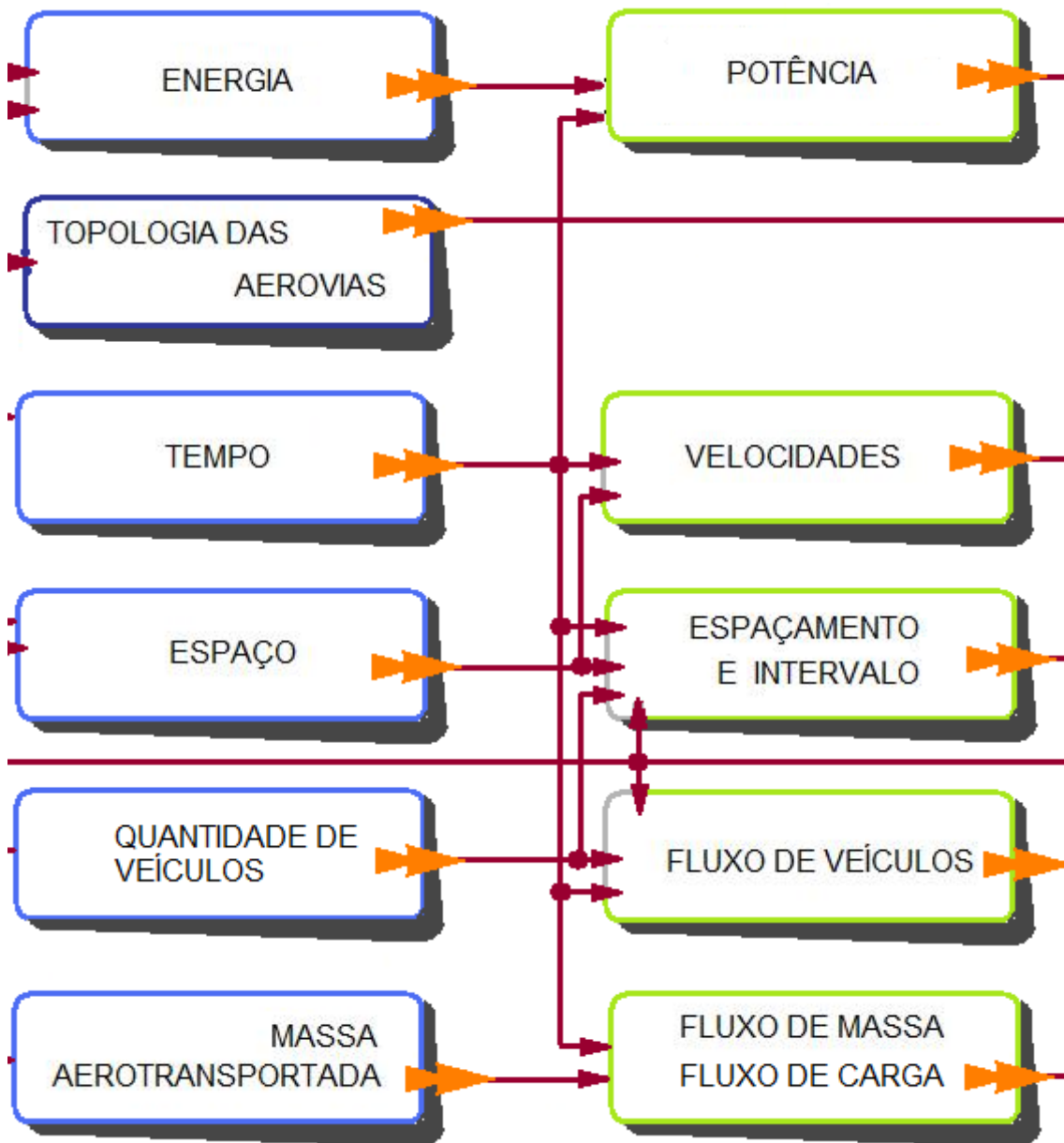


Figura 6. Estabelecimento das variáveis secundárias de fluxo de tráfego.

(Fonte: O autor).

Na quarta fase, ilustrada na figura 7, partindo das variáveis de segundo nível, obteve-se a ocupação, densidades e capacidade. Como as deduções se realizaram com proposições matemáticas, é possível que algumas das constantes de proporcionalidade requereram calibração. Trabalhos futuros podem expandir este aspecto, por exemplo com a comparação com dados adquiridos no campo, para servirem de referência a este respeito.



Figura 7. Estabelecimento das variáveis de terceiro nível de fluxo de tráfego.

(Fonte: O autor).

É possível estender ainda este processo ao desenvolvimento de fases adicionais, para encontrar outras variáveis e relações matemáticas mais complexas.

## **1.5 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO**

O trabalho encontra-se delimitado às relações de primeira ordem, aquelas que a matemática geral permite alcançar. Outras técnicas, como a análise numérica, a aproximação estatística ou a otimização do sistema não formam parte dos objetivos do trabalho.

O desenvolvimento do trabalho considerou as variáveis que tem a ver com o comportamento do fluxo de veículos aéreos que se controlam por computadores. Isto pressupõe que o sistema possui soluções de segurança e de controle que são lógicas e previsíveis, com desconsideração das particularidades da psicologia humana, do acaso e de conceituação filosófica.

As variáveis fundamentais sugeridas para estudo são velocidade, densidade e suas variantes, fluxo e frequências com suas variáveis associadas. As variáveis aqui consideradas e relações estabelecidas estão limitadas às relações fluxo-velocidade, fluxo-densidade e consumo energético. É possível acrescentar mais variáveis e encontrar outras relações interessantes que as conectem.

Em suma, este trabalho persegue um processo de modelagem, considerando as variáveis relevantes num primeiro passo, para definir depois o sistema no que se refere às suas variáveis internas.

## **1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O trabalho se apresenta em forma de seis capítulos: O primeiro capítulo é a Introdução, que descreve este estudo em forma geral, e inclui a justificativa, objetivos, metodologia e delimitação.

Já no capítulo dois se realiza a revisão bibliográfica, onde se expõem as teorias existentes que serviram de base para o desenvolvimento dos modelos propostos, tais como a Teoria Geral de Sistemas, a Física de Flúidos, estudos sobre automação do



tráfego e do transporte aéreo, estudos sobre o controle de tráfego aéreo convencional, e descrição do sistema de controle aéreo existente no Brasil.

O capítulo 3 apresenta as características próprias do fluxo de tráfego aéreo automatizado de carga, descrevendo as propriedades intrínsecas a ele e os pressupostos e fundamentos que regem dito fluxo. Dentre estes últimos, estuda-se as leis de conservação, a compressibilidade do fluxo.

Como parte da caracterização do fenômeno, no capítulo 4, estuda-se a topologia das aerovias, que serve para determinar dois tipos fundamentais de aerovia. Também neste capítulo, define-se os conceitos de aerovia, rota, seção e segmento de aerovia, assim como as variáveis de interesse sugeridas, tais como velocidades, fluxo, massa total aerotransportada, densidade, concentração, espaçamento, intervalo e ocupação.

Formam parte do capítulo 5 os métodos de medição cabíveis no fluxo de tráfego aéreo automatizado, a saber, medição em um ponto, ao longo de pequeno (e grande) trecho, por observador móvel ou sentinela, e medição a partir dos dados gerados pelo sistema.

No capítulo 6 se apresenta um modelo proposto para o cálculo numérico das corrente de fluxo de tráfego para SAACs. É o Modelo Contínuo e Coerente, organizado como uma sequência de passos e iterações numéricas, realizável através de uma simulação computadorizada.

O trabalho se encerra com as Considerações finais, no capítulo 8, e com as Conclusões e Sugestões no capítulo 9. As considerações finais expressam algumas das possibilidades de desenvolvimentos relevantes que não foram consideradas aqui por escaparem do alcance e objetivos deste trabalho.

No final do capítulo 4 se apresenta uma seção especial para aquelas demonstrações que são úteis no trabalho, mas que representam uma operação rigorosa matemática. Também se apresenta, no capítulo 7, a caracterização formal de um Sistema Aéreo Automatizado de Carga, de acordo com a Teoria Geral de Sistemas, para servir de base de projeto e para mostrar algumas das propriedades intrínsecas usadas do capítulo 3.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 A ABORDAGEM SISTÊMICA

A Teoria Geral de Sistemas (*TGS*), foi proposta inicialmente por *Ludwig Von Bertalanffy* na década de 1950. Esta provê um ponto de vista diferente do fornecido pelo estudo analítico tradicional na ciência. Este ponto de vista é chamado de visão sistêmica e enfatiza na holística, a forma de conceber e analisar os sistemas a partir de seu aspecto global e não a partir de uma componente isolada. A visão sistêmica ou holística se coloca como oposta ao individualismo metodológico, sob o ponto de vista clássico. Na *TGS* um sistema é decomposto em partes constituintes concatenadas coerentemente a partir de entradas e saídas das mesmas. (PEREIRA, 2008).

Não se deve, entretanto, considerar a Teoria Geral de Sistemas propriamente como uma ciência ou uma teoria, mais sim como uma metodologia, permitindo melhorar e organizar os conhecimentos. (PEREIRA, 2008). Consequentemente, o desenvolvimento da *TGS* e as diferentes ramas de ciência deverá conduzir a todos os que trabalham com sistemas complexos ao estabelecimento de uma Teoria Unificada de Sistemas . (PEREIRA, 1970).

O estudo completo da *TGS* comporta aspectos determinísticos e estocásticos de acordo à natureza complexa dos sistemas. No primeiro caso, os aspectos determinísticos permitem que, com repetição das mesmas entradas no sistema, produzam-se as mesmas saídas. (SKITTER, 1996), comportamento passível de ser representado com equações algébricas. No segundo caso, nos aspectos estocásticos, a repetição das mesmas entradas produzirá saídas que variam dentro de um intervalo de possibilidades. (AZAMBUIA, 2004), resultando apropriado representar este comportamento com relações estatísticas.

Por outro lado, no estudo dos sistemas sob o ponto de vista da *TGS*, duas grandes abordagens essenciais devem ser consideradas: (PEREIRA, 2008).

1. Teoria da modelagem,
2. Teoria do comportamento.

Na teoria da *modelagem* são considerados os modelos matemáticos de sistemas dinâmicos a partir de suas componentes, compreendendo fundamentalmente os subproblemas da Representação, Análise, Síntese, Simulação e Identificação. (PEREIRA, 2008).

O estudo do *comportamento* se refere às propriedades das soluções dos modelos matemáticos de sistemas, abordando aspectos tais como a controlabilidade, observabilidade, estabilidade, confiabilidade e otimização. (PEREIRA, 2008).

No presente trabalho se aborda essencialmente aspectos de um problema de representação, uma vez que se pretende descrever o comportamento do fluxo de tráfego dos SAACs através modelos matemáticos.

## 2.2 FLUXO DE FLUIDOS NO INTERIOR DE DUTOS

Um fluido que escoar no interior de uma tubulação pode ser estudado a partir das forças de cisalhamento presentes entre as partículas do fluido, ou entre estas e as paredes do duto. Por exemplo, as equações de Euler propiciam uma boa ferramenta para a análise inicial, mas não proporcionam uma solução geral, e devem se usar métodos semi-empíricos ou experimentais para deduzir algumas relações que auxiliem a abordagem determinística. (GILES, 1978).

Distinguem-se vários tipos de escoamento de fluidos no mundo físico, de acordo com as características da velocidade de suas partículas, (GILES, 1978) a saber:

Escoamento *estável*, quando o fluxo atinge o mesmo valor antes e depois de uma perturbação. Se não acontecer dessa forma, chama-se de escoamento (ou fluxo) *instável*.

O escoamento de fluidos se chama *Uniforme* quando se verifica a mesma velocidade, em direção e intensidade, em todos os pontos do fluxo, o que equivale a dizer que o gradiente da velocidade, em relação ao espaço, é igual a zero em qualquer ponto do fluido. De outra forma, trata-se de fluxo não uniforme. Expressa-se com a equação:

$$\frac{\partial V}{\partial s} = 0 \quad (\text{Eq. 2.1})$$

A existência de escoamento uniforme implica na invariância de outras variáveis como o fluxo, a densidade e a pressão, ao longo do espaço ocupado pelo fluido. Observe-se que o escoamento pode ser uniforme e ao mesmo tempo suas variáveis podem apresentar variação no tempo.

De acordo com a direção do fluxo, o escoamento pode ser *unidimensional*, *bidimensional* ou *tridimensional* se apresentar respectivamente, uma, duas ou três componentes de velocidade.

O escoamento pode ser *rotacional* se apresentar valores não nulos de aceleração centrífuga. Caso contrário, trata-se de escoamento *irrotacional*.

O escoamento permanente é de especial interesse no estudo do fluxo de tráfego aéreo. Este se apresenta quando a velocidade permanece constante no tempo. Porém, esta pode apresentar variação no espaço. Expressado de forma de gradiente no tempo:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (\text{Eq. 2.2})$$

No escoamento permanente, de forma análoga ao que acontece com o fluxo uniforme, a equação 2.2 implica em que a pressão, a densidade e o fluxo também serão constantes no tempo.

Dois tipos de fluxo podem se distinguir no escoamento permanente, a saber:

1. Escoamento laminar,
2. Escoamento turbulento.

No primeiro caso, as partículas do fluido se deslocam em forma ordenada, em camadas ou lâminas em trajetória paralela e reta. Já o escoamento turbulento

apresenta diversas velocidades e direções para as partículas do fluido, não sendo possível determinar a trajetória de uma partícula individual. O limite entre fluxo laminar e turbulento se estabelece com o *número de Reynolds*,  $R_E$ , através do quociente entre os valores das forças de atrito e as forças de viscosidade. Na aerodinâmica, entretanto, tem-se observado que, quando a razão entre estas duas forças é muito grande, por exemplo 2000 vezes, o fluxo é de natureza turbulenta; de outra forma o fluxo é laminar. O número de *Reynolds* se expressa com a equação:

$$R_E = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu}, \text{ (Eq. 2.3)}$$

- Com:
- $R_E$ : Número de *Reynolds*, adimensional.
  - $v$ : Velocidade média das partículas do fluido. [m/s].
  - $d$ : Distância mínima transversal das lâminas de fluido. [m].
  - $\rho$ : Densidade do fluido no ponto de análise. [kg/m<sup>3</sup>].
  - $\mu$ : Viscosidade absoluta do fluido. [N.s/m<sup>2</sup>]

O escoamento turbulento se caracteriza pela presença de correntes de recirculação do fluido e aleatoriedade nas velocidades e direções das partículas do fluido.

Observa-se uma similaridade do escoamento de um fluido confinado a um duto, com o fluxo de tráfego de aeronaves dentro de uma aerovia; no dois casos a matéria composta por partículas se desloca no sentido em que a pressão diminui. O fluido a escoar dentro de um duto pode apresentar compressibilidade ou não. O tráfego de aeronaves semelha um fluido compressível, como mencionado no capítulo 3.

### 2.3 FLUXO DA CORRENTE ELÉTRICA NO INTERIOR DE UM CONDUTOR

Os elétrons que se deslocam no interior de um fio condutor também apresentam comportamento semelhante ao fluxo de tráfego de veículos aéreos em uma aerovia. Em efeito, a tensão aplicada nos extremos de um condutor impulsiona uma quantidade de elétrons proporcionalmente à resistência do meio condutor, expressada pela *lei de Ohm*. Uma das formas de escrever esta lei é:

$$I = \frac{V}{R}, \text{ (Eq. 2.4)}$$

Com:  $I$ : Intensidade da corrente elétrica [A]

$V$ : Tensão elétrica. [V].

$R$ : Resistência elétrica do meio condutor. [ $\Omega$ ].

A intensidade da corrente elétrica, expressada em Amperes, equivale ao número de elétrons que a tensão impulsiona em um intervalo de tempo, ou seja, é uma medida do fluxo de partículas.

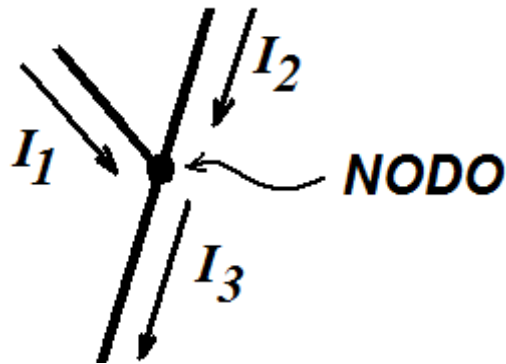


Figura 8. Correntes elétricas convergem e divergem de um nodo.

(Fonte: O autor).

No caso de uma bifurcação em um circuito, mostrado na figura 8, similar a uma interseção em uma aerovia, a soma das correntes que entram no nodo deve se igualar ao valor das que saem dele, como enunciado pela *Lei de Correntes de Kirkhoff*:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0, \text{ (Eq. 2.5)}$$

Com:  $I_i$ : Intensidade das correntes elétricas [A]. Sinal positivo para as correntes que entram, e negativo para as que saem.

Note-se que a equação 2.5 é outra forma de enunciar a conservação da matéria. Neste caso foi originada num conceito similar, o da conservação da carga elétrica.

## 2.4 DOS SISTEMAS AÉREOS AUTOMATIZADOS DE CARGA

De acordo com o conceito formal de Veículo Aéreo Não Tripulado, *VANT*, (em inglês, *Unmanned Aerial Vehicle, UAV*), esta é a que foi projetada para operar exclusivamente sem pessoal de comando ou controle a bordo, diferente do que modelos de prova, aeromodelos, armas guiadas ou armas propulsadas. De acordo com a associação de fabricantes de *VANTs*, do Reino Unido, este tipo de aeronaves encontra três tipos de mercados globais: o militar, o civil e o comercial. (*U.K. UAVS TRADE ASSOCIATION, 2005*). A mesma fonte declarou que as aplicações civis e comerciais incluem vigilância, aplicações na agricultura, propaganda, comunicações, transporte aéreo de carga etc. O veículo aéreo não tripulado, munido das aerovias, terminais e controle vêm a conformar o Sistema de Veículos Aéreos Não Tripulados, *SVANTs*. (ou *UAS, Unmanned Aircraft Systems*). (*OACI, 2005*).

Atualmente muitas das aplicações mencionadas se realizam regularmente e se observa um ativo melhoramento tecnológico e incremento das operações aéreas. A Autoridade de Aviação Civil dos Estados Unidos, a *FAA* expediu 8 certificados de aeronavegabilidade para *SVANTs* em 2004, 50 em 2005 e cerca de 100 em 2006, mesmo sem existir uma regulamentação específica. (*FAA, Escritório do Programa de UAS, citado por UVS INTERNATIONAL, 2008*).

De acordo com os dados registrados na *UVS INTERNATIONAL (2007)*, organização colaboradora da *OACI (Organização da Aviação Civil Internacional)* no referente a informação e cooperação internacional sobre *SVANTs*, até maio de 2007, 10% dos projetos de *SVANTs* eram de aplicação civil ou comercial. Dentre os países mais ativos no desenvolvimento deste tipo de projetos salientam os Estados Unidos (203 projetos), França e Israel com 53 projetos cada um, incluindo todas as aplicações. Outros países notáveis, com menor número de desenvolvimentos são Alemanha, China, Reino Unido, Japão, Paquistão, Austrália e a Federação Russa. É de salientar que muitos destes países contam com organizações governamentais ou privadas que se encarregam já dos assuntos referentes aos *SVANTs*, em resposta à crescente atividade.

As preocupações em torno dos *SVANTs* são em três grandes áreas, como as que pretende definir a organização *RTSC* dos Estados Unidos, na sua função colaboradora da *OACI* e assessora da *FAA (Federal Aviation Authority, dos Estados Unidos)*,

através do comitê internacional SC-203. Em efeito, o comitê trabalha na construção de um *guia de desenvolvimento de SVANTs*, que orienta as nações nas três áreas seguintes:

1. Sistemas de Veículos Aéreos Não Tripulados : definição das Normas Mínimas de Rendimento do Sistema Aéreo, ou *MASPS (Minimum Aviation System Performance Standards)*.
2. Comando, Controle e Sistema de Comunicações para os Sistemas de Veículos Aéreos Não Tripulados: no referente a fatores humanos, fatores de confiabilidade e requerimentos de rendimento funcional nas ligações de transmissão de dados.
3. Sistemas de Detecção e Prevenção para os *SVANTs*: no referente à prevenção de colisões, já se desenvolveram diferentes sistemas que comprovaram nível de segurança pelo menos equivalente aos das operações do Sistema de Veículos Aéreos Não Tripulados. (OACI, 2005).

Na terceira das áreas de estudo mencionadas, a de Detecção e Prevenção é a que se salienta por sua relação com a segurança do tráfego aéreo em geral. O comitê SC-203 iniciou suas atividades em Outubro de 2004, com o propósito de determinar condições mínimas para as operações de *SVANTs* a se inserir num espaço aéreo que muitas vezes já possui uma densidade de tráfego de proporções consideráveis.

Enquadram-se na categoria comercial os Sistemas Aéreos Automatizados de Carga, (*SAACs*), que são de interesse particular neste trabalho. Estes sistemas são uma especialidade dos *SVANTs*, apresentando as seguintes características gerais:

1. São sistemas de transporte aéreo de carga.
2. Operam com aeronaves autônomas e sem tripulação.
3. O controle de tráfego aéreo é automatizado.
4. O controle de aeroporto é automatizado.
5. O controle de carga e descarga é automatizado.



## **2.5 ORGANIZAÇÃO DA AERONÁUTICA CIVIL**

Cada país possui uma organização aeronáutica, chamada de autoridade aeronáutica civil, responsável em geral pela administração segura do espaço aéreo. No Brasil a autoridade aeronáutica civil é a Agência Nacional de Aviação Civil, *ANAC*. Alguns países têm se unido para compartilhar funções da autoridade aeronáutica civil em uma só organização, como a Comunidade Européia, com a *EASA* e *EUROCONTROL*.

A Organização da Aviação Civil Internacional, *OACI*, (ou *ICAO* em inglês), exerce as funções de órgão regulamentar internacional, através de suas recomendações, usadas como referência para a construção das legislações de cada país. A *OACI* não tem autoridade e sim atua como entidade assessora dos países, estados e organizações que dela são membros.

Alem da *ANAC*, existem mais outros órgãos e instituições que colaboram ou realizam outras funções correlatas à administração do espaço aéreo. Estas entidades são os *SERACs*, divisões regionais da *ANAC*, os *SRPV*, Serviço regional de proteção ao voo, e o *DECEA*, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Já com funções tanto civis quanto militares existem os Centros Integrados de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo, *CINDACTA*. A *INFRAERO* é a organização governamental que administra e controla a infraestrutura de terminais aéreos no Brasil.

## **2.6 SISTEMA DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO NO BRASIL**

No Brasil o espaço aéreo é organizado e controlado pelo *DECEA*, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo. É uma organização do Estado brasileiro subordinada ao Ministério da Defesa e ao Comando da Aeronáutica. Além das funções militares o *DECEA* também realiza o controle do espaço aéreo para operações civis, e mantém o sistema de controle através da Comissão de Implantação do Sistema de Controle do Espaço Aéreo *CISCEA*. (*DECEA*,2008).

Dentre as tarefas importantes a realizar pelo *DECEA* está o Gerenciamento do Tráfego Aéreo, com objetivos de segurança, regularidade e eficácia no tráfego aéreo. Suas atividades em cumprimento do controle do espaço aéreo brasileiro podem se classificar em três grupos especializados principais:

1. Gerenciamento do Espaço Aéreo
2. Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo
3. Serviço de Tráfego Aéreo

Em termos de tráfego aéreo, o espaço aéreo não somente se refere ao espaço propriamente dito, (por exemplo, medido em km<sup>3</sup>), mas também à sua área subjacente, medida em km<sup>2</sup>. Nos efeitos do presente trabalho, chamar-se-á *volume* ao espaço aéreo disponível em uma aerovia, enquanto que o nome de *espaço aéreo* do país, em geral, usar-se-á para a área de território ou mar subjacente ao mesmo.

O espaço aéreo brasileiro compreende à sua área territorial de 8.511.965 km<sup>2</sup> e à área oceânica até os 10 graus de longitude Oeste, totalizando assim perto dos 22 milhões de km<sup>2</sup>. (DECEA,2008)

Desde o ponto de vista da função de controle exercida, o espaço aéreo de um país se divide em três tipos de áreas. Costuma-se chamar esta classificação de *Designação* do espaço aéreo (Rogério, 2009). Estas três áreas são:

1. Região de informação de voo,
2. Espaço aéreo controlado,
3. Espaço aéreo condicionado.

Já de acordo com o tipo de serviço de navegação ou controle de tráfego aéreo disponível, o espaço aéreo se organiza em classes, (Rogério, 2009), assim:

Classe A: Dispõe de serviço de Controle de tráfego aéreo (*ATS*), é permitido somente tráfego aéreo sob regras de voo por instrumentos, (*IFR*).

Classes B, C, D: Dispõem de serviço de Controle de tráfego aéreo (*ATS*), é permitido tanto o tráfego aéreo sob regras de voo por instrumentos, (*IFR*), como sob regras de voo visual, (*VFR*).

Classe E: Dispõe de serviço de Controle de tráfego aéreo (*ATS*) para o tráfego aéreo sob regras de voo por instrumentos, (*IFR*). É

permitido o tráfego aéreo sob regras de voo visual, (*VFR*). Este pode usar o serviço de informação de voo, (*IFS*).

Classe F: O serviço de Controle de tráfego aéreo (*ATS*) assessora o tráfego aéreo sob regras de voo por instrumentos, (*IFR*). É permitido o tráfego aéreo sob regras de voo visual, (*VFR*). Este pode usar o serviço de informação de voo, (*IFS*).

Classe G: Permite-se tanto o tráfego aéreo sob regras de voo por instrumentos, (*IFR*), quanto sob regras de voo visuais, (*VFR*). O serviço de informação de voo está disponível para quem requerer.

As regiões de informação de voo correspondem com o espaço aéreo onde as aeronaves em trânsito contam somente com o Serviço de Informação de Voo (*FIS*) sem controle de tráfego aéreo.

O Espaço Aéreo Controlado é a área onde todas as operações aéreas são cumpridas sob controle do órgão de tráfego aéreo, o *ATC*. O espaço aéreo controlado se divide por sua vez em Zonas de Tráfego de Aeródromo (*ATZ*), Zonas de Controle (*CTR*), Áreas de Controle de terminal (*TMA*), Área de Controle inferior (*CTA*), Área de Controle Superior (*UTA*). Têm-se incluído definições de estas áreas na definição de termos. As aerovias (*AWY*) são porções do espaço aéreo disponíveis para deslocamento prolongado de aeronaves; pertencem seja às áreas de controle inferior ou superior, sendo assim aerovias inferiores e superiores.

O Espaço Aéreo Condicionado não estão normalmente submetido à vigilância do órgão de controle de tráfego aéreo, porém pode ser de jurisdição militar ou de outros organismos de segurança. Estas áreas podem ser condicionadas temporária ou permanentemente, e se classificam em zonas proibidas (P), zonas restritas (R) e zonas perigosas (D) para a aviação civil. Serviços de informação e alerta podem estar disponíveis neste espaço.

## 2.7 DA TEORIA DE FLUXO DE TRÁFEGO AÉREO

Dentro da pesquisa desenvolvida neste trabalho, não foi possível encontrar estudos rigorosos teóricos do fluxo de tráfego aéreo de natureza determinística, nem para veículos aéreos tripulados como para os não tripulados.

No entanto, existem estudos probabilísticos sobre alguns dos aspectos particulares do fluxo de tráfego aéreo, como o de Alexander (citado por Góes, 1985), acerca da probabilidade de acidente em um espaço aéreo definido. Uma das conclusões do trabalho de Alexander é a relação entre o número provável  $M$  de colisões de aeronaves (tripuladas), e o número  $P$  de aeronaves evoluindo em uma área  $A$  [milhas<sup>2</sup>], dispostas em múltiplos níveis de voo  $N$ :

$$M = \frac{(P^2 \cdot r \cdot V)}{(N \cdot A)}, \text{ (Eq. 2.6)}$$

Com:  $V$ : Velocidade média das aeronaves na área  $A$ , [nós].

$r$ : distância crítica de colisão, [pés].

Góes (1985), apresenta uma descrição dos conflitos de tráfego aéreo, o conflito de ultrapassagem e o conflito de cruzamento. Expõe uma descrição analítica aproximada do procedimento manual que um controlador humano deveria realizar para resolver um conflito de ultrapassagem de duas aeronaves tripuladas. Góes também dá uma expressão (de interferência) para o número de conflitos de cruzamento  $E$  [1/h], por unidade de tempo:

$$E = \frac{f_1 \cdot f_2}{V} \cdot \left[ 2 \cdot L + w \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha}{2} \right) \right], \text{ (Eq. 2.7)}$$

Com:  $f_1, f_2$ : fluxos médios nas aerovias 1 e 2, respetivamente. [1/h].

$V$ : Velocidade média das duas aeronaves em conflito. [milhas/h].

$L$ : Distância crítica entre aeronaves. (Se menor, existe conflito). [milhas].

$w$ : Largura de cada aerovia, as duas são iguais. [milhas].

$\alpha$ : Ângulo menor entre as aerovias na interseção.

A equação 2.7 é uma equação de interferência, que foi deduzida analiticamente, porém, torna-se probabilística em razão da velocidade média e fluxos médios incluídos nela.

Daqui por diante, sempre que se referir ao fluxo de tráfego, este se entenderá como fluxo de tráfego aéreo para SAACs. Se requerer, outro tipo de tráfego será especificado explicitamente.

### **CAPÍTULO 3**

## **ESTABELECIMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DO FLUXO DE TRÁFEGO AÉREO**

Devido às características gerais dos SAACs, assinaladas anteriormente, seu fluxo de tráfego apresentará as, assim chamadas, *propriedades intrínsecas*. Elas, muitas das vezes são iguais, similares ou equivalentes às propriedades do fluxo de tráfego de aeronaves tripuladas, como por exemplo, a necessidade que os aviões têm de manter uma velocidade mínima de voo, em razão do princípio de sustentação no ar. Porém, existem outras características que são exclusivas da operação de aeronaves automatizadas, como o controle autônomo, ou bem, são substancialmente diferentes do sistema convencional, como a o controle automático de prevenção de colisões no ar. A seguir, enumera-se as propriedades intrínsecas ao tráfego de aeronaves não tripuladas, apresentadas como um conjunto de paradigmas, que servirão de base para a construção da sua teoria de fluxo de tráfego.

### **3.1 PROPRIEDADES INTRÍNSECAS**

Em virtude das características das aeronaves não tripuladas, e dos sistemas automatizados de controle usados junto a elas, pode-se expressar um conjunto de características intrínsecas que seriam comuns em um SAAC, seja qualquer a forma de conceber e desenvolver o seu projeto. Eis, em continuação, essas propriedades:

1. Todas as aeronaves possuem um sistema de controle autônomo que produz as mesmas reações em tempos de resposta essencialmente iguais, diante de situações similares.
  
2. O sistema de controle a bordo de cada aeronave autônoma realizará sempre procedimentos de emergência padronizados, como resposta a situações de risco de vidas humanas, ou de propriedades e bens, incluindo a própria aeronave.

3. As aerovias dispostas para o deslocamento de aeronaves automatizadas contam com um serviço de informação automático, que fornece informação da posição geográfica dos limites da aerovia, os parâmetros mínimos e máximos permitidos no seu interior, e a presença de aeronaves, obstáculos ou situações particulares em cada segmento.
4. O espaço em que um fluxo de veículos aéreos se desloca, considera-se isomorfo e contínuo, e seu sistema de coordenadas será ortogonal e com o eixo z sempre perpendicular à superfície terrestre.
5. A massa de uma aeronave será a quantidade de matéria que se movimenta com ela no instante em que é observada. A matéria da aeronave muda com o tempo em virtude do consumo de combustível, principalmente, e do acréscimo de gelo ou outros materiais externos que possam se depositar durante o voo.
6. A densidade de aeronaves, entendida como a quantidade de aeronaves em uma unidade de volume, pode sofrer variações, isto é, trata-se de um fluxo compressível.
7. Todas as aeronaves presentes em uma aerovia se deslocam uma atrás da outra, (em fluxo unifilar) a uma velocidade igual, altitude igual e rumo igual, dentro de uma margem de erro inferior ao padrão estabelecido para a aerovia em particular.
8. As aeronaves em movimento, no interior de uma aerovia, não podem reduzir sua velocidade abaixo de um valor determinado para cada aerovia e tipo de aeronave, chamado de velocidade de perda, representado pelo símbolo  $v_p$ .
9. A velocidade das aeronaves no interior da aerovia, ou no interior da rota, sofre variações em virtude da distância transversal entre as aerovias, ou da proximidade dos limites laterais e verticais da aerovia, em consequência de tratar-se de um fluxo viscoso.
10. Quando acontecer perturbações no interior da aerovia, estas causarão mudanças bruscas nas trajetórias individuais das aeronaves, isto é, propiciam

fluxo turbulento. Pelo contrário, a ausência de perturbações permite mudanças moderadas dos valores e direções das velocidade individuais das aeronaves, isto é, permite um fluxo laminar.

## 3.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS E PRESSUPOSTOS

Supõe-se o fluxo de veículos aéreos no interior de uma aerovia, similar ao fluido que escoar dentro de uma tubulação. Esta analogia já foi proposta em diversas abordagens da teoria de fluxo de tráfego terrestre; (HAIGHT, 1963). Dois fatos importantes se derivam de este pressuposto, de uma parte a observância das leis de conservação, e de outra a necessidade de considerar as variações de densidade de fluxo, isto é, a sua compressibilidade. Veículos terrestres se deslocam em duas dimensões, sendo que a teoria de fluxo de tráfego, neste caso, considera somente seu movimento linear. Os veículos aéreos o fazem em três dimensões, sendo passível considerar também o caso especial de deslocamento em uma dimensão, como é o caso de uma aerovia simples; esta similaridade entre veículos aéreos e terrestres permite, a princípio, usar o conceito de fluido assim exposto, para o estudo do tráfego aéreo de veículos não tripulados.

### 3.2.1 As Leis de Conservação

Com o propósito de considerar o primeiro dos fatos mencionados no item anterior, o das leis de conservação, apresenta-se a seguir, o enunciado destas leis:

Lei de conservação da matéria:

$$\sum_{i=1}^n M_{INICIO} - \sum_{i=1}^n M_{FIM} = 0, \text{ (Eq. 3.1)}$$

A massa total que passar por um *ponto de medição*, no interior de um espaço confinado, será sempre igual à massa que passar por outro *ponto* do mesmo sistema. Isto quer dizer que não há criação ou destruição de massa dentro do sistema em estudo. Note-se que está se tomando a definição da mecânica clássica, desconsiderando a abordagem relativista e os efeitos quânticos, toda vez que a



aplicação que interessa neste trabalho é em baixas velocidades. (velocidades muito inferiores à velocidade da luz).

Lei de conservação da energia:

$$\sum_{i=1}^n K_i + \sum_{i=1}^n U_i + \sum_{i=1}^n W_i + \sum_{i=1}^n L_i = Constante, \text{ (Eq. 3.2)}$$

A energia total de um sistema não se destrói nem se cria. A energia no interior do sistema permanece constante, porém, algum tipo de energia pode se transformar em outro. Na equação 3.2 o somatório das energias cinética ( $K$ ), potencial ( $U$ ), trabalho realizado pelo sistema (ou no sistema) ( $W$ ) e a energia de perdas ( $L$ ) e sempre igual a um valor constante<sup>2</sup>.

Lei de conservação do impulso:

$$\sum_{i=1}^n P_i = Constante, \text{ (Eq. 3.3)}$$

Com:  $P_i$ : Impulso ou quantidade de movimento da massa  $i$ -ésima. [N.s].

Esta lei estabelece que em um sistema de partículas, sua interação não afeta a quantidade de movimento (ou impulso) total do sistema, ainda que as quantidades individuais possam se redistribuir.

Resulta conveniente lembrar que o impulso  $P$  é igual ao produto da massa pela velocidade, por tanto suas unidades podem ser N.s (Newton-segundo) ou Kg.m/s (quilogramas-metro/segundo).

---

<sup>2</sup> Dado que os sistemas de transporte de carga considerados aqui se deslocam a velocidades não relativistas, se levam em conta somente as consequências da mecânica clássica ou mecânica newtoniana, desprezando a conversão de matéria em energia e outros efeitos relativistas e quânticos.

### 3.2.2 Compressibilidade do fluxo de tráfego

Os fluidos (e fluxos) compressíveis apresentam mudanças de densidade no tempo e no espaço:

$$\rho \propto (t, x, y, z), \text{ (Eq. 3.4)}$$

Usar-se-á frequentemente a expressão *ponto no espaço*, referindo-se ao interior de uma aerovia ou de uma corrente de tráfego aéreo. Deve-se entender por *ponto no espaço*, o lugar especificado com coordenadas espaciais onde se realiza uma medição ou cálculo. Doravante, quando se falar de uma distribuição de elementos homogêneos dentro de uma área ou dentro de um espaço, o termo *ponto* se referirá ao centro geométrico do espaço ou da área, especificado em três dimensões. Se for o caso de uma distribuição de elementos heterogêneos, o ponto será o centro de massas (ou centro de gravidade) da distribuição.

## CAPÍTULO 4

### DEFINIÇÃO DE VARIÁVEIS RELEVANTES NO ESTUDO DAS CORRENTES DE FLUXO DE TRÁFEGO

As variáveis, fluxo, concentração e velocidade, quando tratadas no tráfego terrestre de veículos, são abordadas essencialmente de forma probabilística, (WARDROP, 1952), o que não é óbice para a abordagem que compete neste trabalho, fundamentalmente determinística. É provável que partindo de quaisquer destas aproximações possa se chegar indistintamente a resultados de índole determinística ou probabilística. Os estudos probabilísticos frequentemente coincidem em assinalar estas variáveis como não uniformes, o que vem a equivaler a dependência do espaço e no tempo, na concepção determinística.

Em particular para o transporte aéreo, desdobrado no espaço, julga-se importante estudar algumas variáveis, não somente em uma e duas dimensões, mais também em três dimensões, como a densidade e a concentração. Inicialmente, define-se os termos e conceitos referentes ao meio em que o fluxo de tráfego aéreo se desenvolve, isto é, as aerovias.

#### 4.1 TOPOLOGIA DAS AEROVIAS

Na figura 9 se mostra a topologia geral de uma aerovia: o fluxo é unidirecional, na direção de eixo  $x$ , e só uma linha de veículos se desloca por cada aerovia. Chamar-se-á de *aerovia simples* a esta disposição. A aerovia simples, acrescentada de vias de entrada e saída, (chamadas de *acessos*), e de *interseções* constitui uma *aerovia complexa*. Para a obtenção de diferentes direções e altitudes deve se acrescentar aerovias no espaço, para construir uma *rota*.

O fluxo no sentido do eixo  $y$  significa entrada ou saída da aerovia e no sentido do eixo  $z$  significa ascensão ou descida a outra aerovia. O marco de referência mostrado na figura 9 não está definido com respeito aos pontos cardinais; isto quer dizer que o eixo  $x$  pode estar indistintamente orientado a qualquer *rumo*.

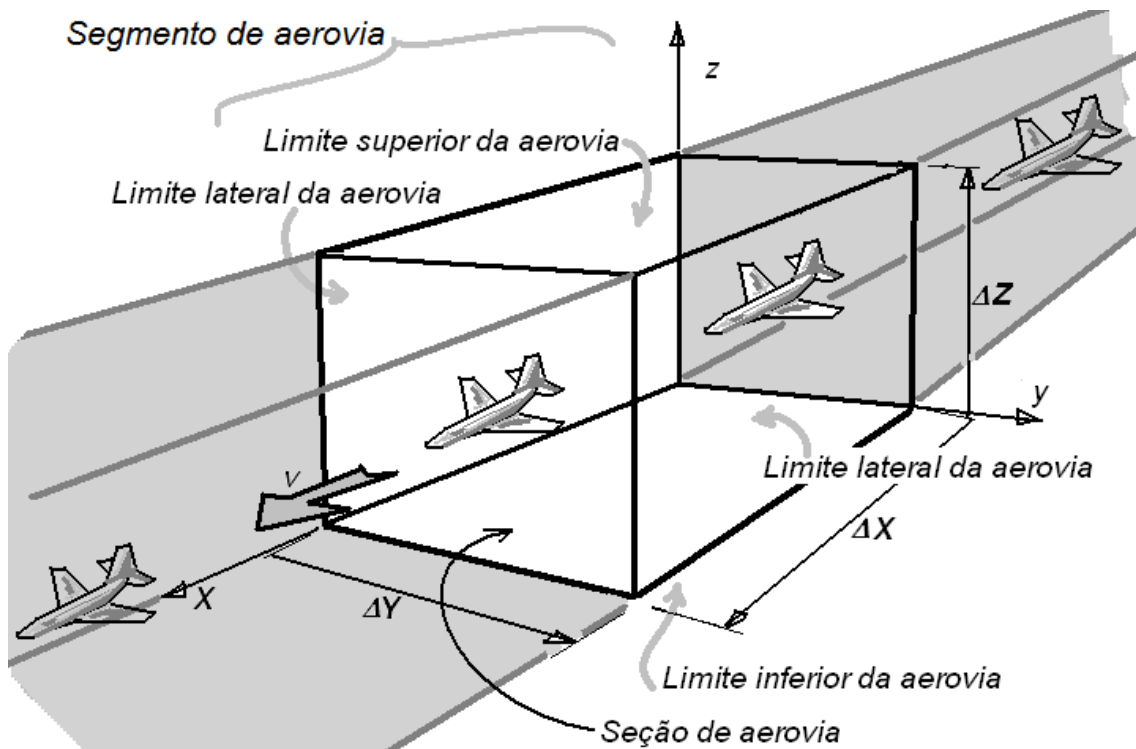


Figura 9. Topologia geral da aerovia.

(Fonte: O autor).

Define-se o rumo como o valor em graus sexagesimais, do ângulo que a proa da aeronave (ou o eixo longitudinal da aerovia) forma com respeito ao norte geográfico, medido no sentido horário. Neste caso se trata do *rumo geográfico*  $R_G$ , referido como *rumo verdadeiro* ou simplesmente *rumo*. Entretanto, é possível medir o *rumo magnético*  $R_M$ , usando como referência o norte geográfico do planeta Terra. Os dois, rumo geográfico e rumo magnético se relacionam através da declinação magnética  $\beta_{mij}$ , valor este que é variável no tempo e na localização geográfica, passível de ser obtido nas cartas de navegação aérea ou em mapas topográficos. A relação entre rumo verdadeiro e rumo magnético se expressa com a seguinte relação:

$$\beta_{mij} = R_G - R_M, \text{ (Eq. 4.1)}$$

- Com:  $\beta_{mij}$ : Ângulo de declinação magnética no ponto de coordenadas (i,j).  
 $R_G$ : Rumo geográfico da aeronave ou da aerovia, [graus].  
 $R_M$ : Rumo magnético da aeronave ou da aerovia, [graus].

Note-se que o ângulo de declinação magnética resulta positivo quando o norte magnético se localiza à direita (leste) do norte geográfico.

Chamar-se-á de fluxo simples aquele que é unidirecional, a uma altura constante e em uma única fila de aeronaves, sem interseções e sem acessos. Neste caso, os valores diferenciais  $\Delta y$  e  $\Delta z$  representam respectivamente, a largura e altura da aerovia, e o  $\Delta x$  uma amostra pequena de seu comprimento.

É oportuno esclarecer os conceitos de seção e segmento de aerovia, usados com diferentes acepções no contexto do tráfego aéreo. Para os propósitos do presente estudo, considera-se *Seção de Aerovia*, a forma (e a área a ela associada) resultante do corte transversal da aerovia, realizado por um plano imaginário perpendicular ao eixo ( $x$ ) longitudinal de esta. Considerando um sistema de coordenadas cartesianas, são possíveis três seções transversais da aerovia, a saber, na direção  $x$ ,  $y$  e  $z$ , o que é equivalente aos planos  $yz$ ,  $xz$  e  $xy$  respectivamente.

Já o *Segmento de Aerovia* é, no contexto do presente trabalho, a distância compreendida entre uma origem e um destino que completa um *ciclo* decolagem – pouso de uma aeronave, regularmente entre dois aeródromos, ao longo de uma aerovia. O segmento constitui uma unidade de faturamento do transporte ou do rateio de custas e taxas, com dimensões de comprimento. Chamar-se-á de *Período de viagem* (abreviado *Período*) ao intervalo de tempo transcorrido no percurso de dito segmento. O *Ciclo Decolagem – Pouso*, pode-se chamar abreviadamente *Ciclo*.

Duas ou mais aerovias podem ser paralelas ou *isodirecionais* (têm o mesmo rumo ou direção). Se duas aerovias são paralelas e têm o mesmo rumo, neste trabalho, diz-se que são *Aerovias Adjacentes*. As aerovias podem ser parcial ou completamente adjacentes, quando é só um segmento delas que é paralelo e tem a mesma direção (rumo), ou o comprimento todo das aerovias, respectivamente.

## 4.2 VELOCIDADES

Três tipos de velocidades são importantes no fluxo de tráfego aéreo:

1. Velocidade média individual de uma aeronave.

2. Velocidade instantânea individual de uma aeronave.
3. Velocidade média de um grupo de aeronaves, ou velocidade de grupo.
4. Velocidade de frente de onda, a velocidade com que uma interação se propaga através do fluxo.

Pode-se estabelecer a *velocidade média individual*  $v_i$  de uma aeronave  $i$  em particular, através da medição do tempo  $\Delta t$  em que um comprimento conhecido  $\Delta x$  é percorrido. Define-se então a *velocidade média individual*,  $\bar{v}_i$  assim:

$$\bar{v}_i = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \text{ (Eq. 4.2)}$$

Define-se *velocidade instantânea individual*,  $v_i$ , a velocidade que uma aeronave tem em um instante dado, da seguinte maneira:

$$v_i = \frac{dx}{dt}, \text{ (Eq. 4.3)}$$

A diferença entre *velocidade média individual* e *velocidade instantânea individual* é que na primeira a medição é ao longo de um trecho considerável, enquanto que na segunda a medição acontece em um intervalo infinitesimal de tempo.

Define-se a *velocidade de grupo* de um conjunto de aeronaves, igual à velocidade média  $v_G$ , como o quociente entre a soma das velocidades instantâneas individuais das aeronaves e o número total delas  $n$ :

$$v_G = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i, \text{ (Eq. 4.4)}$$

A dimensão da velocidade é  $x/t$ , e sua unidade de medida [m/s] ou [km/h].

Chamar-se-á *regime regular* à condição em que as velocidades de todas as aeronaves na aerovia serem iguais, dentro de um valor de tolerância  $\varepsilon_v$ :

$$(v_{MAX} - v_{MIN}) \leq |2 \cdot \varepsilon_v|, \text{ (Eq. 4.5)}$$

### 4.3 MASSA AEROTRANSPORTADA

A *Massa Global Aerotransportada*  $m_T$ , refere-se à matéria que se desloca com as aeronaves. Note-se que esta matéria varia com o tempo e com o espaço, havida conta do consumo de combustível e do contínuo movimento da aeronave. O consumo de combustível representa perda de matéria para a aeronave, pelo combustível gasto e seus produtos emitidos à atmosfera. No cômputo da massa total aerotransportada não se inclui o peso do ar contido nos espaços dentro da aeronave, por ser valor desprezível comparado com o peso total desta. O mesmo acontece com o ar aerotransportado no interior dos motores, o fluxo de gases através do motor implica em certa quantidade deles preenchendo os dutos do motor. Esta massa de gases pode ser calculada com a expressão deduzida no item 4.7.1:

$$m_{GA} = m_N \cdot \frac{(\gamma + \pi)}{(\gamma + 1)}, \text{ (Eq. 4.57)}$$

Que expressa a quantidade de massa de gases aerotransportados  $m_{GA}$ , em kg, em termos da massa de ar normal do motor  $m_N$ , a razão de compressão do motor  $\pi$ , e a razão de derivação  $\gamma$ . Na tabela 3 se mostram os parâmetros de operação do motor CFM56-7B, que equipa algumas das aeronaves Boeing 737, entre outras. Para este motor, obtém-se um valor de massa aerotransportada de gás de ao redor de 34 kg. Ainda se fossem dois motores, este cálculo resulta em uma quantidade ínfima comparada com a massa máxima de despegue do Airbus A380 de 73.500 kg. (AIRBUS, 2009).

No valor da *massa individual aerotransportada*,  $m_{Ai}$ , inclui-se a massa da aeronave vazia,  $m_V$ , a carga útil,  $m_U$ , o combustível,  $m_C$ , e outros fluidos,  $m_H$ :

$$m_{Ai} = m_V + m_H + m_C + m_U, \text{ (Eq. 4.6)}$$

Tabela 3. Parâmetros de operação do motor CFM56-7

PARÂMETRO	Símbolo	VALOR
Densidade do ar, condições normais,	$\rho_0$	1,225 kg/m <sup>3</sup> .
Razão de compressão do motor,	$\pi$	32.8
Razão de derivação do motor,	$\gamma$	5,5
Diâmetro do Ventilador principal	d	1,55 m
Comprimento do motor, desde o difusor de entrada até o escape,	X	2,51m.
Volume total do motor, seções primária + secundária,	$V_T$	4,74 m <sup>3</sup>
Massa de ar normal contida no Volume do motor.	$m_N$	5,8 kg

(Adaptado de CFM, 2009)

As massas da aeronave vazia, dos outros fluídos e carga útil são constantes no tempo e no espaço, (em aeronaves de transporte de carga), porém a massa do combustível é variável.

Suponha-se  $n$  aeronaves se deslocando em uma aerovia, durante um intervalo de tempo dado  $\Delta t$ , como ilustrado na figura 6. Define-se a *Massa Global Aerotransportada*  $m_T$ , se deslocando ao longo de um segmento de aerovia, como o somatório de todas as massas individuais das aeronaves no segmento, com a equação:

$$m_T = \sum_{i=1}^n m_{Ai}, \text{ (Eq. 4.7)}$$

Para cada aerovia em particular se obtém a *Massa Média Individual Aerotransportada*  $m_A$ , ou simplesmente *Massa Média*, que representa o comportamento individual médio da massa transportada pelas  $n$  aeronaves sob estudo, como se todas elas nessa aerovia fossem iguais:

$$m_A = \frac{m_T}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n m_{Ai}, \text{ (Eq. 4.8)}$$



## 4.4 FLUXO

O fluxo é uma variável tanto espacial quanto temporal, o que significa que deve ser medida num ponto específico do espaço (x,y,z) e no instante específico  $t$ . Três variáveis de fluxo podem ser definidas:

1. Fluxo Instantâneo de aeronaves,
2. Fluxo médio de aeronaves ou simplesmente fluxo,
3. Fluxo de massa total aerotransportada ou fluxo de massa.

Define-se *fluxo instantâneo de aeronaves*  $q_i$ , como o quociente entre a variação da quantidade de veículos  $\Delta n$  e o intervalo de tempo  $\Delta t$  em que a amostra se toma:

$$q_i = \frac{\Delta n}{\Delta t}, \text{ (Eq. 4.9)}$$

Ou em forma diferencial:

$$q_i = \frac{dn}{dt}, \text{ (Eq. 4.10)}$$

Já o *fluxo médio*  $q$ , ou simplesmente fluxo, define-se como o quociente entre a variação do número de veículos amostrados  $n$  e o intervalo de tempo  $\Delta t$  em que a amostra se toma:

$$q = \frac{\Delta n}{\Delta t}, \text{ (Eq. 4.11)}$$

Ou em forma diferencial:

$$q = \frac{dn}{dt}, \text{ (Eq. 4.12)}$$

A dimensão para o fluxo de aeronaves, seja instantâneo ou médio, é  $1/t$ , e sua unidade de medida [1/s] ou [1/h].

Já o *fluxo de massa aerotransportada*  $G$  ou fluxo de massa, define-se como a rapidez com que a massa escoa no interior da aerovia, como medido em um ponto e em um instante dado:

$$G = \frac{\Delta m_T}{\Delta t} = \frac{\Delta n \cdot m_A}{\Delta t}, \text{ (Eq. 4.13)}$$

Com:  $G$ : Fluxo de massa no ponto de medição da aerovia, [kg/s].

$\Delta T$ : Intervalo de tempo da medição, [s].

$\Delta m_T$ : Massa global aerotransportada no intervalo de tempo  $\Delta T$ , [kg].

$\Delta n$ : Número de aeronaves que se deslocaram durante a medição, [.]

$m_A$ : Massa média individual aerotransportada, [kg].

Ou em forma diferencial:

$$G = \frac{dm_T}{dt}, \text{ (Eq. 4.14)}$$

Observe-se que o valor  $\Delta n/\Delta t$  da equação 4.13, é igual ao fluxo médio,  $q$ , (equação 4.11), o que permite definir o fluxo de massa também como o produto do fluxo médio  $q$  e a massa média individual aerotransportada,  $m_A$  :

$$G = q \cdot m_A, \text{ (Eq. 4.15)}$$

De acordo com a direção em que o fluxo se observa, este pode ser medido em direção dos eixos  $x$ ,  $y$  ou  $z$ , (isto é, nos planos  $yz$ ,  $xz$  e  $xy$ , respectivamente; vide marco de referência da figura 1), e notado das seguintes formas:

$$G_X = (q \cdot m_A)_X, \text{ (Eq. 4.16)}$$

$$G_Y = (q \cdot m_A)_Y, \text{ (Eq. 4.17)}$$

$$G_Z = (q \cdot m_A)_Z, \text{ (Eq. 4.18)}$$

Note-se que até agora foi definido o fluxo de massa como uma grandeza escalar, sendo que esta variável é passível de ser enunciada em forma vetorial:

$$\mathbf{G} = m_A \cdot (q_X \cdot \hat{i} + q_Y \cdot \hat{j} + q_Z \cdot \hat{k}), \text{ (Eq. 4.19)}$$

$$\mathbf{G} = G_X \cdot \hat{i} + G_Y \cdot \hat{j} + G_Z \cdot \hat{k}, \text{ (Eq. 4.20)}$$

$$\text{Com } G^2 = G_X^2 + G_Y^2 + G_Z^2, \text{ (Eq. 4.21)}$$

#### 4.5 DENSIDADE, CONCENTRAÇÃO E AGRUPAMENTO

As densidades também são variáveis tanto temporais quanto espaciais. Dependem do espaço e do tempo e devem-se medir em um ponto e em um instante determinados.

No estudo do fluxo de tráfego aéreo é conveniente definir três tipos de densidades:

1. Densidade volumétrica, ou simplesmente densidade,
2. Densidade superficial ou concentração,
3. Densidade longitudinal de aeronaves ou Agrupamento.

Define-se *Densidade*  $\rho$ , como a razão entre a quantidade de matéria  $dm_T$  associada às aeronaves presentes em um volume  $dV$  de aerovia, e o valor deste:

$$\rho = \frac{dm_T}{dV}, \text{ (Eq. 4.29)}$$

Com:  $\rho$ : Densidade no ponto de medição, [kg/m<sup>3</sup>].

$dm_T$ : Massa de aeronaves e carga contida no espaço da medição, [kg].

$dV$ : Amostra de volume da aerovia adequada à medição, [m<sup>3</sup>].

As unidades da densidade são kg/m<sup>3</sup> e suas dimensões massa/volume.

Define-se *Concentração*  $k$ , como o quociente entre a massa aerotransportada  $m_T$ , e a área em que esta se distribui:

$$k = \frac{dm_T}{dA}, \text{ (eq. 4.22)}$$

Com:  $k$  : Concentração no ponto da medição, [kg/m<sup>2</sup>].

$dm_T$  : Massa de aeronaves e carga contida na área da medição, [kg].

$dA$  : Amostra de área da aerovia adequada à medição, [m<sup>2</sup>].

De acordo com a direção em que a concentração se observa, esta pode ser medida em direção dos eixos  $x$ ,  $y$  ou  $z$ , (equivalente aos planos  $yz$ ,  $xz$  e  $xy$ , respectivamente; vide marco de referência da figura 1), e notado das seguintes formas:

$$k_x = \frac{dm_T}{dy \cdot dz}, \text{ (eq. 4.23)}$$

$$k_y = \frac{dm_T}{dx \cdot dz}, \text{ (eq. 4.24)}$$

$$k_z = \frac{dm_T}{dx \cdot dy}, \text{ (eq. 4.25)}$$

No caso da aerovia simples, é possível substituir os diferenciais dos eixos  $y$  e  $z$ , pelas constantes de largura e altura<sup>3</sup> correspondentes da aerovia, como mostrado na figura 1. Assim, as equações de concentração podem ser expressas em forma mais simples:

$$k_x = \frac{dm_T}{b \cdot h}, \text{ (eq. 4.26)}$$

$$k_y = \frac{dm_T}{h \cdot dx}, \text{ (eq. 4.27)}$$

$$k_z = \frac{dm_T}{b \cdot dx}, \text{ (eq. 4.28)}$$

Com:  $k_i$  : Concentração observada desde a direção do eixo  $i$ , [kg/m<sup>2</sup>].

$dm_T$  : Massa de aeronaves e carga contida na área da medição, [kg].

---

<sup>3</sup> Note-se a diferença entre altura e altitude da aerovia: a primeira se refere ao valor do espaço entre o limite superior e inferior da aerovia. Já o segundo é a distância entre um nível de referência, por exemplo o nível médio do mar, e o eixo longitudinal (eixo  $x$ ) da aerovia.

- $b$  : Largura da aerovia simples no ponto da medição, [m].
- $h$  : Altura da aerovia simples no ponto da medição, [m].
- $dx$  : Amostra de comprimento de aerovia simples adequada à medição, [m].

A dimensão da concentração é massa/área e suas unidades são [kg/m<sup>2</sup>].

Observe-se que a concentração e a densidade se relacionam, toda vez que a área e o volume de um segmento de aerovia estão atrelados. No item 4.8.3 se faz a demonstração da equação 4.93 que relaciona a densidade às concentrações:

$$\rho = \sqrt[3]{\frac{k_x \cdot k_y \cdot k_z}{dV}}, \text{ (Eq. 4.93)}$$

Define-se *Agrupamento*  $r$ , como o número de aeronaves presentes por cada unidade de comprimento da aerovia:

$$r = \frac{\Delta n}{\Delta x}, \text{ (eq. 4.30)}$$

De acordo com a direção em que o agrupamento se observa, este pode ser medido em direção dos eixos  $x$ ,  $y$  ou  $z$ , (ou nos planos  $yz$ ,  $xz$  e  $xy$ , respectivamente; vide marco de referência da figura 1), e notado das seguintes formas:

$$r_x = \frac{dn}{dx}, \text{ (eq. 4.31)}$$

$$r_y = \frac{dn}{dy}, \text{ (eq. 4.32)}$$

$$r_z = \frac{dn}{dz}, \text{ (eq. 4.33)}$$

No caso da aerovia simples, é possível substituir os diferenciais dos eixos  $y$  e  $z$ , pelas constantes de largura e altura correspondentes da aerovia, e expressar as grandezas  $n$  e  $x$  em forma discreta. Assim, as equações de agrupamento podem ser expressas em forma mais simples:

$$r_x = \frac{\Delta n}{\Delta x}, \text{ (eq. 4.34)}$$

$$r_y = \frac{n}{b}, \text{ (eq. 4.35)}$$

$$r_z = \frac{n}{h}, \text{ (eq. 4.36)}$$

Entretanto, na aerovia simples é de interesse principalmente o agrupamento medido ao longo do eixo de deslocamento das aeronaves, o eixo  $x$ , expresso nas equações 4.31 e 4.34. A dimensão do agrupamento é  $\text{área}^{-1}$  e suas unidades são [aeronaves/m].

#### 4.6 ESPAÇAMENTO, INTERVALO E OCUPAÇÃO

O *espaçamento* é a distância entre duas aeronaves sucessivas na aerovia. Dois tipos de espaçamento são importantes no estudo do fluxo de tráfego aéreo automatizado:

1. Espaçamento instantâneo.
2. Espaçamento Médio, ou simplesmente espaçamento.

Define-se *Espaçamento Instantâneo*  $S_i$ , como a distância em linha reta entre duas aeronaves sucessivas, medido no instante determinado  $t_i$ . Assim, as aeronaves  $i-1$  e  $i$  apresentam o espaçamento instantâneo  $S_i$ , igual à diferença de suas respectivas posições na aerovia,  $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$  e  $(x_i, y_i, z_i)$  :

$$S_i = |(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}) - (x_i, y_i, z_i)|, \text{ (Eq. 4.37)}$$

Ou:

$$S_i = \sqrt{(x_{i-1} - x_i)^2 + (y_{i-1} - y_i)^2 + (z_{i-1} - z_i)^2}, \text{ (Eq. 4.38)}$$

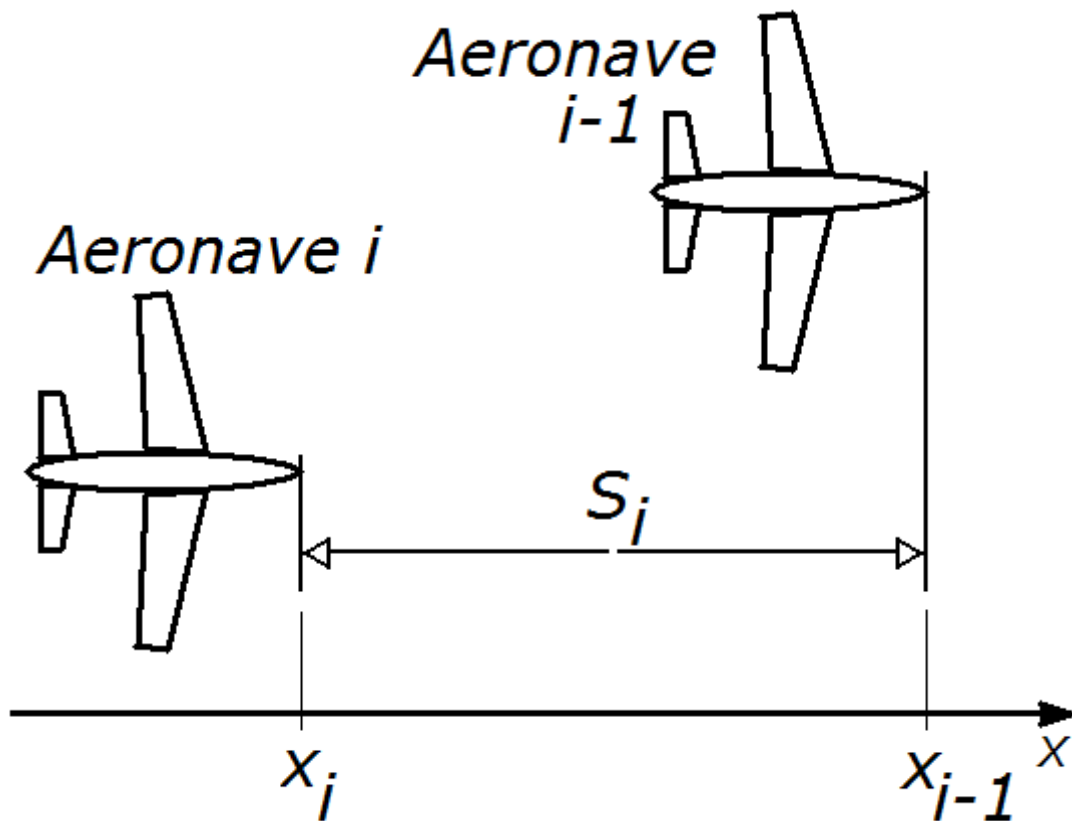


Figura 10. Espaçamento entre duas aeronaves sucessivas.

(Fonte: O autor).

A figura 10 ilustra o quadro de referência usado para a definição do espaçamento. Note-se que o espaçamento é uma quantidade relativamente pequena, frente ao longo comprimento da aerovia simples; por este motivo pode se desprezar as mudanças de comprimento dos eixos  $y$  e  $z$ . Assim, a equação 4.38 se pode aproximar a:

$$S_i = (x_{i-1} - x_i), \text{ (Eq. 4.39) (aproximadamente)}$$

Para a aerovia simples. A dimensão do *espaçamento* é comprimento e suas unidades [m]. Observe-se que, em um grupo de  $n$  aeronaves se deslocando na aerovia, só é possível determinar o espaçamento de  $n-1$  aeronaves, já que, idealmente, a primeira delas não tem mais outra na sua frente para servir de referência. Contudo, nos sistemas reais em que o fluxo seja intenso e contínuo a medição pode ser ajustada a medir todos os espaçamentos.

Define-se Espaçamento médio, ou simplesmente *Espaçamento S*, como média dos espaçamentos individuais das  $n-1$  aeronaves, dentre  $n$  presentes no trecho de aerovia em estudo:

$$S = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=2}^n S_i, \text{ (Eq. 4.40)}$$

A dimensão do *espaçamento* é comprimento e suas unidades [m].

Já *intervalo I* se define como o tempo necessário para uma aeronave percorrer o espaçamento  $S$ , quando se deslocar à velocidade de grupo  $v_G$ :

$$I = \frac{S}{v_G}, \text{ (Eq. 4.41)}$$

A dimensão do *intervalo* é tempo e suas unidades [s].

A *ocupação* é uma variável temporal e também espacial, já que depende do tempo e do espaço e se mede em um ponto e em um instante determinados. A ocupação é a fração de tempo que as aeronaves ocupam a aerovia.

Suponha-se a existência de um detector em um ponto da aerovia, para medir o tempo que cada aeronave tarda em passar, durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ . Se o detector de aeronaves tem um comprimento desprezível, comparado com o comprimento  $L_i$  da aeronave, e  $v_i$  é a velocidade instantânea dela, então se define o *tempo de ocupação individual*  $t_i$ , de cada aeronave, como o quociente entre o comprimento da aeronave e sua velocidade instantânea:

$$t_i = \frac{L_i}{v_i}, \text{ (Eq. 4.42)}$$

De forma que o somatório das contribuições de tempo individuais, das  $n$  aeronaves que passaram no intervalo  $\Delta t$ , dividido pelo tempo da medição  $\Delta t$ , fornecerá a medida da *ocupação H*, da aerovia:



$$H = \frac{1}{\Delta t} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{v_i}, \text{ (Eq. 4.43)}$$

- Com:  $H$ : Ocupação da aerovia no ponto de medição, [·].  
 $\Delta t$ : Intervalo de tempo da medição, [s].  
 $L_i$ : Comprimento da aeronave  $i$ , [m].  
 $n$ : Número de aeronaves que se deslocaram durante a medição, [·].  
 $v_i$ : Velocidade individual da aeronave  $i$ , [m/s].

Note-se que a ocupação é uma grandeza adimensional.

## 4.7 MARGENS DE SEGURANÇA

As margens de segurança determinam limites dentro dos quais se considera operação segura do sistema de transporte. Estas formam parte do *Conjunto de Parâmetros de operação* do SAAC, e são entradas fundamentais no sistema informático de controle do sistema. Três tipos de margens de segurança são propostos aqui para o estudo do fluxo de tráfego aéreo automatizado:

1. Aceleração máxima permitida a cada aeronave na aerovia ou simplesmente Aceleração Máxima.
2. Margem de segurança de velocidades na ultrapassagem, ou simplesmente Margem de Velocidades.
3. Espaçamento de segurança.

Define-se a *Aceleração Máxima*  $a_{i,MAX}$ , como o valor máximo de aceleração que lhe é permitido imprimir a um tipo de aeronave sem ultrapassar os limites de segurança da aerovia. Esta grandeza se baseia numa variável própria do projeto e fabricação do tipo de aeronave em questão, o *fator de carga*  $f_C$ . Este, de uso frequente na aeronáutica, encontra-se definido em termos aerodinâmicos, com a equação seguinte, (Mc KORNICK, 1979):

$$f_C = \frac{F_S}{F_P}, \text{ (Eq. 4.44)}$$

Com:

- $f_c$ : Fator de carga da aeronave [.]
- $F_S$ : Força de sustentação no instante da medição, [N].
- $F_P$ : Peso da aeronave no instante da medição, [N].

O *Fator de Carga*  $f_c$  expressa o esforço máximo que a aeronave suporta em razão da robustez de sua estrutura. Observe-se que este fator está definido somente com as forças que incidem verticalmente na aeronave, mas são aplicáveis para esforços longitudinais já que se trata de valores limite. Uma aeronave não tripulada, usada para transporte de carga poderia ter um fator de carga no intervalo 1,5~3,0, mais deveria se levar em conta o tipo de carga transportada a fim de não expô-la a forças excessivas que poderiam danificá-la. O *Fator de Carga*  $f_c$  é adimensional porque é a razão de duas forças, ainda que frequentemente se expressa em unidades g, de forma similar à aceleração da gravidade, para indicar que um observador que viajar a bordo da aeronave experimentaria uma aceleração  $f_c$  vezes a aceleração gravitacional. Assim, é possível expressar a aceleração máxima permitida para cada aeronave na aviação da seguinte forma:

$$a_{i,MAX} = g \cdot f_c, \text{ (Eq. 4.45)}$$

Com:

- $a_{i,MAX}$ : Aceleração máxima permitida à aeronave  $i$ , [m/s<sup>2</sup>].
- $f_c$ : Fator de carga da aeronave, no intervalo 1,5~3,0 [.]
- $g$ : Aceleração da gravidade na superfície terrestre, igual a 9,8 m/s<sup>2</sup>.

Por outra parte, existe também o *Fator de Carga*  $C_c$ , na Engenharia de Transportes (RATHI et al, 2005), definido como a quantidade ocupada da capacidade disponível de um sistema de transporte. Este é uma medida da utilização do sistema. Geralmente o *Fator de Carga*  $C_c$  se refere a sistemas de transporte de passageiros, chamado às vezes *Fator de Carga de Passageiros*. Esta grandeza, que não tem aplicação no presente trabalho, é definida com a equação:

$$C_c = \frac{(\# \text{ Assentos} \cdot \text{ Distância})_{USADO}}{(\# \text{ Assentos} \cdot \text{ Distância})_{DISPONÍVEL}}, \text{ (Eq. 4.46)}$$

Define-se a *Margem de Velocidades*  $m_s$ , como a menor razão de velocidades possível de uma aeronave que pretende realizar uma ultrapassagem em relação a outra. que se desloca a uma velocidade menor:

$$m_s \geq \frac{v_i}{v_{i-1}}, \text{ (Eq. 4.47)}$$

Com:

- $m_s$ : Margem de velocidades para ultrapassagem na aerovia, [.]
- $v_i$ : Velocidade da aeronave que realiza a ultrapassagem, [m/s].
- $v_{i-1}$ : Velocidade da aeronave que é ultrapassada, [m/s].
- $g$ : Aceleração da gravidade na superfície terrestre, igual a 9,8 m/s<sup>2</sup>.

Para manter o tráfego dentro de condições de segurança, esta relação de velocidades deve se manter dentro de um valor limite, por exemplo,  $m_s = 1,15$  indica que a aeronave mais rápida se desloca a uma velocidade 15% maior do que a mais lenta, no momento da ultrapassagem. Entretanto, para que a ultrapassagem seja possível, o valor da *Margem de Velocidades* deve ser maior que a unidade. Assim:

$$m_s > 1,0, \text{ (Eq. 4.48)} \quad \wedge \quad v_i > v_{i-1}, \text{ (Eq. 4.49)}$$

De outra parte, a *Margem de Segurança* é uma constante atribuída arbitrariamente à aerovia ou a um setor da aerovia, e não prioriza sobre as velocidades de perda. No caso da velocidade da aeronave precedente for zero, a margem de segurança não aplica.

O *Espaçamento de Segurança*  $S_s$  se define como a distância mínima que duas aeronaves sucessivas, que se deslocam no mesmo rumo, podem manter para permanecer em condições de segurança. Para realizar uma ultrapassagem, a aeronave mais rápida se afastará (por exemplo horizontalmente) da linha de voo da mais lenta antes que a separação entre as duas seja igual ou menor que o *Espaçamento de Segurança*  $S_s$ .

O autor propõe a seguinte expressão para calcular o *Espaçamento de Segurança*  $s_s$  para as aeronaves não tripuladas de um SAAC:

$$S_S = L_{MAX} \cdot [1 + \sqrt[3]{[b]} (1 - e^{-v/v_{UAV}})] , \text{ (Eq. 4.50)}$$

Com:

$S_S$ : Espaçamento de segurança na aerovia, [m].

$L_{MAX}$ : Comprimento máximo dentre as aeronaves presentes na aerovia, [m].

$v$ : Velocidade da aeronave que realiza a ultrapassagem, [m/s].

$[b]$ : Norma da largura da aerovia em metros, [.]

$v_{UAV}$ : Constante relativa à velocidade de resposta dos UAVs, [m/s].

Esta equação garante que o espaçamento de segurança não seja menor que um comprimento máximo  $L_{MAX}$  de aeronave, ao mesmo tempo que permanece praticamente constante para velocidades acima de 150 m/s, como mostrado na figura 8. Caso o sistema de controle precise, ou a envergadura das aeronaves seja muito grande, pode-se ajustar a constante  $v_{UAV}$  na equação 4.50 para adequar a curva.

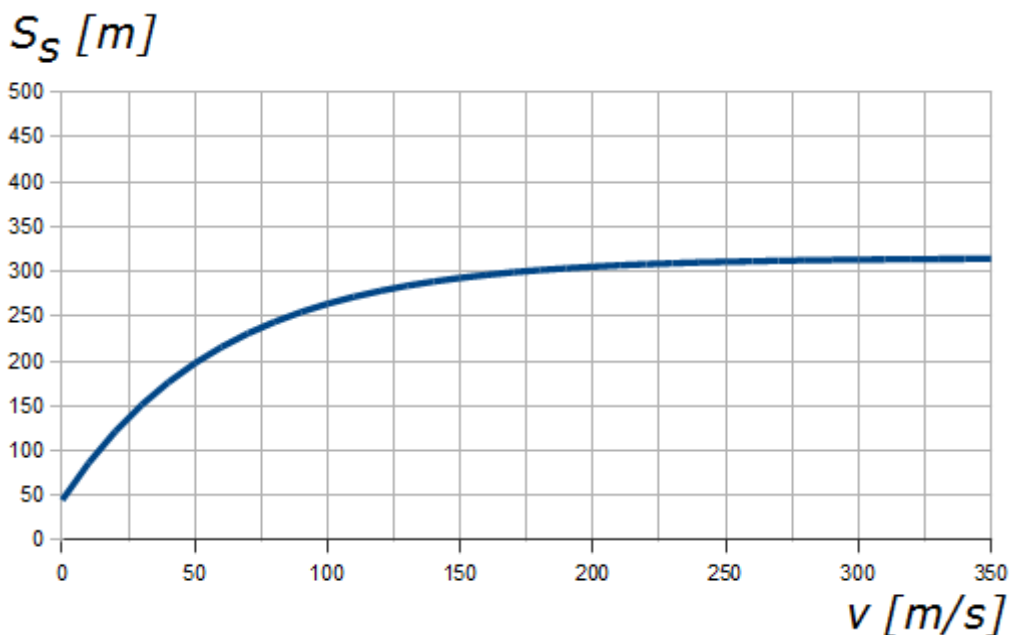


Figura 11. Comportamento do Espaçamento de Segurança com respeito à velocidade.  
(Fonte: O autor).

A curva da figura 11 foi traçada com uma largura de aerovia de 216 metros e velocidade de reação do sistema de controle de voo dos ANTs de 60 m/s, valores ambos sugeridos como típicos de um SAAC. A equação 4.50 foi deduzida pelo autor com a ajuda de regressão composta aplicada a dados de voo de aviões não tripulados experimentais coletados por projetistas dos mesmos. Estes dados não estão disponíveis para serem divulgados.

## 4.8 DEDUÇÕES E DEMONSTRAÇÕES NO ESTUDO DO FLUXO DE TRÁFEGO

Neste item serão feitas algumas demonstrações de equações que foram mencionadas em capítulos anteriores, e que precisam de uma demonstração matemática formal, como a massa de gás aerotransportada em um motor a reação, a equivalência entre densidade e concentrações e o fluxo em termos da velocidade média.

### 4.8.1 Determinação da massa de gás aerotransportada em um turboventilador

A seguir se expõe uma dedução da expressão para o cálculo da massa de ar, que transporta um turboventilador em operação, em um instante dado.

Considere-se inicialmente a relação entre a massa de ar normal,  $m_N$ , transportada em um instante dado, sua densidade (normal)  $\rho_0$  e o volume por essa ocupado,  $V_T$ :

$$m_N = \rho_0 \cdot V_T, \text{ (Eq. 4.51)}$$

Esta massa é a quantidade de matéria contida no volume total interno do motor, como se fosse ar a pressão e temperatura normais, chamada de *massa de ar normal* contida no motor. O volume total do motor, neste caso, pode-se aproximar do produto da área transversal do ventilador principal e o comprimento total do motor.

No caso de um turboventilador o fluxo de ar é dividido em dois, o fluxo primário  $m_P$ , que é comprimido  $\pi$  vezes, (a relação de compressão), e o fluxo secundário  $m_S$ , que conserva aproximadamente a densidade do ar externo  $\rho_0$ . A massa total de gás aerotransportada no motor  $m_{GA}$ , em um instante dado, obtém-se da soma das massas primária e secundária:

$$m_{GA} = m_P + m_S, \text{ (Eq. 4.52)}$$

Esta equação aplica para fluxos de matéria, mas também é válida uma expressão equivalente para os volumes:

$$V_T = V_P + V_S, \text{ (Eq. 4.53)}$$

A *Razão de Derivação do Motor*,  $\gamma$ , é o quociente entre os fluxos secundário e primário, em volume:

$$\gamma = \frac{V_S}{V_P}, \text{ (Eq. A-4)} \Rightarrow V_S = \gamma \cdot V_P, \text{ (Eq. 4.54)}$$

Cada um dos fluxos possui uma densidade de gás diferente. Para os propósitos do cálculo que procede aqui, podem-se tomar cada uma das densidades como sendo constantes, assim:

$$\text{Para o fluxo primário: } m_P = \rho_P \cdot V_P, \text{ (Eq. 4.55)}$$

$$\text{Para o fluxo secundário: } m_S = \rho_S \cdot V_S, \text{ (Eq. 4.56)}$$

De forma que a soma dos fluxos, expressa na equação 4.52 se transforma em:

$$m_{GA} = \rho_P \cdot V_P + \rho_S \cdot V_S, \text{ (Eq. 4.57)}$$

O fluxo secundário não é comprimido, então sua densidade permanece igual à densidade normal,  $\rho_0$ , porém, o fluxo primário é comprimido no valor da razão de compressão,  $\pi$ :

$$\rho_P = \pi \cdot \rho_0, \text{ (Eq. 4.58)}$$

$$\rho_S = \rho_0, \text{ (Eq. 4.59)}$$

O que converte a equação 4.57 em:

$$m_{GA} = \pi \cdot \rho_0 \cdot V_P + \rho_0 \cdot V_S, \text{ (Eq. 4.60)}$$

Aplicando a equação 4.54 à 4.60 se obtém:

$$m_{GA} = \rho_0 \cdot V_P \cdot (\pi + \gamma), \text{ (Eq. 4.61)}$$

A partir das equações 4.53 e 4.54 é possível obter outra equação para o volume primário, expresso em termos do volume total, para substituir na equação 4.61:

$$V_P = \frac{V_T}{(\gamma + 1)}, \text{ (Eq. 4.62)}$$

$$\rightarrow m_{GA} = \rho_0 \cdot V_T \cdot \frac{(\gamma + \pi)}{(\gamma + 1)}, \text{ (Eq. 4.63)}$$

Observe-se que o produto da densidade pelo volume, na equação 4.63, é igual à massa de ar normal,  $m_N$ , definida na equação 4.51. Então:

$$m_{GA} = m_N \cdot \frac{(\gamma + \pi)}{(\gamma + 1)}, \text{ (Eq. 4.64)}$$

Com:  $m_{GA}$ : Massa total de gás aerotransportada no motor, [kg].

$m_N$ : Massa de ar normal transportada em um instante dado no motor, [kg].

$\gamma$ : Razão de derivação do motor, [.]

$\pi$ : Razão de compressão do motor, [.]

A equação 4.64 é uma aproximação suficientemente boa da massa de gás presente em um instante dado, no interior do motor CFM56.

#### 4.8.2 Dedução do espaçamento em termos do agrupamento

Começar-se-á por uma análise microscópica: Na figura 12 se mostra um grupo de  $n$  aeronaves voando em uma aerovia. Estas estão como se fotografadas no instante  $t=t_0$ , quando se movimentavam na direção do eixo  $x$ . A primeira colocada recebeu o subscrito  $i=1$ , e as que a seguiram receberam números gradativamente maiores, até a

última delas, a número  $n$ . Pode-se observar que o grupo de aeronaves se espalha ao longo do comprimento  $d_0$  medido desde a aeronave 1 até a  $n$ . Isto significa que o somatório dos  $n-1$  espaçamentos individuais contidos no grupo totalizará o comprimento  $d_0$ :

$$d_0 = \sum_{i=2}^n S_i, \text{ (Eq. 4.65)}$$

Assim, usando a equação 4.40 de definição do espaçamento, pode-se expressar o espaçamento médio  $S$  no interior do grupo de aeronaves como:

$$S = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=2}^n S_i = \frac{1}{n-1} \cdot d_0, \text{ (Eq. 4.40 e 4.66)}$$

O que implica em:

$$S = \frac{d_0}{n-1}, \text{ (Eq. 4.67)}$$

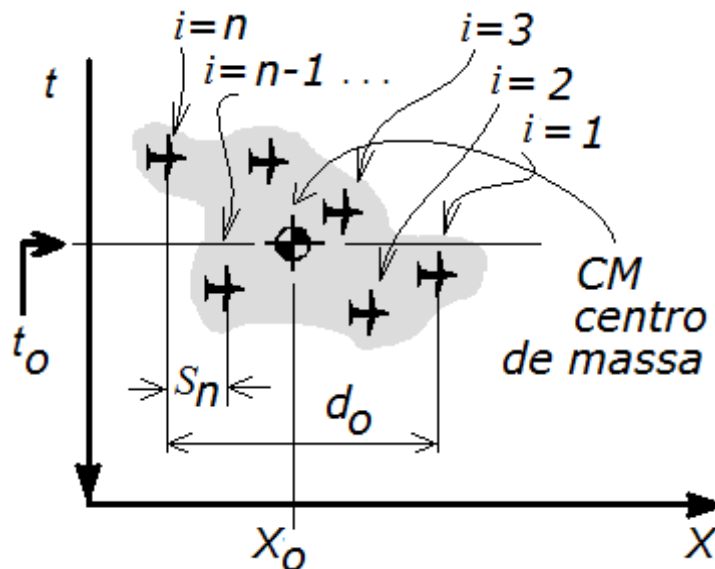


Figura 12. Um grupo de aeronaves, com seu movimento congelado no instante  $t = t_0$ .

(Fonte: O autor).



De outra parte, se tomar-se a equação 4.30, que define o agrupamento  $r$  e aplicar-se a notação da figura 11, obtém-se:

$$r = \frac{\Delta n}{\Delta x}, \text{ (eq. 4.30)} \rightarrow r = \frac{n}{(x_1 - x_n)} = \frac{n}{d_0}, \text{ (eq. 4.68)}$$

E, introduzindo o fator  $(n-1)$  tanto no numerador como no denominador:

$$r = \frac{n}{d_0} \cdot \frac{n-1}{n-1} = \frac{1}{\left[ \frac{d_0}{n-1} \right]} \cdot \frac{n}{n-1}, \text{ (eq. 4.69)}$$

E, usando a equação 4.67:

$$r = \left( \frac{n}{n-1} \right) \cdot \left( \frac{1}{S} \right), \text{ (Eq. 4.70)}$$

Com:  $r$ : Agrupamento de aeronaves ao longo do grupo sob estudo, [1/m].  
 $n$ : Número total de aeronaves no grupo sob estudo, [.]  
 $S$ : Espaçamento no interior do grupo de aeronaves, [m].

Note-se que para grande número de aeronaves o espaçamento  $S$  é o inverso do agrupamento  $r$ , uma vez que a expressão  $n/(n-1)$  se aproxima da unidade. Isto é:

$$r = \frac{1}{S} \leftrightarrow n \gg 1 \text{ (Eq. 4.71)}$$

Na figura 13 se mostra o comportamento do espaçamento em termos do agrupamento, segundo dados gerados na simulação de fluxo de tráfego explicada no capítulo 6.

Observa-se que a curva gerada corresponde ao esperado da equação 4.70.

No caso de uma variação do agrupamento  $\Delta r$ , tem-se que:

$$\Delta r = r_{FIN} - r_{INI}, \text{ (Eq. 4.72)}$$

Então:

$$\Delta r = \left( \frac{n}{n-1} \right) \cdot \left( \frac{1}{S_{FIN}} \right) - \left( \frac{n}{n-1} \right) \cdot \left( \frac{1}{S_{INI}} \right), \text{ (Eq. 4.73)}$$

O que leva a:

$$\Delta r = \left( \frac{n}{n-1} \right) \cdot \left[ \left( \frac{1}{S_{FIN}} \right) - \left( \frac{1}{S_{INI}} \right) \right], \text{ (Eq. 4.74)}$$

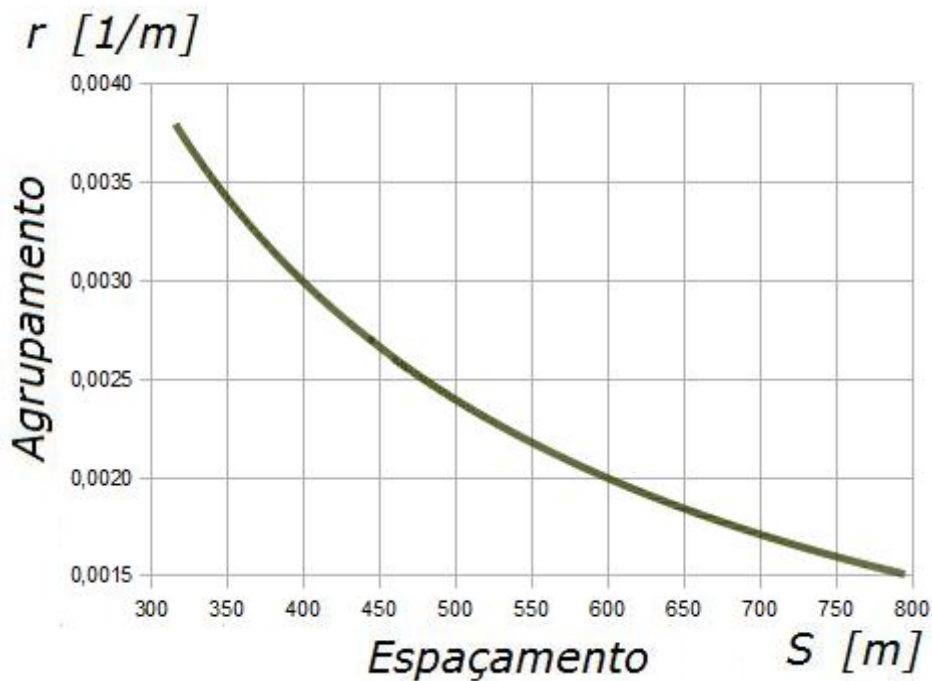


Figura 13. Agrupamento versus Espaçamento numa simulação de tráfego de SAACs.

(Fonte: O autor).

E, se tratar-se de uma grande quantidade de aeronaves  $n$ :

$$\Delta r = \frac{1}{S_{FIN}} - \frac{1}{S_{INI}} \leftrightarrow n \gg \text{ (Eq. 4.75)}$$

No caso de uma variação do espaçamento  $\Delta S$ , tem-se que:

$$\Delta S = S_{FIN} - S_{INI}, \text{ (Eq. 4.76)}$$

Então:

$$\Delta S = \left( \frac{n}{n-1} \right) \cdot \left( \frac{1}{r_{FIN}} \right) - \left( \frac{n}{n-1} \right) \cdot \left( \frac{1}{r_{INI}} \right), \text{ (Eq. 4.77)}$$

O que leva a:

$$\Delta S = \left( \frac{n}{n-1} \right) \cdot \left[ \left( \frac{1}{r_{FIN}} \right) - \left( \frac{1}{r_{INI}} \right) \right], \text{ (Eq. 4.78)}$$

e, por tanto:

$$\Delta S = \frac{1}{r_{FIN}} - \frac{1}{r_{INI}} \leftrightarrow n \gg 1 \text{ (Eq. 4.79)}$$

### 4.8.3 Dedução da densidade em termos das concentrações

As concentrações em cada plano, como definidas no item 4.5 são iguais ao quociente entre a massa total aerotransportada, medida num segmento de área, e o valor de dita área:

$$k_x = \frac{dm_T}{dy \cdot dz}, \text{ (eq. 4.80)}$$

$$k_y = \frac{dm_T}{dx \cdot dz}, \text{ (eq. 4.81)}$$

$$k_z = \frac{dm_T}{dx \cdot dy}, \text{ (eq. 4.82)}$$

Com unidades em  $[\text{kg}/\text{m}^2]$ . Já a *Densidade*  $\rho$ , define-se como a razão entre a quantidade de matéria  $dm$  associada às aeronaves presentes em um volume  $dV$  de aerovia, e o valor deste volume:

$$\rho = \frac{dm_T}{dV}, \text{ (Eq. 4.83)}$$

Com unidades da densidade em  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ . Inicialmente, se multiplicar todas as equações 4.80 a 4.82, obtém-se:

$$k_X \cdot k_Y \cdot k_Z = \frac{dm}{dx \cdot dy} \cdot \frac{dm}{dx \cdot dz} \cdot \frac{dm}{dy \cdot dz}, \text{ (eq. 4.84)}$$

O que produz, considerando a expressão do volume  $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ :

$$k_X \cdot k_Y \cdot k_Z = \frac{dm^3}{(dx \cdot dy \cdot dz)^2} = \frac{dm^3}{dV^2}, \text{ (eq. 4.85)}$$

$$\rightarrow k_X \cdot k_Y \cdot k_Z = dm \cdot \left( \frac{dm}{dV} \right)^2, \text{ (eq. 4.86)}$$

Observe-se que o termo dentro do parêntesis ao quadrado é a densidade, então:

$$k_X \cdot k_Y \cdot k_Z = dm \cdot (\rho)^2, \text{ (eq. 4.87)}$$

Finalmente, colocando em evidência a densidade, obtém-se:

$$\rho = \sqrt[2]{\frac{k_X \cdot k_Y \cdot k_Z}{dm}}, \text{ (Eq. 4.88)}$$

Mas, considerando que a densidade é o quociente da massa pelo volume,  $\rho = \frac{dm}{dV}$

:

$$dm = \rho \cdot dV, \text{ (Eq. 4.89)}$$

Substituindo a equação 4.89 na 4.88, obtém-se:

$$\rho = \sqrt[2]{\frac{k_x \cdot k_y \cdot k_z}{\rho \cdot dV}}, \text{ (Eq. 4.90)}$$

Elevando ao quadrado nos dois termos da equação para eliminar o radical:

$$\rho^2 = \frac{k_x \cdot k_y \cdot k_z}{\rho \cdot dV}, \text{ (Eq. 4.91)}$$

Ou:

$$\rho^3 = \frac{k_x \cdot k_y \cdot k_z}{dV}, \text{ (Eq. 4.92)}$$

O que produz finalmente uma expressão para a densidade em termos das concentrações:

$$\rho = \sqrt[3]{\frac{k_x \cdot k_y \cdot k_z}{dV}}, \text{ (Eq. 4.93)}$$

Com:  $\rho$ : Densidade no ponto de medição, [kg/m<sup>3</sup>].

$K_i$ : Concentração observada desde a direção do eixo  $i$ , [kg/m<sup>2</sup>].

$dV$ : Amostra de volume da aerovia adequada à medição, [m<sup>3</sup>].

#### **4.8.4 Dedução de relações para cálculo numérico, no deslocamento em grupo**

Com o objeto de usar o cálculo numérico no item 6, onde se propõe um modelo matemático, mostra-se na figura 14 o deslocamento de um grupo de aeronaves, igual que uma nuvem, de uma posição inicial, rotulada com o subscrito *INI*, para uma posição final, rotulada com o subscrito *FIN*.

Como estabelecido no item 3.2.2, modelar-se-á o comportamento do grupo de aeronaves como se toda sua massa estivesse concentrada num ponto, no centro de massas do conjunto, abreviado *CM* na figura 14.

Desta forma, o centro de massas do grupo pode ser encontrado com o somatório das distâncias de cada aeronave ao centro de massas:

$$x_{CM} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_{i,INI}, \text{ (Eq. 4.94)}$$

Com:  $x_{CM}$ : Coordenada do centro de massas no eixo *x*, [m].

$n$ : Número de aeronaves no grupo, [.]

$x_{i,INI}$ : Coordenada da aeronave *i*, no instante inicial  $t=INI$ , no eixo *x*, [m].

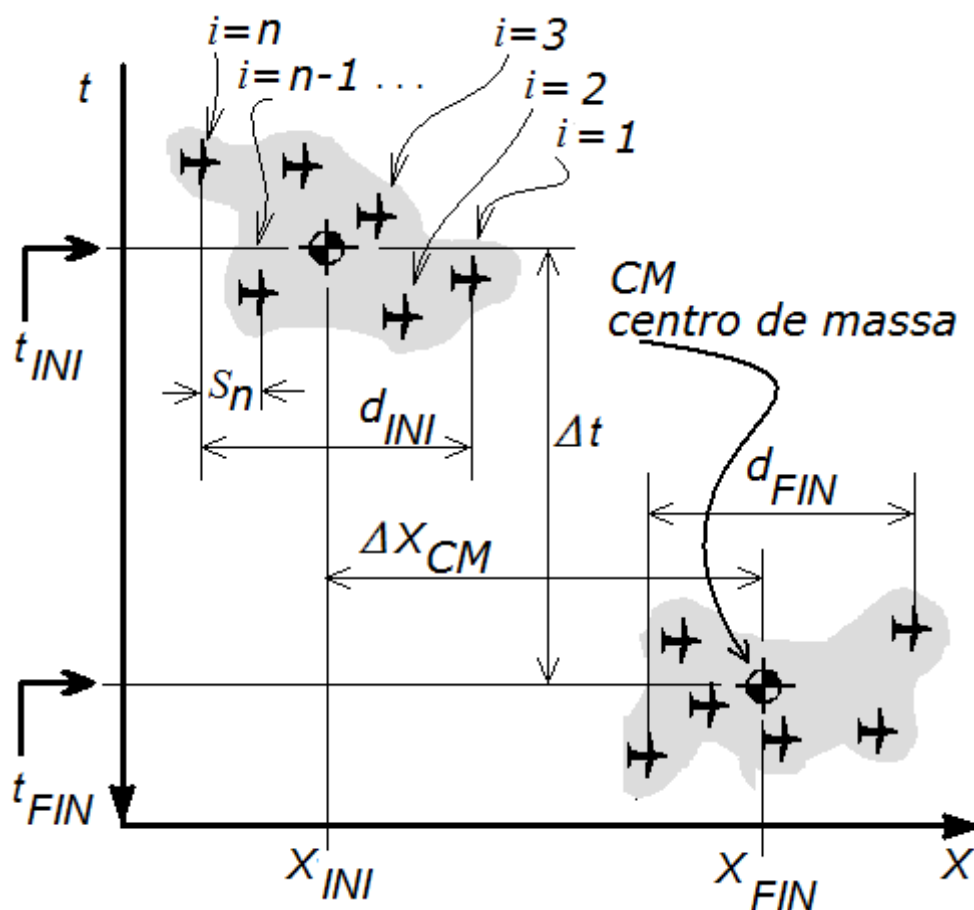


Figura 14. Quadro de referência do estudo da velocidade de um grupo de aeronaves.

(Fonte: O autor).

Observe-se que, em virtude do propriedade intrínseca número sete, (vide item 3.1) a distância de cada aeronave ao centro de massas tem somente componente ao longo do eixo  $x$ , pois as distâncias transversais ou verticais se consideram desprezíveis. As variações na posição das aeronaves e de seu centro de massas podem ser expressas como as diferenças entre as coordenadas dos pontos inicial e final, assim:

$$\Delta x_{CM} = (x_{CM.FIN} - x_{CM.INI}), \text{ (Eq. 4.95)}$$

$$\Delta x_{CM} = \frac{1}{n} \cdot \left( \sum_{i=1}^n x_{i.FIN} - \sum_{i=1}^n x_{i.INI} \right) = \frac{1}{n} \cdot \left( \sum_{i=1}^n \Delta x_i \right), \text{ (Eq. 4.96)}$$

- Com:
- $\Delta x_{CM}$ : Variação da coordenada do centro de massas no eixo  $x$ , [m].
  - $\Delta x_{CM.INI}$ : *Variação da* coordenada do centro de massas, no instante inicial  $t=INI$ , no eixo  $x$ , [m].
  - $\Delta x_{CM.FIN}$ : *Variação da* coordenada do centro de massas, no instante final  $t=FIN$ , no eixo  $x$ , [m].
  - $n$ : Número de aeronaves no grupo, [.]
  - $x_{i.INI}$ : Coordenada da aeronave  $i$ , no instante inicial  $t=INI$ , no eixo  $x$ , [m].
  - $x_{i.FIN}$ : Coordenada da aeronave  $i$ , no instante final  $t=FIN$ , no eixo  $x$ , [m].
  - $\Delta x_i$ : Variação da coordenada da aeronave  $i$ , no eixo  $x$ , durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ . [m].

O grupo de aeronaves se dispersa ao longo de um comprimento  $d$ , em direção do eixo positivo  $x$ . Introduce-se aqui o conceito de *Dispersão do Grupo* representado pelo comprimento  $d$ , correspondente à distância entre a primeira aeronave e a última do grupo, e se definirá com a equação 4.97:

$$d = (x_i - x_n), \text{ (Eq. 4.97)}$$

Pode-se ver que, tanto no instante inicial quanto no final, o espaçamento médio  $S$  de cada aeronave é proporcional à Dispersão do Grupo  $d$  em um fator de  $n-1$  vezes. Isto porque só é possível estabelecer o espaçamento de  $n-1$  aeronaves em um grupo de  $n$ ,

como explicado no item 4.6. Assim, pode-se expressar o espaçamento médio  $S$  como o quociente entre o comprimento  $d$  e o número de aeronaves  $n-1$  contido neste último:

$$S = \frac{d}{(n-1)}, \text{ (Eq. 4.98)}$$

E, da mesma forma, o somatório dos comprimentos individuais  $S_i$  totaliza a dispersão do grupo  $d$ :

$$d = \sum_{i=2}^n S_i, \text{ (Eq. 4.99)}$$

E, usando a definição do espaçamento  $S$ , na equação 4.40, combinado com as equações 4.98 e 4.99, obtém-se:

$$S = \frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=2}^n S_i = \frac{d}{(n-1)}, \text{ (Eq. 4.100)}$$

Ou:

$$S = \frac{(x_1 - x_n)}{(n-1)}, \text{ (Eq. 4.101)}$$

Com:  $S$ : Espaçamento, [m].

$x_1$ : Coordenada da aeronave 1, a primeira do grupo, no eixo x, [m].

$x_n$ : Coordenada da aeronave  $n$ , a última do grupo, no eixo x, [m].

$n$ : Número de aeronaves no grupo, [.]

De outra parte, combinando as equações 4.70 e 4.101 é possível obter-se:

$$r = \left( \frac{n}{n-1} \right) \cdot \left( \frac{1}{S} \right) \rightarrow r = \left( \frac{n}{n-1} \right) \cdot \left( \frac{n-1}{x_1 - x_n} \right) \text{ (Eq. 4.102)}$$

E, eliminando o termo  $(n-1)$  presente no numerador e no denominador:



$$r = \left( \frac{n}{x_1 - x_n} \right) \text{ (Eq. 4.103)}$$

A definição da Dispersão do Grupo, na equação 4,97 permite expressar a equação 4.103 da forma seguinte:

$$r = \frac{n}{d} \text{ (Eq. 4.104)}$$

- Com:  $r$ : Agrupamento, [1/m].  
 $d$ : Dispersão do grupo, [m].  
 $x_1$ : Coordenada da aeronave 1, a primeira do grupo, no eixo x, [m].  
 $x_n$ : Coordenada da aeronave n, a última do grupo, no eixo x, [m].  
 $n$ : Número de aeronaves no grupo, [.]

As equações 4.101, 4.103 e 4.104 constituem-se em importantes ferramentas para o cálculo do espaçamento instantâneo de um grupo de aeronaves, quando usar um sistema digital de cálculo numérico, como seria usual no controle de tráfego aéreo automatizado.

#### 4.8.5 Relação da velocidade de grupo com o fluxo e o agrupamento

De acordo com suas definições, nas equações 4.11 e 4.30, o fluxo e o agrupamento são, respectivamente, a variação do número de aeronaves com o tempo e a variação do número de aeronaves com o espaço, assim:

$$q = \frac{\Delta n}{\Delta t}, \text{ (Eq. 4.11)}$$

$$r = \frac{\Delta n}{\Delta x}, \text{ (eq. 4.30)}$$

Se dividir a primeira equação pela segunda, obtém-se:

$$\frac{q}{r} = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \text{ (Eq. 4.105)}$$

O segundo termo da equação 4.105 é a velocidade de grupo se o intervalo de tempo da medição  $\Delta t$  for o que corresponde ao deslocamento do centro de massa do grupo de aeronaves  $\Delta x_{CM}$ , como ilustrado na figura 9. Assim, pode-se escrever:

$$v_G = \frac{q}{r}, \text{ (Eq. 4.106)}$$

Com:  $v_G$ : Velocidade de grupo, [m/s].  
 $r$ : Agrupamento, [1/m].  
 $q$ : Fluxo médio de aeronaves, [1/s].

Esta equação exige a existência de uma outra relação que defina o comportamento do fluxo ou do agrupamento no tempo ou no espaço. Por exemplo, supondo o agrupamento constante, a relação velocidade-fluxo seria linear. Entretanto, sabe-se que o agrupamento é dependente do fluxo (ou da velocidade) de forma não linear, como analisado no fluxo de veículos terrestres. (WARDROP, 1952). No modelo a ser proposto no capítulo 5 se sugere uma solução a esta equação.

A equação 4.106 é semelhante à conhecida no fluxo de tráfego de veículos terrestres, como equação fundamental do tráfego, em que a velocidade da onda de choque  $v$  se relaciona com o fluxo  $q$  e a concentração  $k$ , da seguinte maneira:

$$v = \frac{q_2 - q_1}{k_2 - k_1}, \text{ (Eq. 4.107)}$$

Com:  $v_i$ : Velocidade da onda de choque, [m/s].  
 $q_i$ : Fluxo de veículos terrestres medido no ponto  $i$ , [1/s].  
 $k_i$ : Concentração de veículos terrestres medida no ponto  $i$ , [1/m].

#### 4.8.6 Dedução da equação do fluxo de massa

Considere-se a definição de fluxo de massa, enunciado na equação 4.14:

$$G = \frac{dm_T}{dt}, \text{ (Eq. 4.14)}$$

No modelo de fluxo contínuo simples transcorre dentro de uma aerovia simples. Assim, o fluxo só acontece na direção de eixo x, então:

$$G = G_x = \frac{dm_T}{dt}, \text{ (Eq. 4.108)}$$

E lembrando que a massa,  $m_T$ , é o produto da densidade,  $\rho$ , pelo volume,  $V$ , expressa em forma integral:

$$m_T = \int \rho \cdot dV, \text{ (Eq. 4.109)}$$

Usar-se-á o fato da variação do volume com respeito ao tempo  $dV/dt$ , ser igual à área  $A$ , vezes a variação do espaço com respeito ao tempo  $dx/dt$ , (a velocidade  $v$ ). Assim, as equações 4.108 e 4.109 conduzem à expressão já conhecida em mecânica dos fluidos e hidráulica para o cálculo de fluxo de massa que passa por uma *tubeira*<sup>4</sup>:

$$G = \rho \cdot v_G \cdot A_{YZ}, \text{ (Eq. 4.110)}$$

A equação 4.110 tem uma grande importância para o cálculo de qualquer tipo de fluxo. Em efeito, como deduzida aqui, esta equação é útil no caso de quaisquer das grandezas densidade, velocidade e área forem constantes ou não, no tempo ou no espaço. Expressando a área da seção transversal da aerovia em termos de seus respectivos valores  $b$  e  $h$ , a equação 4.110 se pode escrever assim:

$$G = \rho \cdot b \cdot h \cdot v_G, \text{ (Eq. 4.111)}$$

---

<sup>4</sup> Tubeira: Na aerodinâmica, trata-se da forma cilíndrica similar a um duto, constituinte de um motor a reação, que realiza a expansão de um gás, aumentando desta forma a velocidade deste último. A tubeira realiza o trabalho oposto do *difusor*.

Com:  $G$ : Fluxo de massa aerotransportada no ponto de medição da aerovia, [kg/s].  
 $\rho$ : Densidade, [kg/m<sup>3</sup>].  
 $b$ , Largura da aerovia, ou dimensão no eixo  $y$ , [m].  
 $h$ : altura da aerovia, ou dimensão no eixo  $z$ , [m].  
 $v_G$ : Velocidade de grupo na aerovia, [m/s].

Lembrando a equação 4.15, que relaciona o fluxo de massa aerotransportada  $G$  com o fluxo médio de aeronaves  $q$ :

$$G = q \cdot m_A, \text{ (Eq. 4.15)}$$

É possível expressar a equação 4.104 em termos do fluxo médio de aeronaves:

$$q \cdot m_A = \rho \cdot b \cdot h \cdot v_G, \text{ (Eq. 4.112)}$$

$$\rightarrow v_G = \frac{q \cdot m_A}{\rho \cdot b \cdot h}, \text{ (Eq. 4.113)}$$

E aproveitando o fato da área transversal da aerovia  $A$ , perpendicular na direção do deslocamento ser igual ao produto da altura  $h$  pela largura  $b$ :

$$v_G = \left( \frac{q}{\rho} \right) \cdot \left( \frac{m_A}{A} \right), \text{ (Eq. 4.114)}$$

Com:  $A$ : Área da aerovia, perpendicular na direção do deslocamento, [m<sup>2</sup>].  
 $v_G$ : Velocidade de grupo na aerovia, [km/h].  
 $m_A$ : Massa média aerotransportada, [kg].  
 $q$ : Fluxo de aeronaves no ponto de medição, [1/s].  
 $\rho$ : Densidade no espaço sob análise, [kg/m<sup>3</sup>].

## CAPÍTULO 5

### DEFINIÇÃO DOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Igual ao que é feito no tráfego terrestre de veículos, (RATHI et al, 2005), são cinco os métodos que podem ser usados na medição das variáveis do fluxo de tráfego aéreo:

1. Medições em um ponto,
2. Medições ao longo de um pequeno trecho,
3. Medições sobre um trecho considerável de aerovia,
4. Medição com um observador móvel a bordo de uma aeronave, e
5. Medições a partir dos dados transmitidos pelas aeronaves e pelo controle do sistema, sobre uma aerovia ou conjunto delas.

Na figura 15 se ilustra o comportamento tempo - comprimento dos quatro primeiros métodos de medição citados acima. O eixo das abcissas representa o tempo decorrido desde o início da medição, e o eixo das ordenadas o percurso de distância, na direção do deslocamento das aeronaves. Cada aeronave deixará um trajeto no tempo e no espaço, representado pelas linhas dentro do plano do gráfico, de forma que o coeficiente de inclinação da linha corresponde à velocidade do veículo.

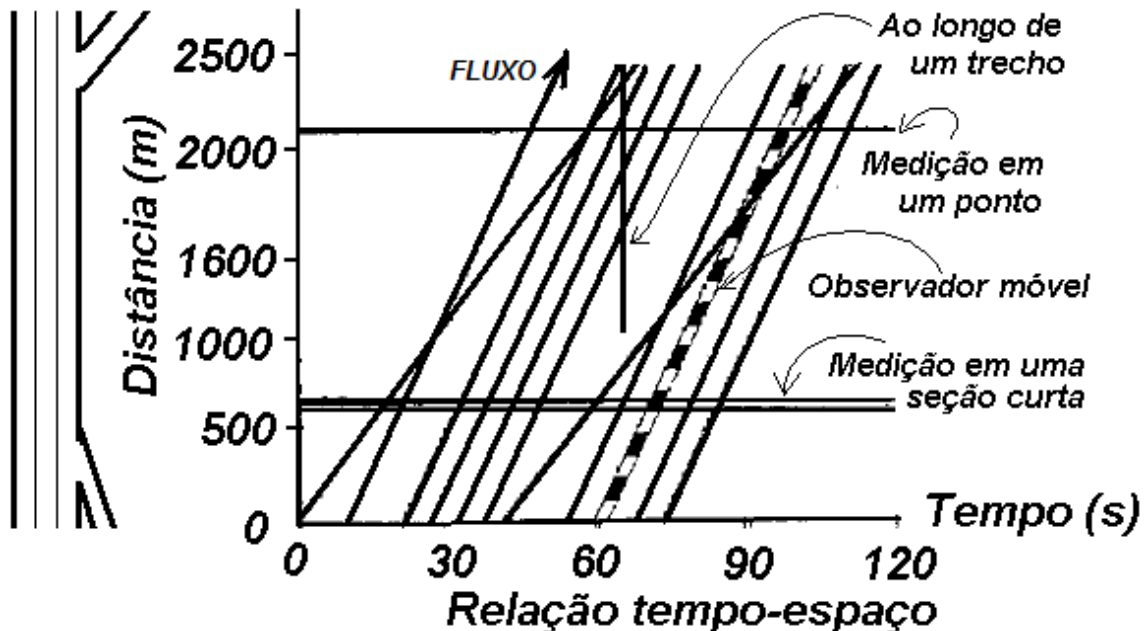


Figura 15. Métodos de obtenção de informação de fluxo de tráfego.

(Adaptado de Drew, 1968, citado por HILL, 2005)

Na prática, uma solução de aquisição de dados de fluxo de tráfego aéreo não se restringirá ao uso de um singelo método, mas usará uma combinação deles; por exemplo, a obtenção de dados a partir das informações transmitidas pelo sistema e pelas aeronaves, combinadas com medições de um observador móvel. Este observador, dado que o sistema em estudo é de aeronaves automatizadas, será um sistema automático também, chamado de *sentinela*, encarregado de coletar os dados de interesse, quando submerso no fluxo de tráfego.

Tabela 4. Dados coletados em voo comercial

Data: 2009.04.02

Decolagem: Viracopos - Campinas, SP

Pouso: Santos Dumont - Rio de Janeiro, RJ

Aeronave: Embraer EMB190

#	Hora	Rumo	Vel [km/h]	Alt [m]
00	14:42:00	150	356	605
01	16:50:00	120	693	5031
02	16:55:00	120	872	8056
03	16:59:00	125	919	9304
04	16:59:00	80	923	9304
05	17:00:00	90	909	9307
06	17:03:00	85	913	9234
07	17:05:00	80	818	7181
08	17:06:00	80	753	6179
09	17:07:00	80	700	5466
10	17:08:00	90	700	5112
11	17:09:00	90	662	4618
12	17:10:00	85	634	4212
13	17:11:00	80	421	3988
14	17:12:00	85	406	3672
15	17:13:00	90	405	3370
16	17:14:00	90	387	2788
17	17:15:00	90	382	2579
18	17:17:00	105	357	1545
19	17:18:00	130	344	1465
20	17:19:00	130	335	1120
21	17:20:00	130	328	827
22	17:21:00	130	319	492
23	17:21:30	130	269	426
24	17:22:00	370	252	360
25	17:23:00	200	247	228
26	17:24:00	200	240	30
27	17:24:30	220	240	30

As informações coletadas por observador móvel, mostradas na tabela 4, foram adquiridas pelo autor viajando em linha aérea. A velocidade e a altitude foram tomadas diretamente do painel de informação da aeronave, enquanto o rumo foi medido

diretamente com uma bússola, portanto se trata de rumo magnético. Apesar dos dados serem tomados de um sistema aéreo convencional de transporte de passageiros, serve como exemplo para o equivalente nos SAACs. Com estas informações é possível calcular as velocidades e limites da aerovia. No entanto o método do observador móvel pode ser utilizado por várias aeronaves no mesmo fluxo, oferecendo dados para cálculo do fluxo e concentração e outras variáveis pertinentes.

## 5.1 MEDIÇÃO EM UM PONTO

Este é o método mais simples e direto na medição de variáveis de fluxo de tráfego aéreo. Consiste na colocação de um sensor que detecta o passo das aeronaves em um ponto determinado da aerovia, como mostrado na figura 16. O tipo de sensor, seus equipamentos associados e a forma como este é instalado são irrelevantes, sendo o método utilizado para obter a função de medição o que interessa nesta descrição. A largura da faixa de detecção do sensor é convenientemente pequena para ser desprezível frente ao espaçamento.

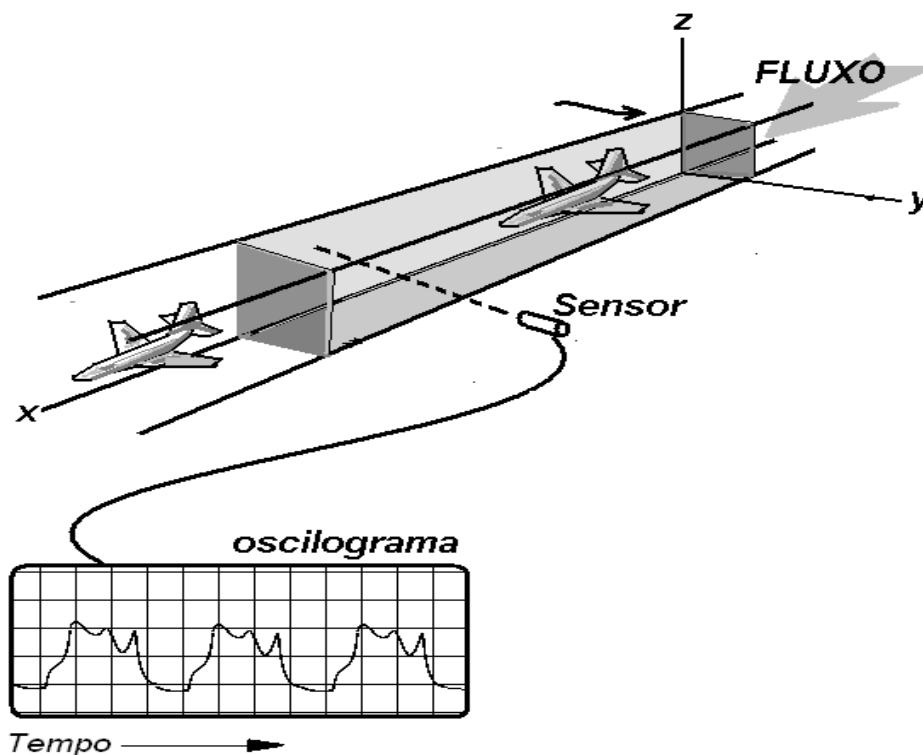


Figura 16. Medição em um ponto: um sensor detecta a passagem de aeronaves.

(Fonte: O autor).

Quando uma aeronave passar em frente do sensor, produz-se uma variação no sinal de tensão elétrica de saída do sensor. Este comportamento se mostra na figura 17. Em efeito, cada aeronave produzirá seu próprio perfil particular em termos de amplitude e fase do sinal de saída do sensor, que é registrado no oscilograma. Através deste perfil particular pode se identificar o modelo ou tipo de aeronave. O intervalo entre duas aeronaves sucessivas pode ser medido na quadrícula do oscilograma.

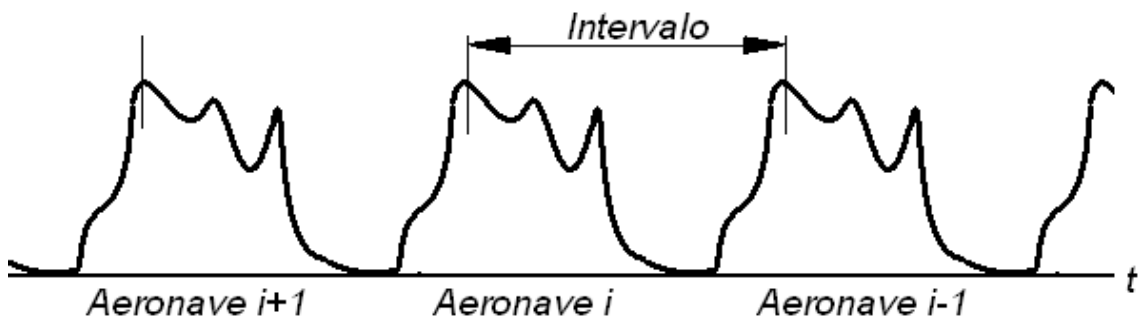


Figura 17. Oscilograma obtido na medição em um ponto.

Deve-se colocar um número de pontos de medição espaçados regularmente, com o intuito de obter uma distribuição de medições ao longo da aerovia.

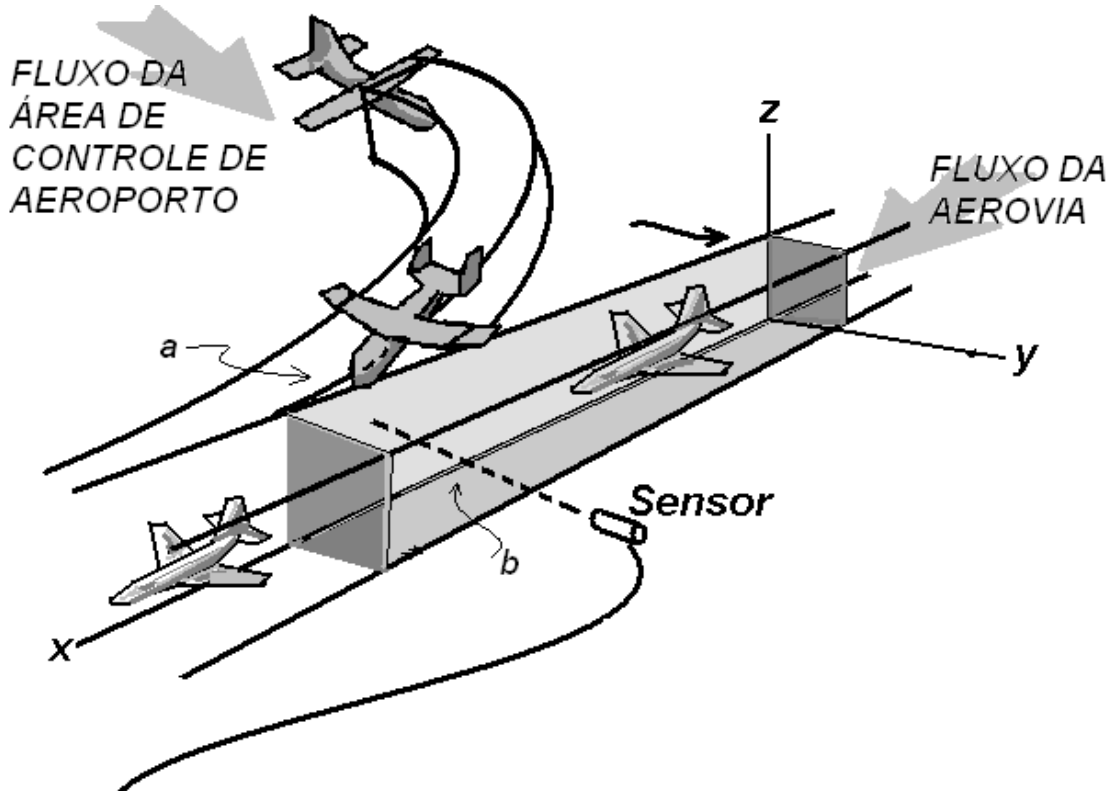


Figura 18. Dois fluxos convergem com fases individuais.

(Fonte: O autor).



Introduz-se aqui o conceito de *coerência*, que referido ao transporte aéreo automatizado significa a regularidade na fase, frequência e direção do fluxo de veículos, de forma similar ao que acontece na física ondulatória.

O fluxo de veículos aéreos automatizados apresenta a mesma fase quando os veículos conservam o mesmo intervalo. Isto quer dizer que as interseções, acessos e saídas das aerovias, assim como as áreas de controle terminal, tenham seus respectivos fluxos sincronizados com o fluxo principal da aerovia. A fase é a diferença entre o ponto de referência ou origem e o começo da onda. Pode ser expressa em unidades de distância ou de tempo. Referir-se às figuras 18 e 19 onde se comparam as fases do fluxo na aerovia e do fluxo da área de terminal.

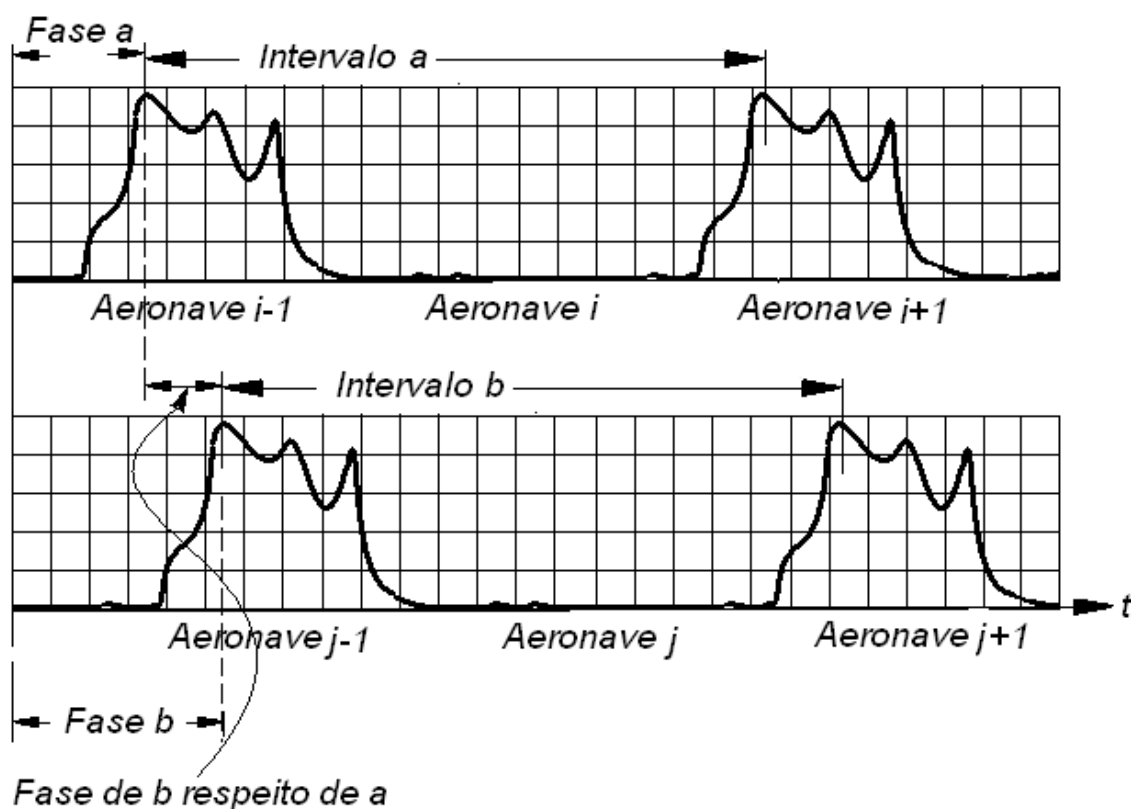


Figura 19. Oscilogramas dos fluxos *a* e *b*, com fases diferentes.

(Fonte: O autor).

Se a fase do fluxo *a*, com respeito à do *b* for diferente de zero, os intervalos não serão regulares nem iguais, possibilitando colisões ou aproximações perigosas entre as aeronaves, ou no melhor dos casos conduzindo a uso inadequado do espaço.

Estas condições indesejáveis também serão atingidas caso as velocidades de todas as aeronaves que entrarem na aerovia não fossem iguais. Uma análise das fases e velocidades conduz à abordagem do fluxo de tráfego chamada de *Modelo Contínuo e Coerente*.

Por causa deste método fornecer uma medida primária do intervalo  $I$  e da velocidade instantânea individual de cada aeronave  $v_i$ , pode-se recorrer às expressões já mencionadas, que relacionam esta variável com a velocidade de grupo e com o espaçamento, como via a conseguir outras grandezas:

$$S = v_G \cdot I, \text{ (vem da Eq. 4.41)}$$

## CAPÍTULO 6

### ESTABELECIMENTO DE UM MODELO DE COMPORTAMENTO DA CORRENTE DE FLUXO DE TRÁFEGO

#### 6.1 INTRODUÇÃO

Em virtude da propriedade intrínseca 7, listada no ítem 3.1, estabelece-se que todas as aeronaves ao interior de uma aerovia se deslocam aproximadamente à mesma velocidade, rumo e altura. Essas condições caracterizam o fluxo *contínuo e coerente*.

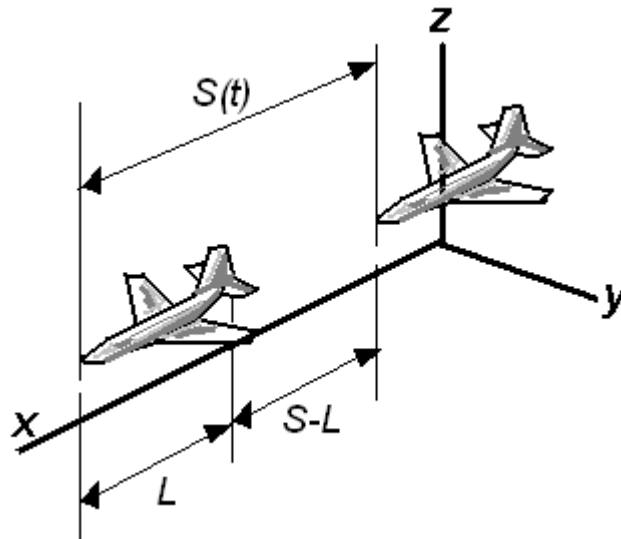


Figura 20. Espaçamento entre duas aeronaves com velocidades diferentes.

(Fonte: O autor).

Para analisar estes aspectos, tome-se as velocidades de duas aeronaves sucessivas, a saber,  $i$  e  $i+1$ , cada uma apenas um pouco diferente do que a velocidade de grupo na aerovia, como ilustrado na figura 20. Para facilitar o enunciado equacional, suponha-se que a diferença de velocidade em excesso de uma das aeronaves é igual em valor absoluto à velocidade em defeito da outra aeronave, condição que não afeta o conceito geral do problema:

$$\Delta v = v_G - v_{i+1}, \text{ (Eq. 6.1)}$$

e, simetricamente:

$$\Delta v = v_i - v_G, \text{ (Eq.6.2)}$$

O que implica em:

$$2 \cdot \Delta v = v_i - v_{i+1} \rightarrow v_G = \frac{v_i \pm v_{i+1}}{2}, \text{ (Eq. 6.3)}$$

É indiferente qual das duas velocidades é maior, nas equações anteriores. Porém, é consequência da diferença de velocidades que o intervalo  $I$  e, por conseguinte, a espaçamento  $S$ , sejam afetados. Tomando o espaçamento individual  $S_i$ , ela será afetada (em decremento ou em incremento) por uma diferença de espaçamento  $\Delta S_i$ , assim:

$$S_i = S_{i0} \pm \Delta S_i, \text{ (Eq. 6.4)}$$

No ambiente ideal da figura 20 o desbalanceamento da velocidade é compensado, indicando que a velocidade média não será afetada, o que vem a manter o espaçamento  $S$  inalterável, e igual ao espaçamento individual  $S_i$ . Em outras palavras, pode-se substituir os espaçamentos individuais na equação 6.4, pelos espaçamentos médios:

$$S = S_0 \pm \Delta S, \text{ (Eq. 6.5)}$$

E já que a variação de espaçamento  $\Delta S$ , introduz um comportamento simétrico, pode-se analisar separadamente os lados positivo e negativo desta equação:

$$S = S_0 + \Delta S, \wedge, S = S_0 - \Delta S, \text{ (Eq. 6.6)}$$

Note-se que esta equação descreve uma situação em que a aeronave com velocidade maior atingirá a sua precedente, com risco de colisão. Então, chamar-se-á *condição de colisão* à situação atingida depois de certo limite de tempo, denominado o tempo

crítico  $t_{CRIT}$ , após o qual o espaçamento chega no valor mínimo possível entre duas aeronaves, isto é o comprimento médio de uma aeronave  $L$ .

Pode-se substituir a diferença de velocidades  $\Delta v$  na equação 6.6, usando as equações 4.39 e 6.3 para obter:

$$S = S_0 - 2 \cdot \Delta v \cdot t, \text{ (Eq. 6.7)}$$

Observe-se que existem condições de fronteira que aplicam na equação 6.7, quando  $\Delta v$  for diferente de zero, a saber:

1. No instante  $t = 0$ , deve-se cumprir que o espaçamento  $S$  seja igual ao espaçamento inicial  $S_0$ . Isto se comprova na equação 6.7.
2. No instante  $t = t_{CRIT}$ , deve-se cumprir que o espaçamento  $S$  seja igual ao comprimento de uma aeronave,  $L$ . Sendo  $t_{CRIT}$ , o tempo necessário para a aeronave mais veloz atingir a mais lenta. Isto é:

$$L = S_0 - 2 \cdot \Delta v \cdot t_{CRIT}, \text{ (Eq. 6.8)}$$

Assim, a equação 6.7 pode se escrever finalmente assim:

$$S = S_0 - 2 \cdot t \cdot (v_i - v_G), \text{ (Eq. 6.9)}$$

E, a partir da equação 6.8 pode se obter o tempo crítico:

$$t_{CRIT} = \frac{(L - S_0)}{2 \cdot (v_i - v_G)}, \text{ (Eq. 6.10)}$$

- Com:
- $S$ : Espaçamento, [m].
  - $S_0$ : Espaçamento inicial no instante  $t=0$ , na condição coerente, [m].
  - $L$ : Comprimento médio de uma aeronave, [m].
  - $\Delta v$ : Diferença das velocidades das aeronaves  $i$  e  $i+1$ , [m/s].
  - $t$ : Tempo, [s].

- $v_G$ : Velocidade de grupo na aerovia, [km/h].
- $v_i$ : Velocidade da aeronave mais rápida, [km/h].
- $t_{CRIT}$ : Tempo necessário para atingir a condição de colisão. [s].

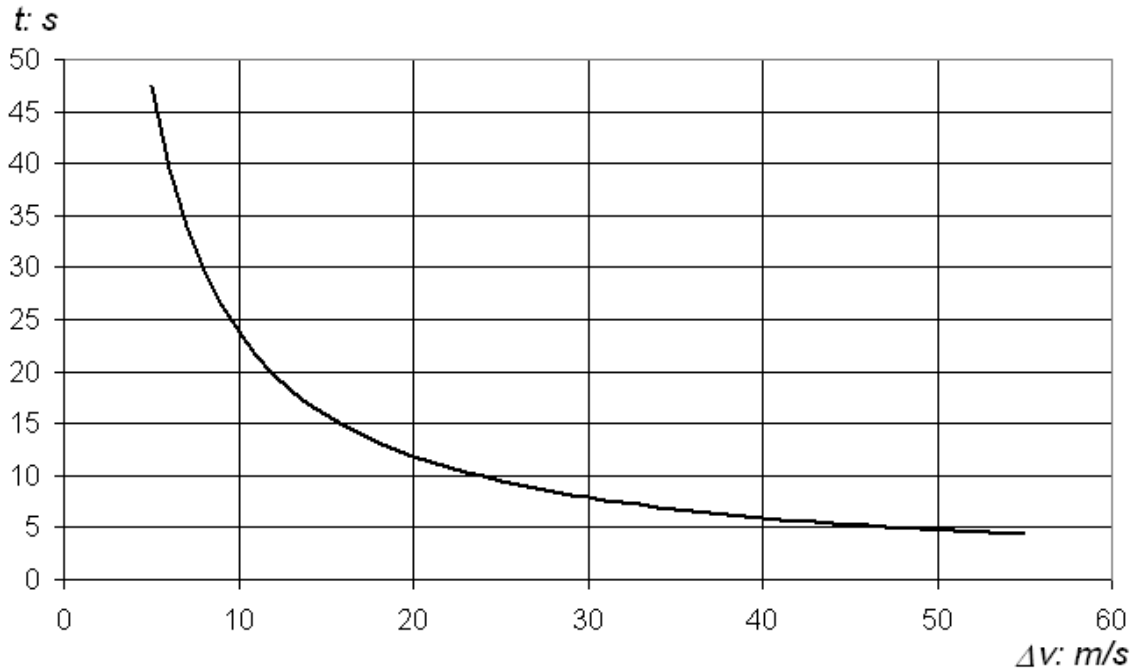


Figura 21. Dependência do Tempo Crítico  $t_{CRIT}$ , da diferença de velocidades.

(Fonte: O autor).

Na figura 21 se observa que o tempo crítico  $t_{CRIT}$ , é fortemente dependente da diferença de velocidades  $\Delta v$ . A estreita margem ao começo da curva sugere que as tolerâncias de velocidades devem se manter no mínimo. Na figura 21 se assinala uma margem de tolerância  $\varepsilon_{\Delta v}$ , equivalente ao máximo valor de  $\Delta v$ , de 0,1, ou 10%, calculada com a expressão:

$$\varepsilon_{\Delta v} = \frac{\Delta v}{v_G}, \text{ (Eq. 6.11)}$$

## 6.2 MODELO MATEMÁTICO CONTÍNUO E COERENTE

O modelo matemático contínuo coerente representa o comportamento da corrente de tráfego de um sistema de aeronaves que se desloca em grupo, com velocidades

individuais inicialmente diferentes e com limitações de velocidade mínima diversas. É um modelo de cálculo numérico que aproveita as funções de cálculo de um sistema computacional. Denomina-se coerente porque os deslocamentos das aeronaves são todos em fase, isto é, as aeronaves entram na corrente de tráfego de forma a alterar o espaçamento o menos possível. O modelo se propõe em forma de 7 etapas ordenadas sucessivamente no tempo, adequadas ao cálculo numérico.

### 6.3 DADOS DE ENTRADA PARA O CÁLCULO NUMÉRICO

Na primeira etapa se dá entrada ao conjunto de parâmetros de operação no sistema de cálculo. Estes parâmetros são:

- $n$ : Número de aeronaves no grupo, [.]
- $L$ : Comprimento médio de uma aeronave, [m].
- $L_{MAX}$ : Comprimento máximo dentre as aeronaves presentes na aerovia, [m].
- $b$ : Largura da aerovia, [m].
- $f_C$ : Fator de carga, [.]
- $m_S$ : Margem de segurança de velocidades na ultrapassagem, [.]
- $\Delta T$ : Intervalo de tempo para cálculo numérico, [s].

Na etapa 2, ingressa-se as posições  $x_i$  e velocidades iniciais  $v_i$  das aeronaves do grupo, assim como suas velocidades máximas programadas  $v_{MAX}$  e velocidades de perda  $v_{PER}$ .

Na etapa 3, ingressa-se o Espaçamento de segurança  $S_s$ , que pode ser calculado com a equação 4.50, explicado no item 4, usando como velocidade a máxima programada na aerovia:

$$S_s = L_{MAX} \cdot [1 + \sqrt[3]{[b]} (1 - e^{-v/v_{UAV}})] , \text{ (Eq. 4.50)}$$

Com:

- $S_s$ : Espaçamento de segurança na aerovia, [m].
- $L_{MAX}$ : Comprimento máximo dentre as aeronaves presentes na aerovia, [m].
- $v$ : Velocidade da aeronave que realiza a ultrapassagem, [m/s]. (Usa-se a máxima velocidade programada na aerovia.)

$[b]$ : Norma da largura da aerovia em metros, [.]

$v_{UAV}$ : Constante relativa à velocidade de resposta dos UAVs, [m/s].

Na etapa 4, de forma opcional, pode-se calcular as distâncias entre o centro de massas do grupo de aeronaves e cada posição individual.

#### **6.4 DETECÇÃO DE ULTRAPASSAGENS**

São necessárias 3 operações para determinar a ocorrência de ultrapassagens das aeronaves mais rápidas sobre as de velocidade menor, nas etapas 5, 6 e 7 a saber:

Na etapa 5 se classifica os valores das coordenadas  $x$  em que se localizam as aeronaves, a fim de saber as mudanças na ordem em que se deslocam, mediante um algoritmo de classificação de dados. Estes dados ordenados segundo a posição das aeronaves na corrente de tráfego são necessários para o posterior cálculos dos espaçamentos individuais.

Na etapa 6 se classifica as aeronaves segundo sua ordem no eixo  $x$ . A aeronave número 1 é a primeira em sair na frente do grupo, mas no percurso do tempo aeronaves mais rápidas que saíram depois podem tomar a primeira posição. Assim, usando a classificação de coordenadas da etapa 5, pode-se localizar as posições individuais das aeronaves em qualquer instante do intervalo de análise.

Na etapa 7, de forma similar à etapa 6, é possível localizar as velocidades máxima programadas das aeronaves se baseando na classificação de coordenadas da etapa 5.

#### **6.5 ESTABELECIMENTO DOS ESPAÇAMENTOS INDIVIDUAIS**

Na etapa 8 se calculam os espaçamentos  $s_i$  individuais, que exigem a prévia classificação das aeronaves a fim de saber qual é a aeronave precedente a cada uma que queira se estabelecer seu espaçamento. Estas grandezas podem ser calculadas com a equação 4.39, escrita a seguir com acrescência do subscrito  $INI$ , pois este valor corresponde ao instante inicial do intervalo  $\Delta t$ :



$$S_{i,INI} = (x_{i-1} - x_i)_{INI} \text{ (Eq. 4.39)}$$

Os valores obtidos neste cálculo devem ser sempre positivos. A ocorrência de espaçamentos negativos indica que aconteceram ultrapassagens de algumas aeronaves sobre outras mais lentas sem que alguma ou várias das classificações das etapas 5 e posteriores tenha conseguido um ordenamento completo.

Na etapa 9 se realiza um ordenamento das velocidades individuais das aeronaves, com o auxílio de um algoritmo similar aos usados nas etapas 6 ou 7, baseado nas posições estabelecidas na etapa 6. É necessária a classificação das velocidades individuais das aeronaves para o cálculo de acelerações a se realizar na próxima etapa.

## 6.6 CÁLCULO DAS ACELERAÇÕES INDIVIDUAIS

Nas etapas 10 e 11, calcula-se as acelerações individuais. De acordo com a velocidade que uma aeronave apresentar em um instante dado, e seu espaçamento com respeito à que a precede, essa precisará de aceleração positiva ou negativa. Por exemplo, se uma aeronave qualquer que estiver num espaçamento maior do que o espaçamento de segurança  $S_s$  com a aeronave que a precede, essa pode acelerar para atingir sua velocidade máxima permitida  $v_{MAX}$ . Mas, se já se encontrar por cima da velocidade máxima permitida, precisará desacelerar, isto é, requererá de aceleração negativa. Assim, deve-se estabelecer tanto o sinal da aceleração, quanto sua norma.

### 6.6.1 Estabelecimento do sinal da aceleração individual

Na tabela 5 se apresenta o conjunto de todas as possíveis combinações destas duas variáveis, (o espaçamento de segurança  $S_s$  e a velocidade máxima permitida  $v_{MAX}$ ) que determinam o sinal da aceleração requerida pela aeronave. Nesta tabela, as variáveis independentes ou variáveis de entrada são:

- $v_i$  : Velocidade da aeronave sob estudo, [m/s].
- $(v_i/v_{i-1})$  : Razão das velocidades da aeronave atual e a que a precede, [.]
- $S_i$ : Espaçamento da aeronave  $i$  com respeito a que a precede, [m].

Os valores de referência ou parâmetros, com os que as variáveis de entrada são comparados para a tomada de decisões, são:

$m_s$ : Margem de velocidades para ultrapassagem na aerovia, [.]

$S_s$ : Espaçamento de segurança na aerovia, [m].

Lembre-se que a margem de segurança foi definida na equação 4.47 e que é válida somente se as velocidades  $v_i$  e  $v_{i-1}$  são maiores que as respectivas velocidades de perda  $v_{PER}$ .

$$m_s \geq \frac{v_i}{v_{i-1}}, \text{ (Eq. 4.47)}$$

A variável de saída da tabela 5 é o sinal da aceleração requerida pela aeronave, seja para se aproximar da velocidade máxima permitida, ou para realizar uma ultrapassagem.

Tabela 5. Sinal da aceleração de uma aeronave na aerovia.

ENTRADAS			SAÍDA
$V_i$	$(V_i/V_{i-1})$	$S_i$	Sinal de $a_i$
$V_i < V_{MAX}$	$(V_i/V_{i-1}) < m_s$	$S_i < S_s$	+
$V_i < V_{MAX}$	$(V_i/V_{i-1}) < m_s$	$S_i \geq S_s$	+
$V_i < V_{MAX}$	$(V_i/V_{i-1}) \geq m_s$	$S_i < S_s$	-
$V_i < V_{MAX}$	$(V_i/V_{i-1}) \geq m_s$	$S_i \geq S_s$	+
$V_i \geq V_{MAX}$	$(V_i/V_{i-1}) < m_s$	$S_i < S_s$	-
$V_i \geq V_{MAX}$	$(V_i/V_{i-1}) < m_s$	$S_i \geq S_s$	-
$V_i \geq V_{MAX}$	$(V_i/V_{i-1}) \geq m_s$	$S_i < S_s$	-
$V_i \geq V_{MAX}$	$(V_i/V_{i-1}) \geq m_s$	$S_i \geq S_s$	-

(Fonte: O autor).

Observe-se que são oito as possibilidades, e que as entradas são binárias, isto é, têm dois possíveis valores. Da matemática combinatória, sabe-se que  $n$  variáveis com base aritmética  $b$  produzem  $m$  combinações possíveis:

$$m = n^b, \text{ (Eq. 6.13)}$$

Assim, para 3 variáveis de entrada, binárias, obtém-se 8 combinações possíveis, o que está em concordância com a tabela 5. A aceleração é positiva no caso da

velocidade  $v_i$  da aeronave for menor que a velocidade máxima permitida, sempre que respeitada a margem de segurança de ultrapassagem. Também, a aceleração será positiva no caso da aeronave apresentar velocidade inferior à máxima permitida  $v_{PER}$  e, ao mesmo tempo, o espaçamento for maior que a espaçamento de segurança  $S_s$ . Nos casos restantes a aceleração deve ser negativa.

Para analisar os dados apresentados na tabela 5, recorre-se à representação de sinais digitais de *Karnaugh*, ou *Diagrama de Karnaugh*, (KARNAUGH, 1953), que permite deduzir a equação lógica do sistema. De acordo com esta técnica, as variáveis binárias de entrada  $a$ ,  $b$  e  $c$  estão relacionadas com a variável de saída  $x$ , também binária, da forma como for possível estabelecer relações lógicas com as saídas positivas, (isto é, iguais a unidade), estabelecidas após construir o diagrama da figura 22.

O diagrama de *Karnaugh* deve ser construído com as combinações das saídas localizadas no centro do diagrama, (área de saídas na figura 22), e as entradas nas laterais (variável  $c$ ) e na linha superior (variáveis  $a$  e  $b$ ).

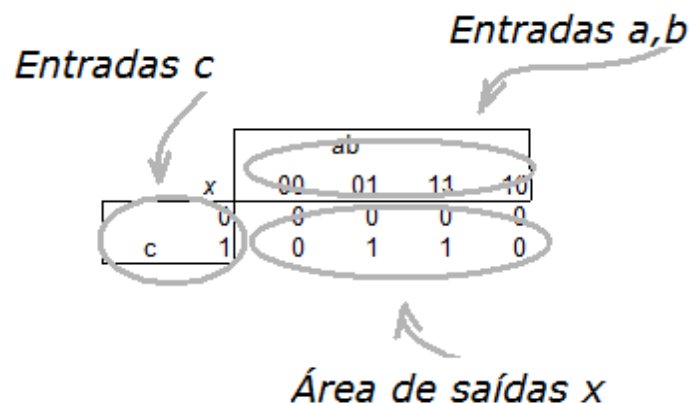


Figura 22. Um exemplo de diagrama de *Karnaugh* de 3 entradas e uma saída.

(Fonte: O autor).

É possível construir diagramas de *Karnaugh* para qualquer número de variáveis de entrada ou de saída; no entanto, aqui se explica somente o necessário para 3 entradas e uma saída. Na figura 23 se mostra um exemplo arbitrário, onde as saídas só são 1 em duas casas. A equação de saída se estabelece somente com a combinação de operadores lógicos e e ou aplicados às casas de valor igual a 1. Para isto, assinala-se com um círculo as saídas igual a 1 que sejam adjacentes. Depois,

são desconsideradas da equação lógica as variáveis de entrada que abrangem ambos os valores 1 e 0. As variáveis com entrada 1 se representam na equação com o símbolo da variável, mas no caso de entradas 0, a representação é com o símbolo da variável com um traço encima, indicando variável *negada*.

		ab			
	x	00	01	11	10
0	c	0	0	0	0
1	c	0	1	1	0

Figura 23. Diagrama de *Karnaugh* de 3 variáveis de entrada e uma saída.

(Fonte: O autor).

Note-se que as saídas ressaltadas correspondem com  $b=1$  e  $c=1$ , logo a equação de saída para este exemplo, é:

$$x = b \cdot c, \text{ (Eq. 6.14)}$$

Esta equação pode ser provada com os valores de entrada, verificando que produzirá as saídas da figura 23.

Os dados da tabela 5 podem ser convertidos à forma binária com ajuda da equivalência proposta na tabela 6, o que permitiria usar um diagrama de *Karnaugh* e subsequentemente, a obtenção da equação lógica correspondente:

Tabela 6. Equivalências adotadas para conversão binária de dados.

Condição	Equivalência	
	Simbólica	binária
$v_i < V_{MAX}$	$\bar{a}$	0
$v_i \geq V_{MAX}$	$a$	1
$(v_i / v_{i-1}) < m_s$	$\bar{b}$	0
$(v_i / v_{i-1}) \geq m_s$	$b$	1
$S_i < S_s$	$\bar{c}$	0
$S_i \geq S_s$	$c$	1
Sinal -	$\bar{x}$	0
Sinal +	$x$	1

(Fonte: O autor).

Com a aplicação destas equivalências, obtém-se a tabela 7 de condições e sinais de aceleração, em representação binária.

Tabela 7. Sinal da aceleração em representação binária.

ENTRADAS			SAÍDA
$a \rightarrow v_i$	$b \rightarrow (v_i / v_{i-1})$	$c \rightarrow S_i$	$x \rightarrow \text{Sinal de } a_i$
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0

(Fonte: O autor).

E, construindo o diagrama de *Karnaugh* correspondente:

		ab			
	$a_i$	00	01	11	10
c	0	1	0	0	0
	1	1	1	0	0

Figura 24. Diagrama de *Karnaugh* para o sinal da aceleração.

(Fonte: O autor).

Da figura 24 se pode obter a equação lógica do sinal da aceleração. Neste caso foi possível obter dois grupos adjacentes de valores 1 (dois círculos na figura 24) que constituem parcelas na equação lógica, assim:

$$x = \bar{a} \cdot \bar{b} + \bar{a} \cdot c, \text{ (Eq. 6.15)}$$

Colocando em evidência o termo  $\bar{a}$  na equação 6.14, obtém-se:

$$x = \bar{a} \cdot (\bar{b} + c), \text{ (Eq. 6.16)}$$

Considerando que a equação 6.16 é uma equação lógica, a operação indicada com o ponto é realmente o *ou lógico* e com o sinal + é o *e lógico*. Trocando pelos sinais lógicos  **$\Lambda$**  (*ou lógico*) e  **$\mathbf{V}$**  (*e lógico*), a equação 6.16 pode ser escrita assim:

$$x = \bar{a} \wedge (\bar{b} \vee c), \text{ (Eq. 6.17)}$$

Agora, usa-se a equivalência da tabela 7 de forma inversa, para converter a equação 6.17 em termos das variáveis de fluxo de tráfego:

$$\text{sinal de } a_i = \pm 1 = (v_i < v_{MAX}) \wedge \{ [(v_i / v_{i-1}) < m_s] \mathbf{V} (S_i \geq S_s)\}, \text{ (Eq. 6.18)}$$

Na tabela 8 se apresenta uma simulação computacional para comprovar a equação 6.18, usando grandezas numéricas a cumprir todas as combinações da tabela 5. Usou-se como exemplo os seguintes valores das constantes de entrada:

- $m_s$ : Margem de velocidades para ultrapassagem na aerovia, 1,15
- $S_s$ : Espaçamento de segurança na aerovia, 305,5 [m].
- $v_{MAX}$  Velocidade máxima programada 275 [m/s].

Tabela 8. Comprovação computacional do sinal da aceleração.

ENTRADAS			SAÍDA
$V_i$	$V_{i-1}$	$S_i$	Sinal de $a_i$
49,0	500,0	200,0	1,0
49,0	500,0	300,0	1,0
49,0	250,0	200,0	-1,0
49,0	250,0	300,0	1,0
101,0	500,0	200,0	-1,0
101,0	500,0	300,0	-1,0
101,0	250,0	200,0	-1,0
101,0	250,0	300,0	-1,0

(Fonte: O autor).

Observa-se, na coluna de saída da tabela 8, que os sinais cumprem o resultado previsto para a equação 6.18. Esta equação é usada na etapa 10 do modelo matemático para calcular o sinal da aceleração de cada aeronave.

## 6.6.2 Estabelecimento da norma da aceleração individual

A aceleração de cada aeronave, além de ser positiva ou negativa, deve corresponder com valores toleráveis pela estrutura da aeronave e pela carga por ela transportada. O parâmetro que estabelece quanta aceleração é permissível em uma aeronave é o *fator de carga* mencionado no item 4.7, em que se definiu a aceleração máxima permissível para uma aeronave:

$$a_{i,MAX} = g \cdot f_C, \text{ (Eq. 4.45)}$$

Sugere-se neste trabalho a função de aceleração mostrada na equação 6.19, que garante valores máximos quando o espaçamento da aeronave está longe do espaçamento de segurança, e valores proporcionalmente moderados fora de tal condição. Esta função inclui o valor de aceleração máxima permitida, modulado pela função tangente hiperbólica para obter o comportamento mencionado. Foi obtida por cálculo numérico computadorizado, através dos seguintes passos:

1. Escolhe-se uma função que tivesse como máximo valor 1 e como mínimo valor -1. Isto limita a escolha às funções trigonométricas, exponencias e hiperbólicas.
2. Escolhe-se uma função que permaneça constante em -1 para entradas com valor em torno de -5 e menores, e permaneça constante em +1 para entradas com valor em torno de +5 ou maior.

A função que cumpre estas duas condições é a função tangente hiperbólica, sendo necessário multiplicar pela norma da aceleração máxima permitida e atribuir o sinal de aceleração calculado anteriormente:

$$a_i = \pm a_{i,MAX} \cdot \operatorname{tngH}\left(\frac{S_i}{S_s} - 1\right), \text{ (Eq. 6.19)}$$

Expressando a tangente hiperbólica em termos exponenciais, e substituindo a aceleração máxima pela equação 4.45, a aceleração pode ser escrita da seguinte maneira:

$$a_i = \pm g \cdot f_c \cdot \left( \frac{e^{(s_i/s_s \mp 1)} - 1}{e^{(s_i/s_s \pm 1)} + 1} \right), \text{ (Eq. 6.20)}$$

Com:

$a_i$ : Aceleração da aeronave sob estudo, [m/s<sup>2</sup>].

$a_{i,MAX}$ : Aceleração máxima permitida à aeronave i, [m/s<sup>2</sup>].

$\pm$ : Sinal da Aceleração, obtida com a equação 6.18.

$f_c$ : Fator de carga da aeronave, no intervalo 1,5~3,0 [.]

$g$ : Aceleração da gravidade na superfície terrestre, igual a 9,8 m/s<sup>2</sup>.

$S_i$ : Espaçamento da aeronave, [m].

$S_s$ : Espaçamento de segurança na aerovia, [m].

$S_i / S_s$ : Razão do espaçamento com respeito ao de segurança, [.]

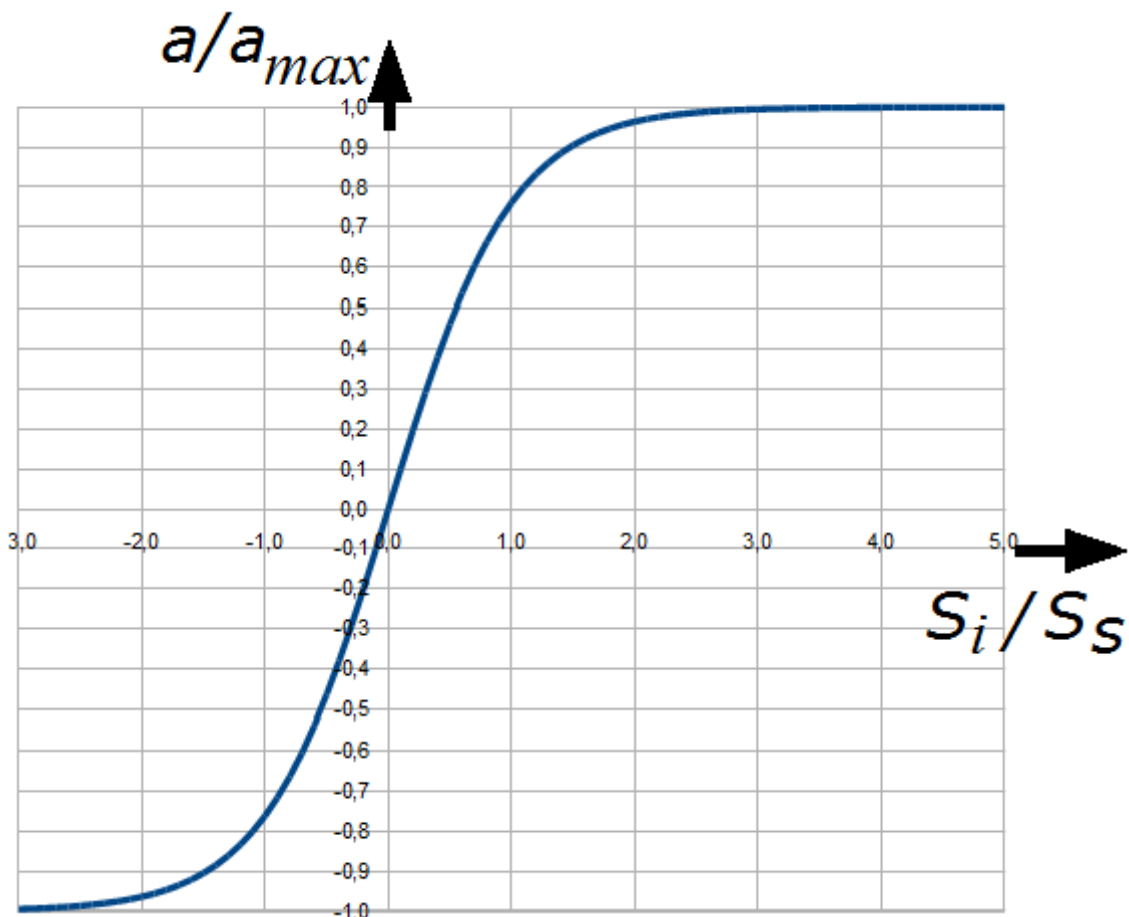


Figura 25. Comportamento da aceleração com respeito ao espaçamento relativo.

(Fonte: O autor).



Observe-se que o sinal da aceleração deve se aplicar no começo da equação 6.20, e nos expoentes, de forma inversa no numerador e de forma direta no denominador. A razão do espaçamento com respeito ao de segurança, a expressão  $S_i / S_s$ , também será chamada *Espaçamento Relativo* da aeronave.

Na figura 25 se mostra o comportamento da norma da aceleração, como função do espaçamento relativo. Na etapa 11 do modelo se usa a equação 6.20 para o cálculo da aceleração individual das aeronaves.

Nesta análise não se considerou ainda o cumprimento da condição de velocidade ser superior à velocidade de perda, requisito que deve ser revisado no próximo passo, o de análise de velocidade.

## 6.7 CÁLCULOS CINEMÁTICOS

Agora corresponde aplicar as equações explicadas em capítulos anteriores ou provenientes da Cinemática, para estabelecer as mudanças de posição das aeronaves, assim como suas novas velocidades e espaçamentos. Deve-se ter cuidado no cálculo dos novos espaçamentos, uma vez que as aeronaves mudam suas posições e o valor do espaçamento de cada uma delas é dependente de sua posição relativa às outras.

### 6.7.1 Estabelecimento das mudanças de posição das aeronaves

No passo 11, calcula-se as posições  $x_i$  das aeronaves na direção do deslocamento do fluxo, usando a equação 6.12 com ajuda da cinemática:

$$x_{i.FIN} = x_{i.INI} + v_{i.INI} \cdot \Delta t, \text{ (Eq. 6.12)}$$

### 6.7.2 Estabelecimento das novas velocidades individuais

No passo 12, calcula-se os novos valores das velocidades individuais das aeronaves do grupo, com a equação 6.21, proveniente da Cinemática:

$$v_{i.FIN} = v_{i.INI} + a_i \cdot \Delta t, \text{ (Eq. 6.21)}$$

Com:

$v_{i.FIN}$ : Velocidade da aeronave após o intervalo  $\Delta T$ , [m/s].

$v_{i.INI}$ : Velocidade da aeronave no início do intervalo  $\Delta T$ , [m/s].

$a_i$ : Aceleração da aeronave sob estudo, [m/s<sup>2</sup>].

$\Delta T$ : Intervalo de tempo para cálculo numérico, [s].

Observe-se que a aceleração está sendo considerada aqui como uma constante durante o intervalo de tempo da iteração  $\Delta T$ . Se este intervalo for convenientemente pequeno, o cálculo aproxima a aceleração assim obtida à aceleração instantânea.

### 6.7.3 Estabelecimento dos novos espaçamentos

Já tinha se calculado os espaçamentos iniciais no passo 8, no item 6.6. Agora corresponde voltar a esse passo, para calcular os novos espaçamentos individuais usando a equação 4,39, explicada no item 4.6, com a diferença que agora usar-se-á os subíndices  $FIN$ , para indicar que os valores encontrados agora são os correspondentes com o final do intervalo de tempo  $\Delta t$ , no final da iteração em curso:

$$S_{i.FIN} = (x_{i-1} - x_i)_{FIN}, \text{ (Eq. 4.39)}$$

As iterações de cálculo numérico são completadas desde o passo 8 até o 12. Voltam ao passo 8 para uma nova iteração e assim por diante até completar o intervalo de tempo da análise.

## 6.8 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO PROPOSTO

Os 12 passos do modelo matemático aqui proposto, foram implementados em uma planilha de cálculo computacional para comprovação de seu funcionamento, usando um exemplo de valores numéricos. Apresenta-se, a seguir, uma lista dos dados

usados para cálculo numérico, seguindo o modelo matemático coerente e os gráficos obtidos.

### 6.8.1 Dados usados como exemplo no cálculo numérico do modelo

Na tabela 9 se mostram os parâmetros iniciais usados como exemplo no modelo matemático coerente. A tabela 10 contém as coordenadas iniciais de cada aeronave. As velocidades iniciais das aeronaves, as velocidades de perda e as velocidades máximas permitidas são apresentadas na tabela 11.

Tabela 9. Parâmetros iniciais no exemplo de modelo matemático.

Parâmetro	Valor	Unidades	Descrição
$v_{UAV}$	60,00	[m/s]	Velocidade de resposta dos UAVs
$n$	6,00		Número de aeronaves
$f_c$	2,00		Fator de carga
$S_s$	299,81	[m]	Espaçamento de segurança.
$b$	200,00	[m]	Largura da aerovia
$m_s$	1,15		Margem de segurança de velocidades na ultrapassagem. $m_s > 1,00$
$\Delta t$	0,50	[s]	Intervalo de tempo para cálculo numérico.
$L$	45,00	[m]	Comprimento de uma aeronave
$L_{MAX}$	46,00	[m]	Comprimento máximo dentre as aeronaves
$a_u$	0,05		Porcentagem mínima de aceleração na ultrapassagem

(Fonte: o autor.)

Tabela 10. Valores das coordenadas iniciais no exemplo apresentado.

$X_1$	1278,0
$X_2$	1177,0
$X_3$	950,0
$X_4$	666,6
$X_5$	295,3
$X_6$	0,6

(Fonte: o autor.)

Tabela 11. Velocidades iniciais como exemplo para cálculo numérico.

[m/s]	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$	$v_5$	$v_6$
$v_{MAX}$	189,0	195,0	65,0	200,0	178,0	207,0
$v_{I,INI}$	53,0	172,0	133,0	202,0	103,0	134,0
$v_{PER}$	50,0	53,0	47,0	40,0	45,0	52,0

(Fonte: o autor.)

### 6.8.2 Comentários sobre os gráficos obtidos

Através dos gráficos obtidos no cálculo numérico nesta seção do trabalho, como exemplo de utilização do modelo aqui proposto, é possível ressaltar as seguintes questões importantes:

Na figura 26 é possível observar o comportamento da velocidade individual das aeronaves, referida ao tempo. O tráfego de veículos no interior da aerovia se movimenta como um fluido, em que os veículos são as partículas individuais que o compõem. Estas se deslocam unidirecionalmente, apresentando três tipos de velocidades: a velocidade individual das partículas do fluido e a velocidade em que as perturbações, tais como variações de densidade, se propagam no interior do espaço preenchido da aerovia. O terceiro tipo de velocidade é a velocidade de grupo.

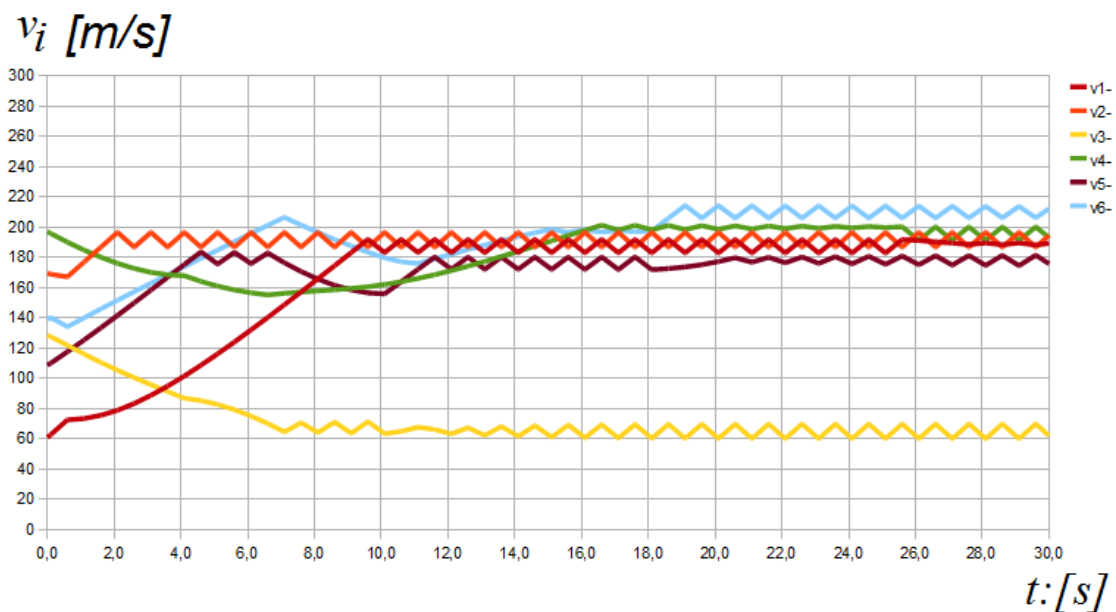


Figura 26. Comportamento das velocidades individuais no tempo.

(Fonte: o autor.)

As variações de densidade se manifestam em forma de ondas (ondas de choque), que viajam no mesmo sentido do deslocamento do fluxo, e se originam nas diferenças entre as velocidades individuais das partículas. Todas estas velocidades tendem a um valor médio, a velocidade de grupo, cujo comportamento se ilustra na figura 27, sendo que as diferenças absolutas entre este valor médio e cada velocidade individual são comparativamente pequenas. (Estatisticamente equivale a dizer que apresentam pequeno valor de variância).

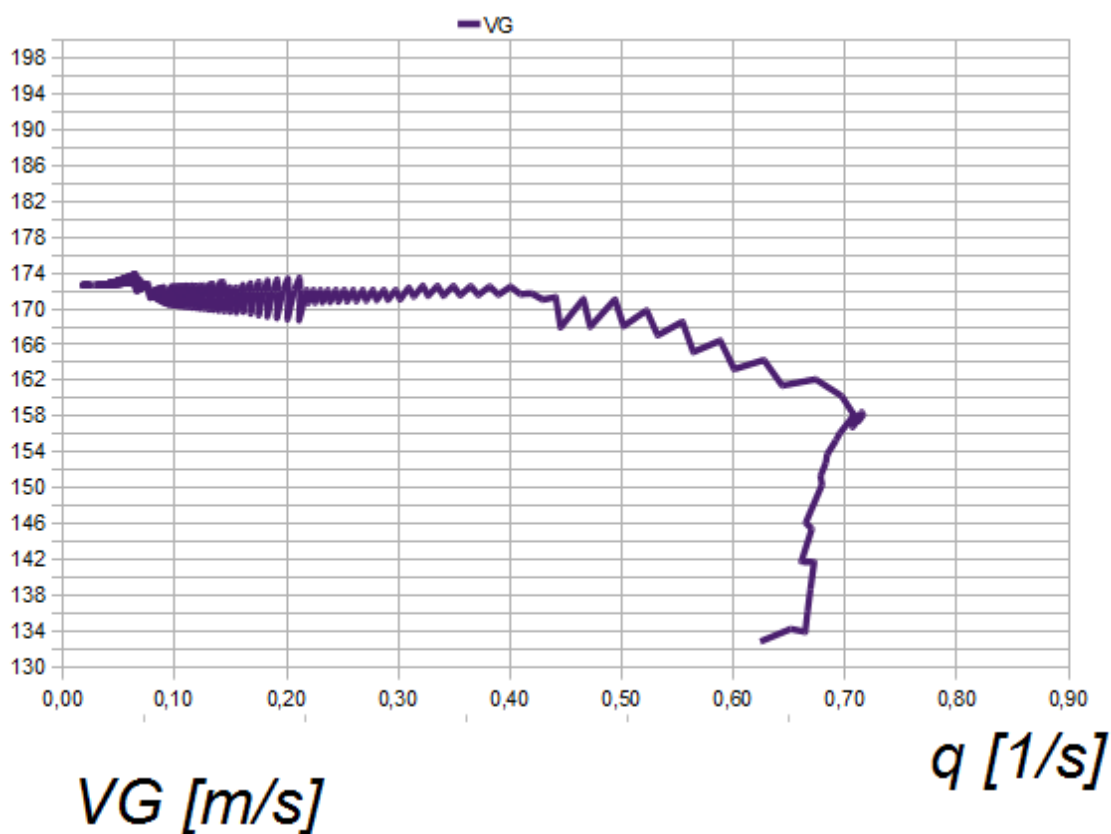


Figura 27. Comportamento da velocidade de grupo com o fluxo.

(Fonte: o autor.)

A velocidade individual das partículas tem um valor mínimo no topo da onda de choque, coincidindo com o valor máximo da densidade, de forma que se o valor da velocidade for zero nesse ponto, a aerovia está na condição de saturação, isto é, sua capacidade máxima foi atingida; (não sendo possível ultrapassá-la). No ponto de saturação a densidade será máxima. A densidade atingida no ponto em que o fluxo for igual à capacidade máxima da aerovia será chamada de densidade de saturação. Os valores por cima da densidade de saturação indicam a região onde a velocidade individual dos veículos cai até zero.

As velocidades individuais se produzem a partir da fonte de energia própria de cada veículo, o que é um comportamento diferenciado com respeito a um fluido clássico, onde uma fonte externa imprime energia ao fluido, para movimentá-lo, e cada partícula, por sua vez, atua como intermediária para comunicar movimento às partículas após dela, mediante colisões. Em efeito, os veículos que se deslocam na aerovia não podem chegar à condição de colisão, o que significa que existe um espaçamento mínimo irreduzível, o espaçamento crítico, por baixo do qual as funções de fluxo de tráfego não são definidas, e o fluxo não é permitido.

Entretanto, no referente ao comportamento energético e cinético, o fluido do tráfego aéreo se comporta igual ao fluido clássico, toda vez que as variações de velocidade de uma partícula enésima causam alterações nas velocidades das partículas vizinhas, seja para permitir que estas últimas aumentem sua velocidade, no caso da enésima ter-la aumentado, ou diminuam a velocidade para respeitar o espaçamento crítico, no caso da enésima ter-la reduzido. Este fenômeno é equivalente à transmissão de energia entre partículas mediante colisões.

São duas as condições não permitidas no fluxo de tráfego aéreo: A já mencionada, a existência do espaçamento crítico, derivada de requisitos de segurança, e a velocidade mínima da aerovia, chamada de velocidade limite inferior, também relativa à segurança, mas imposta pelas características de voo das aeronaves permitidas a voar na aerovia. A primeira foi concluída a partir do trabalho matemático neste trabalho, mas a segunda é uma das condições intrínsecas que serviram de base.

As pequenas diferenças das velocidades individuais das aeronaves, comparadas com a velocidade de grupo, representam um comportamento natural do fluxo; o operador do sistema poderia alterar arbitrariamente a distribuição de velocidades em um ponto o na aerovia toda, fazendo com que as diferenças de velocidade já não sejam relativamente pequenas. Entretanto, uma análise adicional do aspecto energético (fora do alcance deste trabalho) poderia indicar que esta ação implicaria em alto consumo energético, reduzindo a eficiência do sistema. Os menores consumos energéticos poderiam estar localizados no ponto onde todas as velocidades individuais são iguais entre si, e iguais, portanto, à velocidade de grupo, condição chamada de regime normal. A velocidade de grupo em termos do tempo é mostrada na figura 28.

$VG$  [m/s]

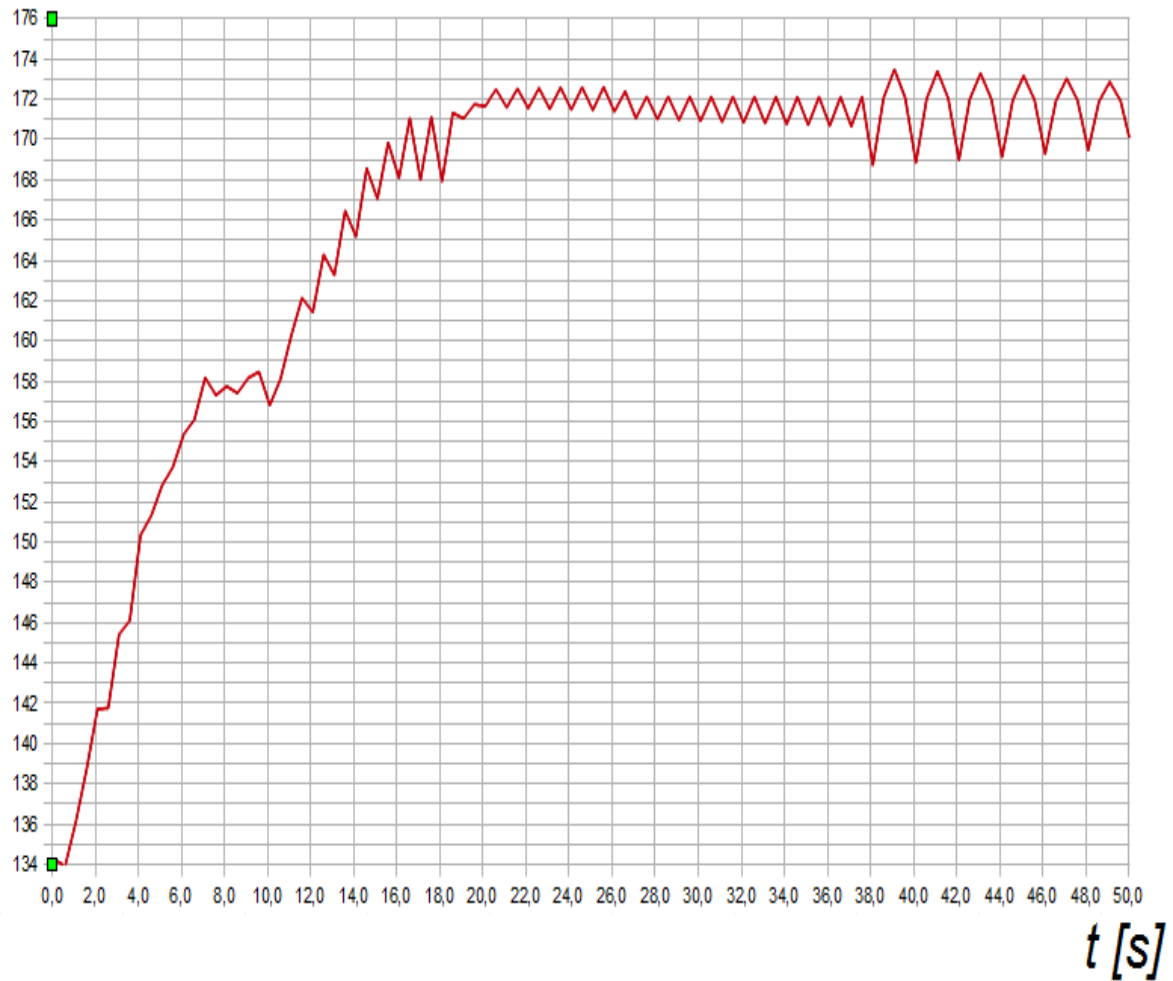


Figura 28. Comportamento da velocidade de grupo no tempo.

(Fonte: o autor.)

Outras observações podem ser advertidas no regime normal. Nesta condição ideal o valor da densidade a longo da aerovia é igual em qualquer ponto, o que se deriva em ausência de ondas de choque, sugerindo que são estas ondas as principais responsáveis pelo uso dissipativo da energia. A velocidade de grupo deveria se situar em um valor maior do que a velocidade limite inferior da aerovia, mas menor do que a velocidade de saturação. Este trabalho não abrange a otimização do sistema, para encontrar, por exemplo, o ponto em que a eficiência energética é máxima nesse intervalo de velocidades.

$V_G$  [m/s]

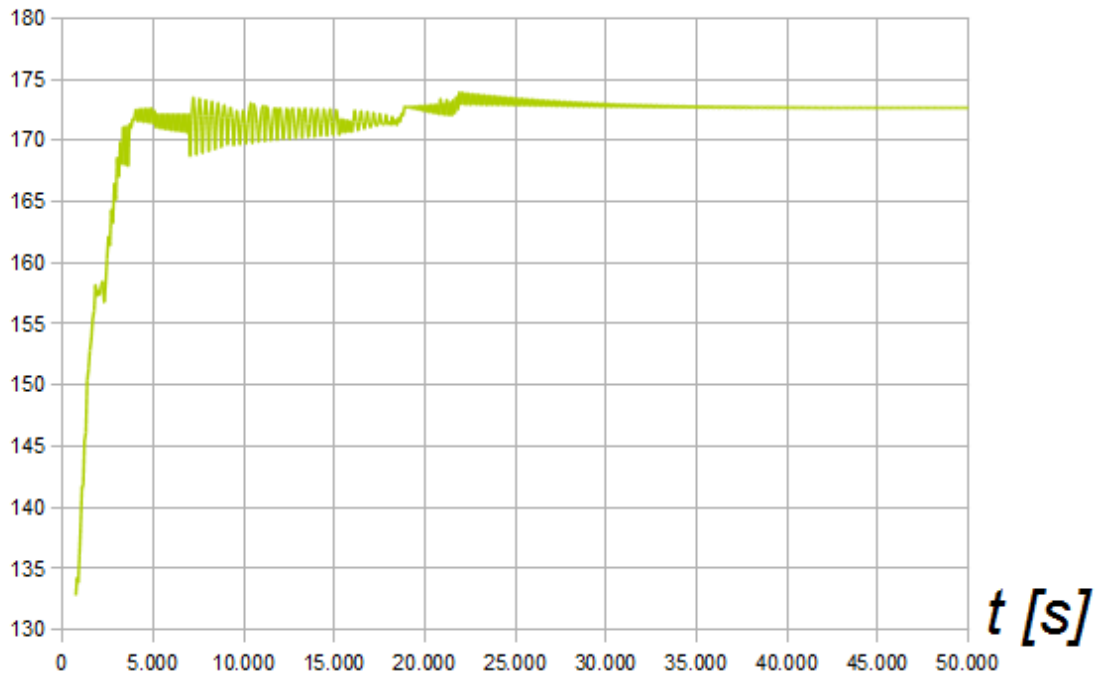


Figura 29. Comportamento da velocidade de grupo com a posição do centro de massa.

(Fonte: o autor.)

Na figura 29 se mostra o comportamento da velocidade de grupo relativa ao centro de massas do grupo de aeronaves. Adverte-se que a velocidade grupo tende a se estabilizar num valor médio, e que as grandes mudanças acontecem no começo, quando a nuvem de aeronaves ainda tem que se abrir em diferentes posicionamentos, devido as diversas velocidades delas. Entretanto, quando o grupo se dissemina ao longo de um espaço considerável, (uma *dispersão de grupo*,  $d$ , considerável) as variações da velocidade de grupo se tornam oscilantes em maior proporção, como se observa no extremo do traço da figura 28.

Através da observação do comportamento do fluxo de tráfego é possível considerar algumas previsões no projeto de aerovias para o SAAC, a saber:

1. A existência de velocidades limite inferiores, diferentes para cada classe de veículo, prevê a necessidade de estabelecer aerovias especiais para cada uma destas classes.



2. O número de classes de aerovias deve se manter dentro de um valor limitado, dado o incremento de custo e de complexidade do sistema com o aumento de classes de veículos e aerovias.

Neste trabalho não se abordou com profundidade a otimização do sistema, área extensa que fica aberta a futuras pesquisas. No entanto, ao se observar a curvas de velocidades ressalta a conveniência de manter o espaçamento sempre igual, seja sob condições de saturação, seja em fluxo livre, condição que oferece duas vantagens importantes:

1. O sistema opera em equilíbrio de velocidades. Isto quer dizer fluxo homogêneo (laminar), onde não se produzem alterações a se propagarem no interior do tráfego, oferecendo a máxima velocidade de grupo.
2. A ausência de interações no fluxo minimiza a perda de energia, reduzindo os custos de operação do sistema.

## CAPÍTULO 7

### INFORMAÇÃO COMPLEMENTAR SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DE UM SISTEMA AÉREO AUTOMATIZADO DE CARGA (SAAC)

#### 7.1 MODELO CONCEITUAL SIMBÓLICO DO SAAC

Desde a concepção sistêmica, corresponde estudar os subsistemas do SAAC considerando também seus subsistemas. Neste ponto, deve-se ressaltar que o objeto de estudo neste trabalho é apenas um dos elementos do SAAC, o fluxo de tráfego, e não o sistema completo em si, de forma que a informação apresentada neste capítulo é complementar ao tema principal deste trabalho.

De forma geral, pode-se apresentar o Sistema Aéreo Automatizado de Carga como aquele cuja entrada é a demanda de transporte de carga e sua saída o deslocamento aéreo de cargas, como mostrado na figura 30. Também são entradas do sistema as variáveis do entorno ao redor do SAAC, tais como as condições econômicas, sociais e políticas do país, assim como o meio ambiente e características climáticas e meteorológicas do espaço aéreo.

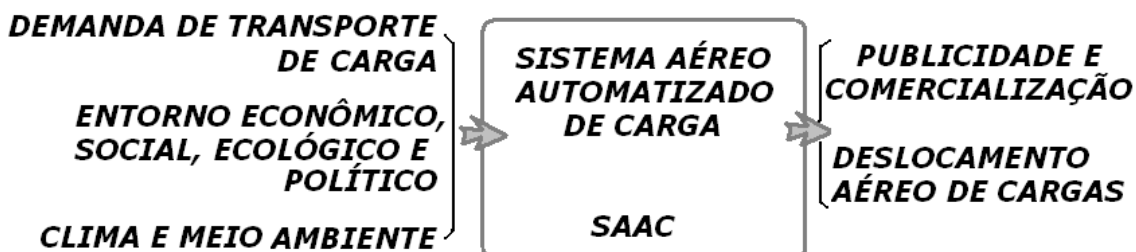


Figura 30. Diagrama funcional geral do SAAC com suas entradas e saídas.

(Fonte: O autor).

Da Engenharia de Transportes, pode-se citar os elementos de um sistema de transporte, mas desta vez adaptando à forma geral do SAAC, assim:

1. Aerovias
2. Aeronaves e seus sistemas
3. Aeródromos
4. Controle e gestão

## 5. Geração, suprimento e manuseio de Carga.

O último elemento mencionado, a carga, não é incluído nas descrições clássicas de sistemas de transporte. No entanto, vale a pena salientar que este é o objetivo último do SAAC e por tanto merece uma importância notável no seu estudo, tanto nos aspectos de geração e suprimento da demanda quanto o de manuseio da carga. Em efeito, tanto nos canais de transferência de matérias primas para os centros de processamento, quanto nos canais de distribuição das mercadorias aos centros de consumo, o SAAC realiza a integração inter-modal na cadeia de suprimento, ou então conecta a origem e destino diretamente, usando os terminais (aeródromos) dispostos ao interior das instalações de produção ou de distribuição.

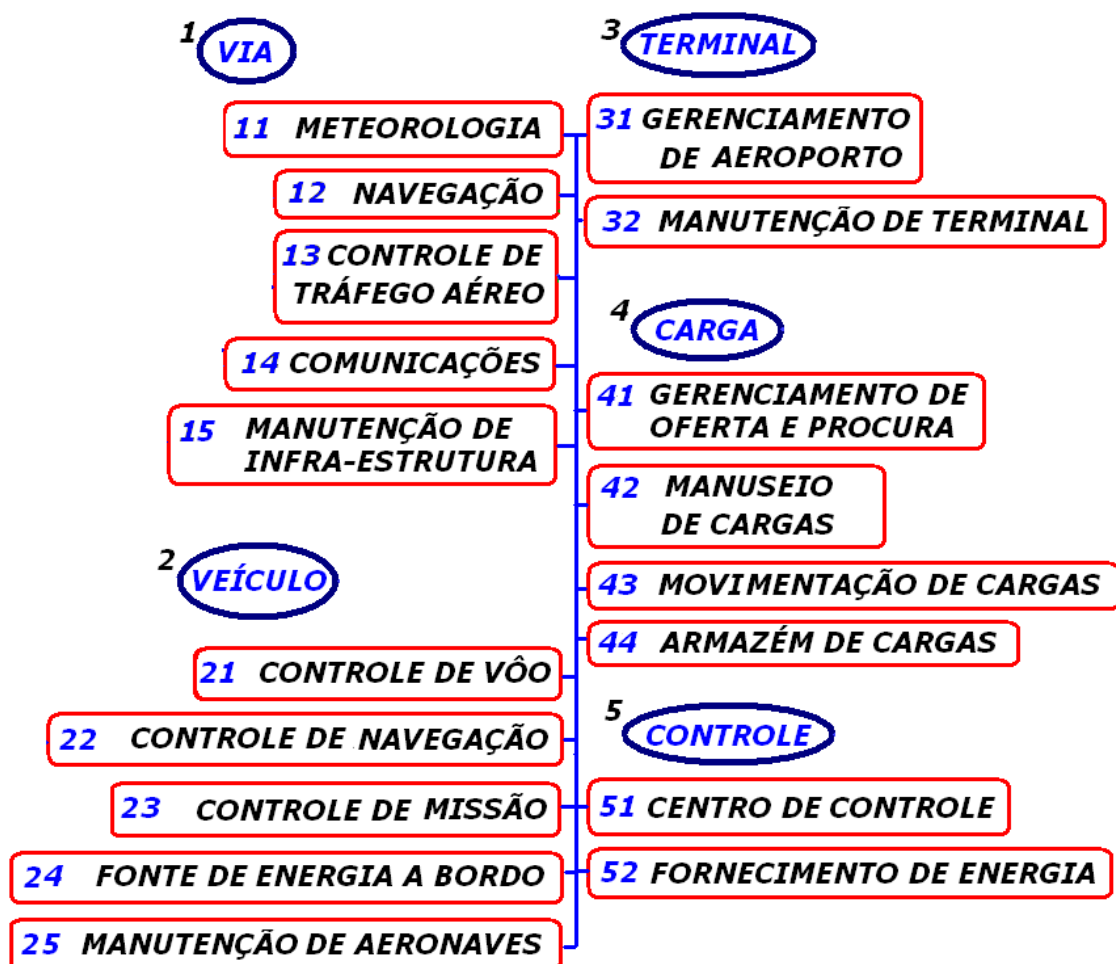


Figura 31. Diagrama funcional do SAAC com seus subsistemas gerais.

(Fonte: O autor).

Apresenta-se na figura 31 o diagrama funcional dos sistemas do SAAC em vista a ressaltar suas relações internas. Observa-se os blocos funcionais dos subsistemas de um conjunto maior, e as linhas de relação entre os blocos que representam de um modo geral as relações de definição do sistema complexo.

Observe-se que alguns dos itens relacionados na figura 31 podem ser ainda divididos em outros subsistemas, já que alguns são classificações de grupos com funções comuns que guardam complexidade desde o ponto de vista do tráfego aéreo. Esta situação pode se esclarecer na análise adicional realizada na caracterização funcional geral do sistema exposta a seguir.

## **7.2 CARACTERIZAÇÃO FUNCIONAL DOS SUBSISTEMAS**

Os subsistemas do SAAC podem se agrupar em 5 tipos atendendo à classificação de componentes de um sistema de transporte em geral (via, veículo, terminal, carga e controle.) A seguir se descrevem os subsistemas e se mencionam as variáveis de entrada e saída de cada um. Na sua maioria estes subsistemas são automatizados, pois são sistemas computadorizados que realizam suas funções através de programas informáticos. Outros deles, como o centro de controle e os sistemas de manutenção, são mistos, combinando operadores humanos e automação.

O plano previsto para um itinerário em uma aeronave é tradicionalmente conhecido como *Plano de Voo*; no caso das aeronaves não tripuladas se usará o termo *programa de missão*, mais adequado à descrição do conjunto de operações necessárias ao deslocamento da carga num prazo determinado, sob condições de segurança, eficiência e eficácia.

### **7.2.1 Subsistemas de aerovia**

#### **\* Meteorologia, (subsistema 11)**

Função:

Reunir as informações do estado do tempo atmosférico existente em todas as aerovias disponíveis do sistema, e disponibilizá-lo para os centros de navegação, de tráfego aéreo e para os programadores de missões. O

subsistema obtém informação do serviço de informação do Instituto Nacional de Meteorologia e com as próprias estações remotas de monitoramento.

Variáveis de entrada:

u01-1 Dados de centrais remotas de monitoramento.

u01-2 Boletim meteorológico do Instituto Nacional de meteorologia.

Variáveis de saída:

y11-1 Boletim meteorológico

\* **Navegação**, (subsistema 12)

Função:

Elaborar e controlar os programas de missão da frota de aeronaves não tripuladas, baseados nas informações de meteorologia, de demanda de viagens e de controle de tráfego. Os programas de missão são entregues ao controle de tráfego e ao controle automatizado a bordo da aeronave, contendo informação de velocidades, alturas e rotas do itinerário, assim como quantidade de carga e prazos de saída e arribação nos terminais. Note-se que este sistema recebe uma variável de retroalimentação do sistema de controle de tráfego aéreo, pois precisa regular a utilização de aerovias e terminais.

Variáveis de entrada:

u41-1 Solicitação de voos

u11-1 Boletim meteorológico

u15-2 Estado funcional de infra-estrutura viária

u32-2 Estado funcional de terminais

u13-2 Nível de utilização de rotas e terminais

u13-1 Abertura no tráfego aéreo

Variáveis de saída:

y12-1 Programa de missão (para cada aeronave)

\* **Controle de tráfego aéreo**, (subsistema 13)

Função:

Gerir o espaço aéreo do sistema (as aerovias e terminais) para realizar os programas de missão das aeronaves automatizadas de acordo com os parâmetros de segurança e efetividade. (Eficácia + eficiência). Conta com os centros de controle de tráfego de rota e de controle de tráfego em trânsito para realizar esta função, assim como os centros de controle de tráfego em aeroporto, a saber: Controle de tráfego de aproximação/decolagem, de trânsito em terra, pátios de carga e estacionamento.

Variáveis de entrada:

- u12-1 Programa de missão
- u51-1 Parâmetros de segurança de tráfego
- u51-2 Parâmetros de gestão de tráfego

Variáveis de saída:

- y13-1 Abertura no tráfego aéreo
- y13-2 Nível de utilização de rotas e terminais

\* **Comunicações**, (subsistema 14)

Função:

Gerir, monitorar e controlar o sistema de comunicações digitais e analógicas do sistema. Conta-se com canais com e sem fio, sentido duplo ou simples, ponto a ponto ou radiodifusão, em diversas topologias de rede. O subsistema de comunicações recebe e transporta todas as variáveis internas do sistema e garante sua integridade e entrega no destinatário.

Variáveis de entrada e variáveis de saída: todas as dos subsistemas.

\* **Manutenção de infra-estrutura viária**, (subsistema 15)

Função:

Manter a infra-estrutura viária do sistema de transporte em condições de funcionamento seguro, eficiente e eficaz.

Variáveis de entrada:

- u51-5 Plano de manutenção de infra-estrutura viária

Variáveis de saída:

y15-1 Manutenção de infra-estrutura viária  
y15-2 Estado funcional de infra-estrutura viária.

## 7.2.2 Subsistemas de aeronave

### \* **Controle de voo**, (subsistema 21)

Função:

Realizar as operações primárias necessárias para o controle de voo da aeronave, tais como manobras das superfícies de controle, trem de pouso, gestão de energia e força motriz, calefação ou resfriamento, etc.

Variáveis de entrada:

u23-2 Programa de atuação da aeronave  
u22-1 Requerimento de correção de curso

Variáveis de saída:

y21-1 Requerimento de energia.

### \* **Controle de navegação**, (subsistema 22)

Função:

Cumprir o itinerário previsto no programa de missão, através dos cálculos e medições de variáveis de rota e do monitoramento do deslocamento da aeronave.

Variáveis de entrada:

u23-1 Programa de navegação

Variáveis de saída:

y22-1 Requerimento de correção de curso.

### \* **Controle de missão**, (subsistema 23)

Função:

Realizar as operações necessárias à decolagem, deslocamento e pouso seguros, eficientes e eficazes da aeronave e sua carga, assim, como também

as operações de carga, descarga, abastecimento e balanceamento da aeronave, etc., necessárias ao cumprimento do programa de missão.

Variáveis de entrada:

- u12-1 Programa de missão
- u42-1 Programa de manutenção de carga
- u25-2 Estado funcional de aeronaves
- u32-2 Estado funcional de terminais

Variáveis de saída:

- y23-1 Programa de navegação
- y23-2 Programa de atuação da aeronave.

\* **Fonte de energia a bordo**, (subsistema 24)

Função:

Fornecer a energia necessária para a operação segura, eficiente e eficaz da aeronave. As formas de energia requeridas pela aeronave são força motriz, energia elétrica, energia pneumática e energia hidráulica. Estas formas de energia podem se entregar com regulação de variável passante ou de variável transversa. Mesmo sem que se indique expressamente, a variável de saída de este subsistema se assume como sendo entrada para os outros subsistemas da aeronave.

Variáveis de entrada:

- u21-1 Requerimento de energia

Variáveis de saída:

- y24-1 Alimentação de energia.

\* **Manutenção de aeronaves**, (subsistema 25)

Função:

Manter as aeronaves e seus sistemas básicos de suporte em condições de aeronavegabilidade.

Variáveis de entrada:

- u51-3 Plano de manutenção de aeronaves



Variáveis de saída:

y25-1 Manutenção de aeronaves

y25-2 Estado funcional de aeronaves.

### 7.2.3 Subsistemas de terminal

#### \* **Gerenciamento de aeroporto**, (subsistema 31)

Função:

Explorar e monitorar os recursos de terminal através dos planos de gestão, ambientais, melhora e segurança na operação do sistema de transporte. Dentro da dinâmica do sistema o gerenciamento de aeroporto recebe uma variável de retroalimentação negativa que garante sua regulação e contribui para sua estabilidade.

Variáveis de entrada:

u41-2 Utilização do sistema

u51-6 Plano de gestão de terminais

Variáveis de saída:

y31-1 Gestão de terminais.

#### \* **Manutenção de terminal**, (subsistema 32)

Função:

Manter os terminais e seus sistemas básicos de suporte em condições de funcionamento seguro, eficiente e eficaz.

Variáveis de entrada:

u51-6 Plano de gestão de terminais

u51-4 Plano de manutenção de terminais

Variáveis de saída:

y32-1 Manutenção de terminal

y32-2 Estado funcional de terminais.

## 7.2.4 Subsistemas de carga

### \* **Gerenciamento de oferta e procura**, (subsistema 41)

Função:

Progredir à maior utilização do sistema de transporte, explorar e monitorar os recursos de terminal através dos planos de gestão, ambiental, melhora e segurança na operação do sistema de transporte. Dentro da dinâmica do sistema o gerenciamento de aeroporto recebe a variável de retroalimentação negativa que garante sua regulação e contribui para sua estabilidade.

Variáveis de entrada:

- u01-3 Procura de transporte de carga
- u01-4 Concorrência de transporte de carga
- u01-5 Ambiente econômico – social - ecológico - político

Variáveis de saída:

- y41-1 Solicitação de voos
- y41-2 Utilização do sistema
- y41-3 Programa de publicidade e comercialização.

### \* **Manuseio de cargas**, (subsistema 42)

Função:

Manter as diferentes classes de cargas em condições de conservação adequadas, através das diferentes movimentações e armazenagens, desde o momento da recepção até a entrega, com segurança, eficiência e eficácia.

Variáveis de entrada:

- u41-1 Solicitação de voos

Variáveis de saída:

- y42-1 Programa de manutenção de carga
- y42-2 Programa de manuseio de carga
- y42-3 Programa de armazenagem de carga

### \* **Movimentação de cargas**, (subsistema 43)

Função:

Realizar o deslocamento de cargas desde o ponto de recepção, nas vias internas do terminal e armazém até a aeronave, com segurança, eficiência e eficácia.

Variáveis de entrada:

- u42-1 Programa de manutenção de carga
- u42-2 Programa de manuseio de carga
- u42-3 Programa de armazenagem de carga

Variáveis de saída:

- y43-1 Movimentação de cargas nos terminais
- Y43-2 Deslocamento aéreo de cargas.

\* **Armazém de cargas**, (subsistema 44)

Função:

Realizar a armazenagem de cargas a transportar ou a entregar, com segurança, eficiência e eficácia.

Variáveis de entrada:

- u42-1 Programa de manutenção de carga
- u42-2 Programa de manuseio de carga
- u42-3 Programa de armazenagem de carga

Variáveis de saída:

- y44-1 Armazenagem de cargas.

## 7.2.5 Subsistemas de controle

\* **Centro de controle**, (subsistema 51)

Função:

Realizar e monitorar os planos de gestão, ambiental, melhora e segurança na operação do sistema de transporte. Dentro da dinâmica do sistema, o centro de controle recebe a variável de retroalimentação negativa que garante sua

regulação e contribui para sua estabilidade. O conjunto de todas as variáveis de saída do subsistema recebe o nome de *Plano de Gestão do SAAC*.

Variáveis de entrada:

- u01-3 Procura de transporte de carga
- u01-4 Concorrência de transporte de carga
- u01-5 Ambiente econômico – social - ecológico – político
- u32-2 Estado funcional de terminais.
- u25-2 Estado funcional de aeronaves.
- u15-2 Estado funcional de infra-estrutura viária.
- u13-2 Nível de utilização de rotas e terminais
- u41-2 Utilização do sistema

Variáveis de saída:

- y51-1 Parâmetros de segurança de tráfego
- y51-2 Parâmetros de gestão de tráfego
- y51-3 Plano de manutenção de aeronaves
- y51-4 Plano de manutenção de terminais
- y51-5 Plano de manutenção de infra-estrutura viária
- y51-6 Plano de gestão de terminais
- y51-7 Plano energético do SAAC.

\* **Fornecimento de energia**, (subsistema 52)

Função:

Fornecer a energia necessária para a operação segura, eficiente e eficaz do sistema. As formas de energia requeridas pelo sistema são força motriz, energia elétrica, energia pneumática e energia hidráulica. Estas formas de energia podem se entregar com regulação de variável passante ou de variável transversa. Mesmo sem que se indique expressamente, a variável de saída de este subsistema se assume como sendo entrada para os outros subsistemas do SAAC.

Variáveis de entrada:

- u51-7 Plano energético do SAAC

Variáveis de saída:

y52-1 Alimentação de energia.

### 7.3 RELAÇÕES DE DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

As relações que ligam os subsistemas do SAAC são lineares e simples. Cada saída de um sistema corresponde à entrada de outro subsistema que tiver os mesma nomenclatura como é ilustrado na figura 32. Uma variável de saída de um subsistema pode alimentar vários outros subsistemas, e no caso particular da variável fornecimento de energia, ela é uma entrada para todos os subsistemas, mesmo que não seja indicado nos diagramas. As relações de definição se enunciam na tabela 12, a seguir:

Tabela 12. As variáveis do SAAC e suas relações de definição.

#	Código	Nome da variável	Relação de Definição
1	01-1	Dados de centrais remotas de monitoramento.	Entrada do sistema
2	01-2	Boletim do Instituto de meteorologia.	Entrada do sistema
3	01-3	Procura de transporte de carga	Entrada do sistema
4	01-4	Concorrência de transporte de carga	Entrada do sistema
5	01-5	Ambiente econômico, social, ecológico, político	Entrada do sistema
6	11-1	Boletim meteorológico	$u_{11-1} = y_{11-1}$
7	12-1	Programa de missão	$u_{12-1} = y_{12-1}$
8	13-1	Abertura no tráfego aéreo	$u_{13-1} = y_{13-1}$
9	13-2	Nível de utilização de rotas e terminais	$u_{13-2} = y_{13-2}$
10	15-1	Manutenção de infra-estrutura viária	Saída suprimida
11	15-2	Estado funcional de infra-estrutura viária	$u_{15-2} = y_{15-2}$
12	21-1	Requerimento de energia	$u_{21-1} = y_{21-1}$
13	22-1	Requerimento de correção de curso	$u_{11-1} = y_{21-1}$
14	23-1	Programa de navegação	$u_{23-1} = y_{23-1}$
15	23-2	Programa de atuação da aeronave	$u_{23-2} = y_{23-2}$
16	24-1	Alimentação de energia	Saída suprimida
17	25-1	Manutenção de aeronaves	Saída suprimida
18	25-2	Estado funcional de aeronaves	$u_{25-2} = y_{25-2}$
19	31-1	Gestão de terminais	Saída suprimida
20	32-1	Manutenção de terminal	Saída suprimida
21	32-2	Estado funcional de terminais	$u_{32-2} = y_{32-2}$
22	41-1	Solicitação de voos	$u_{41-1} = y_{41-1}$
23	41-2	Utilização do sistema	$u_{41-2} = y_{41-2}$

24	41-3	Programa de publicidade e comercialização	Saída do sistema
25	42-1	Programa de manutenção de carga	u42-1 = y42-1
26	42-2	Programa de manuseio de carga	u42-2 = y42-2
27	42-3	Programa de armazenagem de carga	u42-3 = y42-3
28	43-1	Movimentação de cargas nos terminais	Saída suprimida
29	43-2	Deslocamento aéreo de cargas	Saída do sistema
30	44-1	Armazenagem de cargas	Saída suprimida
31	51-1	Parâmetros de segurança de tráfego	u51-1 = y51-1
32	51-2	Parâmetros de gestão de tráfego	u51-2 = y51-2
33	51-3	Plano de manutenção de aeronaves	u51-3 = y51-3
34	51-4	Plano de manutenção de terminais	u51-4 = y51-4
35	51-5	Plano de manutenção de infra-estrutura viária	u51-5 = y51-5
36	51-6	Plano de gestão de terminais	u51-6 = y51-6
37	51-7	Plano energético do SAAC	u51-7 = y51-7
38	52-1	Alimentação de energia	Saída suprimida

(Fonte: O autor).

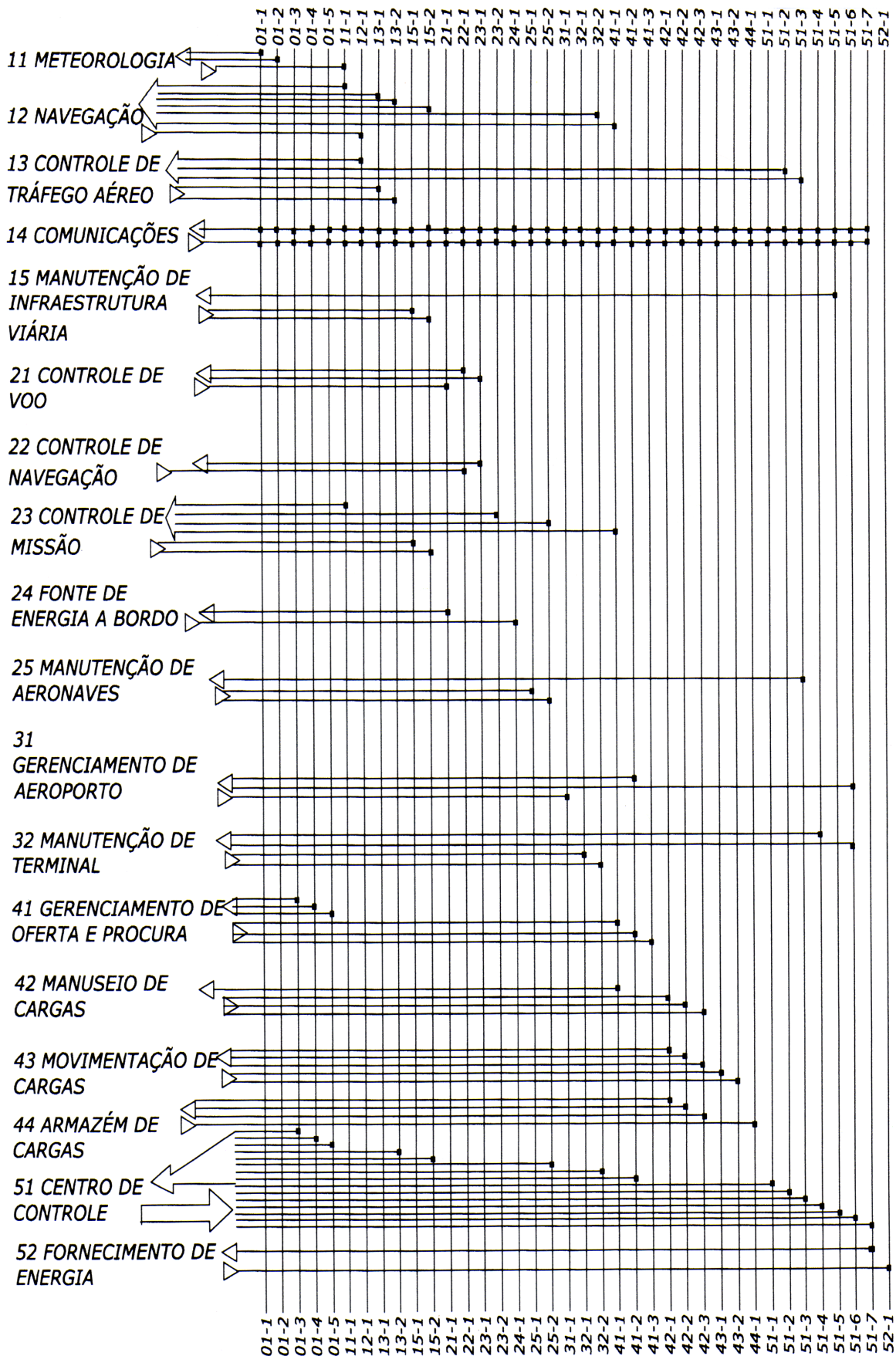


FIGURA 32. Modelo conceitual simbólico do SAAC.

## **CAPÍTULO 8**

### **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste estudo, o pressuposto do meio em que se desloca o tráfego aéreo ser isomorfo e contínuo determinou a base teórica obtida. Entretanto, outra teoria igualmente ampla pode ser desenvolvida no caso de meio não isomorfo, por exemplo, com ocasião de alterações ou perturbações, tais como condições climáticas, interferência ilícita e falhas dos equipamentos de comunicações, de controle ou de transporte.

Mesmo a teoria desenvolvida aqui pode ser completada com outras variáveis, sejam estas já apresentadas neste trabalho, para ampliar seu estudo, ou as que não foram tratadas, como a capacidade da aerovia e a velocidade de propagação de interações na mesma.

As analogias do tráfego de veículos aéreos, por exemplo com o fluxo de fluídos no interior de dutos, ou com as correntes elétricas, dentre outras, foi tratado aqui apenas em seus alcances fundamentais, tendo ainda propriedades e consequências por explorar e analisar em futuros trabalhos. Também aplica o mesmo para o número de *Reynolds* e sua relação com os fluxos turbulento e laminar.

O trabalho se focou na modelagem, sem abranger a otimização do sistema, que seria o próximo patamar a ser atingido nesta linha de pesquisa. Nesta fase, poderia se encontrar, por exemplo, o ponto de máxima eficiência energética, a melhor distribuição de tráfego segundo a massa aerotransportada ou a capacidade ideal da aerovia para um intervalo de densidades de tráfego.

Outro dos aspectos não abordados neste trabalho, que merece especial atenção é a análise energética, sendo uma área suficientemente complexa e ampla para desenvolver trabalhos de pesquisa exclusivos neste tema.

Da mesma maneira, mais um dos aspectos relevantes no estudo das correntes de fluxo de tráfego para SAACs, e que não foi tratado aqui, é a Divisão de Grupos para análise, já que o estudo desenvolvido neste trabalho se refere à consideração do fluxo de tráfego como um único grupo de aeronaves que se desloca na aerovia. Entretanto, para analisar grandes contingentes de aeronaves no interior da corrente de tráfego,



pode ser utilidade a divisão do grupo maior em pequenos grupos de forma a facilitar o cálculo.

## **CAPÍTULO 9**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

Através da revisão das variáveis e dos fundamentos envolvidos nos diferentes modelos teóricos e heurísticos de fenômenos de transporte, procedentes de áreas diversas tais como os circuitos elétricos, tráfego terrestre e aéreo, foi possível formular um conjunto de relações que descrevem o comportamento do tráfego aéreo dos SAACs. Assim, as relações apresentadas ou deduzidas neste trabalho serviram de base à construção do modelo matemático proposto no item 6, e ao mesmo tempo permitem ressaltar as seguintes conclusões importantes:

Efetivamente, foram apresentados 3 grupos de variáveis a caracterizar o fluxo de tráfego de SAACs, que de acordo com o exposto nos objetivos deste trabalho, serão chamadas variáveis características do sistema. Classifica-se agora estas variáveis nos 3 grupos da seguinte maneira:

1. Variáveis topológicas do sistema, chamadas desta forma porque dependem da topologia da aerovia, tais como as velocidades e a massa aerotransportada.
2. Variáveis de características da corrente de tráfego, tais como o fluxo, as densidades, concentração, agrupamento, espaçamento, intervalo e ocupação,
3. Variáveis de segurança, tais como as margens de segurança.

Por outra parte, foi possível concluir que as relações representadas nas equações usadas no item 6, constituem as Relações Terminais do Sistema que foram formuladas como segundo objetivo do trabalho. Estas relações cumprem com o objetivo de relacionar as variáveis características do sistema para descreve-lo funcionalmente.

Através do caminho descrito também foi possível combinar a abordagem sistêmica, os modelos de fluxo de tráfego terrestre, de controle de tráfego aéreo e a teoria de controle automático para caracterizar o tráfego aéreo de SAACs.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAC, 2005, *Anuário Estatístico do Transporte Aéreo 2005*, V. 1. disponível em: <<http://www.portalbrasil.net/downloads/anuario2005.pdf>>, acesso em 29 de novembro de 2006.

ANAC, 2006, *Anuário do Transporte Aéreo 2006*, V. 1. disponível em: <<http://www.portalbrasil.net/downloads/anuario2006.pdf>>, acesso em 18 de dezembro de 2007.

ANAC, 2007, *Anuário do Transporte Aéreo 2007*, V. 1. disponível em: <<http://www.portalbrasil.net/downloads/anuario2007.pdf>>, acesso em 8 de julho de 2008.

ANAC, 2008a, *Anuário do Transporte Aéreo 2008, Volume 1:Dados Estatísticos*, 1 ed., disponível em: <<http://www.portalbrasil.net/downloads/anuario2008.pdf>>, acesso em 11 de junho de 2009.

ANAC, 2008b, RBHA, *Regulamento Brasileiro de Homologação aeronáutica*, RBHA 01, Definições Simbologia e Siglas, DOU 2003/DAC 2005.

ANAC, 2008c, RBHA, *Regulamento Brasileiro de Homologação aeronáutica*, RBHA 91, Regras gerais para operação de aeronaves civis, DOU 2003/DAC 2005.

AZAMBUJA, R. A., 2004, *Teoria Geral de Sistemas*, Universidade Regional de Blumenau – Centro de ciências exatas e naturais, Blumenau, SC.

AIRBUS, 2009, *Aircraft Families A320/ Specifications*, disponível em: <<http://www.airbus.com/en/aircraftfamilies/a320/a320/specifications.html>>, acesso em 9 de março de 2009.

BRASIL, 1986, Lei 7565 de 19 de dezembro de 1986, Dispõe sobre o *Código Brasileiro de Aeronáutica*, Diário Oficial da União, 23 de Dezembro de 1986, Seção 1, p.19567 e 30 de Dezembro de 1986, Seção 1, p.19935, Poder Executivo, Brasília, DF.

CFM, 2009, *CFM-7B Technology*, disponível em: <<http://www.cfm56.com/products/cfm56-7b/9660>>, acesso em 4 de abril de 2009.

DECEA, 2007, *Carta de área, ARC, Navegantes, Florianópolis, Curitiba*, efetivação em 25/Out/2007, Instituto de Cartografia Aeronáutica, PAME-RJ e DECEA, Rio de Janeiro.

DECEA, 2008, *Gerenciamento do tráfego aéreo, 2008*, disponível em: <<http://www.decea.gov.br/index.php/espaco-aereo/gerenciamento-de-trafego-aereo/>>, acesso em 2 de Dezembro de 2008.

GILES, R. V., 1978, *Mecânica dos fluidos e hidráulica*, McGraw-Hill do Brasil, São Paulo.

GÓES, J. C., 1985, *Modelos para o Controle de Tráfego Aéreo: Análise e Contribuição*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

HAIGHT, F. A., 1963, *Mathematical Theories of Traffic Flow*, Academic Press, New York.

HILL, L. F., 2005, *Traffic Stream Characteristics*, in Revised Monograph on Traffic Flow Theory, 3a ed., Gartner, Messer e Rathi, editores, Washington, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, TFHRC, Turner-Fairbank Highway Research Center, McLean, VA, USA.

HOUAISS, A., 2001, *Dicionário eletrônico Houaiss de língua portuguesa*, Objetiva, Rio de Janeiro.

INFRAERO, 2006, *Movimento operacional Acumulado da Rede Infraero, 2006*, disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/upload/arquivos/movi/mov.%20operac.1206.pdf>>, acesso em 22 de Dezembro de 2007.

INFRAERO, 2008, *Movimento operacional Acumulado da Rede Infraero, 2008*, disponível em: <[http://www.infraero.gov.br/upload/arquivos/movi/mov.%20operac.\\_1208revisadoJ.pdf](http://www.infraero.gov.br/upload/arquivos/movi/mov.%20operac._1208revisadoJ.pdf)>, acesso em 29 de março de 2010.

JAA, 2000, *Airworthiness and Operational Certification of Civil Remotely Piloted Vehicles*, Position Paper, document No. pp\_026\_3, 26 de outubro de 2000, JOINT AVIATION AUTHORITIES, Paris.

KARNAUGH, M., 1953, *The Map Method for Synthesis of Combinational Logic Circuits*, in: Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, November/1953, part I-72, p. 593–599, New York.

MATTINGLY, J. D., HEISER, W. H., DALEY, D. H., 1987, *Aircraft Engine Design*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington.

Mc KORNICK, B. W., 1979, *Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics*, John Wiley & Sons, Nova Iorque.

MOREIRA, M. A., 2006, *Mapas Conceituais e Diagramas V*, Porto Alegre, Instituto de Física - Universidade Federal de Rio Grande do Sul.

OACI, 2005, *Results of a consultation with selected states and international organizations with regard to unmanned aerial vehicles (UAV)*, Documento de Trabalho AN-WP/8065 da Comissão de Navegação Aérea, Tarefa ANC No. ATM-0502. OACI – *Air Navigation Commission*, Montreal.

PÉRIO, E., 1974, *Navegación Aérea*, Hispano Europea, Barcelona.

PEREIRA, A. L., 1970, *Reflexões sobre a noção de coerência conceitual e sua importância no estudo de alguns problemas básicos de uma teoria unificada de sistemas*, Publicação 17.70, COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro.

PEREIRA, A. L., 2008, *Notas de aula sobre Teoria Geral de Sistemas*, PET - COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro.

RATHI, A. K., GARTNER, N. H., MESSER, C., et al, 2005, *Revised Monograph of Traffic Flow Theory*, 3a ed., Gartner, Messer e Rathi, editores, Washington, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, TFHRC, Turner-Fairbank Highway Research Center, McLean, VA, USA.

ROSAS, J. G. C., 1986, Uma contribuição ao estudo do controle de tráfego aéreo em área terminal., Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROGÉRIO, C., 2009, *Sala Regulamento de Tráfego Aéreo*, disponível em: <[http://www.airandinas.com/sala\\_regulamento.html](http://www.airandinas.com/sala_regulamento.html)>, acesso em 26 de Janeiro de 2009.

SKITTER, L., 1996, *General Systems Theory, an introduction*, MacMillan, Londres.

U.K. UAVS TRADE ASSOCIATION, 2005, *Questions Related To The Deployment Of Future Unmanned Aerial Vehicle Systems (UAV) Systems In European Airspace*. OACI, BANGKOK.

UVS INTERNATIONAL, 2007, *Yearbook 2006-2007, UAS: The Global Perspective*, BC & Co., Paris.

UVS INTERNATIONAL, 2008, *Yearbook 2007-2008, UAS: The Global Perspective*, BC & Co., Paris.

WARDROP, J. G., 1952, *Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research*, In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, part II, 1 (2), pp. 325-362, Reino Unido.