

**ALVARO MARTINS ABDALLA**

***OMPP para Projeto Conceitual de Aeronaves,  
Baseado em Heurísticas Evolucionárias e de  
Tomadas de Decisões***

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de pós-graduação da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Aeronaves

Orientador: Prof. Dr. Fernando Martini Catalano

**São Carlos**

**2009**



*Aos engenheiros Joseph Kovács, Michel Cury (i.m), Olympio Sambatti, Fabio Mesquita de Barros (i.m) e Muzancor Assunção (Zico) com quem tive o privilégio de conviver e muito aprender.*

## Agradecimentos

Ao meu orientador, o prof. Dr. Fernando Martini Catalano, pelo apoio incondicional e incentivo.

A toda minha família pelo incentivo, apoio e compreensão.

Aos colegas professores e funcionários da EESC/UP.

Ao grande amigo Paulo Caixeta pelas valiosas dicas e contribuições durante a execução deste trabalho.

*“Com um cristalino e uma língua, faço circular vozes em uma nuvem.”*

*Haiah*

## RESUMO

ABDALLA A. M. ***OMPP para Projeto Conceitual de Aeronaves Baseado em Heurísticas Evolucionárias e de Tomadas de Decisões.*** 2009 148p. (Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos) da Universidade de São Paulo, São Carlos 2009.

Este trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia de otimização multidisciplinar de projeto conceitual de aeronaves. O conceito de aeronave otimizada tem como base o estudo evolutivo de características das categorias imediatas àquela que se propõe. Como estudo de caso, foi otimizada uma aeronave de treinamento militar que faça a correta transição entre as fases de treinamento básico e avançado.

Para o estabelecimento dos parâmetros conceituais esse trabalho integra técnicas de Entropia Estatística, Desdobramento da Função de Qualidade (QFD), Aritmética Fuzzy e Algoritmo Genético (GA) à aplicação de Otimização Multidisciplinar Ponderada de Projeto (OMPP) como metodologia de projeto conceitual de aeronaves. Essa metodologia reduz o tempo e o custo de projeto quando comparada com as técnicas tradicionais existentes.

**Palavras chaves:** Projeto conceitual de aeronaves. Otimização multidisciplinar de projeto. Aeronaves. Entropia estatística. Desdobramento da função de qualidade (QFD). Aritmética fuzzy. Algoritmo genético (GA).

## ABSTRACT

ABDALLA A.M. *OMPP for conceptual Design of Aircraft Based on Evolutionary Heuristics and decision Making*. 2009 148p. (Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos) da Universidade de São Paulo, São Carlos 2009.

This work is concerned with the development of a methodology for multidisciplinary optimization of the aircraft conceptual design. The aircraft conceptual design optimization was based on the evolutionary simulation of the aircraft characteristics outlined by a QFD/Fuzzy arithmetic approach where the candidates in the Pareto front are selected within categories close to the target proposed. As a test case a military trainer aircraft was designed target to perform the proper transition from basic to advanced training. The methodology for conceptual aircraft design optimization implemented in this work consisted on the integration of techniques such statistical entropy, quality Function deployment (QFD), arithmetic fuzzy and genetic algorithm (GA) to the weighted multidisciplinary design optimization (WMDO). This methodology proved to be objective and well balanced when compared with traditional design techniques.

Key words: Conceptual aircraft design,

**Key words:** Conceptual aircraft design. Multidisciplinary design optimization. Aircraft. Statistical entropy. Quality function deployment (QFD). Fuzzy arithmetic. Genetic algorithm (GA).

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características da aeronave Primário I .....	33
Tabela 2 - Características da aeronave Universal T-25 .....	34
Tabela 3 - Características da aeronave Tucano T-27 .....	35
Tabela 4 - Características da aeronave BAE Hawk .....	36
Tabela 5 - Validação Weissinger .....	70
Tabela 6 - Aeronaves Seleccionadas e Categorias Correspondentes .....	107
Tabela 7 - Resultados da Entropia Estatística .....	107
Tabela 8 - Necessidades do Requerente .....	108
Tabela 9 - Limites das Variáveis.....	110
Tabela 10 - Missões Típicas .....	110
Tabela 11 - Parâmetros de Entrada para o Algoritmo Genético.....	112
Tabela 12 – Soluções Ótimas CA-01 .....	117
Tabela 13 – Características de Aeronaves da Base de Dados e CA-01. ....	118
Tabela 14 – Soluções Ótimas CA-03. ....	124
Tabela 15 – Características de Aeronaves da Base de Dados e CA-03.....	125
Tabela 16 – Resultados do Estudo de Caso 03. ....	143
Tabela 17 – Resultados do Projeto Conceitual em PCA.....	149



## Lista de Figuras

<i>Figura 01 - Processo de Desenvolvimento de Aeronaves</i> .....	31
<i>Figura 02 - Treinador Primário I – eng. Kovács</i> .....	34
<i>Figura 03 - Treinador Básico Universal T-25</i> .....	35
<i>Figura 04 - Treinador Avançado Tubo-Hélice Tucano T-27</i> .....	36
<i>Figura 05 - Treinador Avançado a Jato Hawk</i> .....	37
<i>Figura 06 - Otimização Multidisciplinar de Projeto</i> .....	39
<i>Figura 07 - Douglas DC-3</i> .....	42
<i>Figura 08 - Douglas DC-7</i> .....	43
<i>Figura 09 - Representação seqüência de um projeto com distâncias da informação</i> .....	46
<i>Figura 10 - Representação esquemática de difusão.</i> .....	47
<i>Figura 11 - Representação esquemática de convergência.</i> .....	48
<i>Figura 12 - Quadro Difusão e Convergência</i> .....	50
<i>Figura 13 - Opinião do cliente: representação quantitativa.</i> .....	54
<i>Figura 14 - Avaliação Final de Importância da Necessidade do Cliente</i> .....	54
<i>Figura 15 - Escala de Avaliação com Nove Pontos</i> .....	55
<i>Figura 16 - Número fuzzy triangular</i> .....	56
<i>Figura 17 - Número fuzzy triangular em escala</i> .....	57
<i>Figura 18 - Função fuzzy</i> .....	58
<i>Figura 19 - Vórtices de ferradura</i> .....	66
<i>Figura 20 - Pontos de controle</i> .....	67
<i>Figura 21 - Detalhe da Estrutura da Asa.</i> .....	71
<i>Figura 22 - Definição da fuselagem</i> .....	75
<i>Figura 23 - Linha de Arqueamento da fuselagem</i> .....	76
<i>Figura 24 - Divisão da Fuselagem</i> .....	77
<i>Figura 25 - Manobra Parafuso, Entrada e Saída.</i> .....	80
<i>Figura 26 - Esteira no Leme de Direção</i> .....	81
<i>Figura 27 - Ângulo do Vento Relativo Assumido 45 graus e Divergência 15 graus</i> .....	83
<i>Figura 28 - Ângulo do Vento Relativo Assumido 30 graus e Divergência 15 graus</i> .....	83
<i>Figura 29 - Ângulo do Vento Relativo assumido 45 graus e divergência 15 graus</i> .....	84
<i>Figura 30 - Requisitos de Empenagem Considerando a Densidade Relativa <math>\mu</math></i> .....	85
<i>Figura 31- Componente Arrasto Induzido</i> .....	88
<i>Figura 32 - Downwash da Asa</i> .....	88
<i>Figura 33 - Diagrama de Blocos da Otimização</i> .....	92
<i>Figura 34 - Modulo de Abertura e Banco de Dados</i> .....	93
<i>Figura 35 - Modulo PCA</i> .....	94
<i>Figura 36 - Modulo Entropia Estatística</i> .....	96
<i>Figura 37 - Modulo QFD / FUZZY</i> .....	98
<i>Figura 38 - Modulo Algoritmo Genético – Principal</i> .....	100
<i>Figura 39 - Modulo Algoritmo Genético – Avaliação</i> .....	100
<i>Figura 40 - Modulo Seleção da Solução Ótima</i> .....	101
<i>Figura 41 - Resultados – Entropia Estatística II</i> .....	114
<i>Figura 42 - Entropia II – Solução Exponencial e Fronteira de Pareto</i> .....	115

<i>Figura 43 - Resultados - Algoritmo Genético</i> .....	116
<i>Figura 44 - Asa com reservatório estrutural – Estudo de caso 01</i> .....	120
<i>Figura 45 - Seções Típicas de Cavernas Escolhidas</i> .....	121
<i>Figura 46 - Perspectiva para Seções da Fuselagem – Estudo de Caso 01</i> .....	121
<i>Figura 47 - Vista Lateral para Seções da Fuselagem – Estudo de Caso 01</i> .....	122
<i>Figura 48 - Desenhos da aeronave - Estudo de Caso 01</i> .....	122
<i>Figura 49 - Resultados - Algoritmo Genético</i> .....	123
<i>Figura 50 - Asa com reservatório estrutural – Estudo de caso 03</i> .....	125
<i>Figura 51 - Seções Típicas de Cavernas Escolhidas</i> .....	127
<i>Figura 52 - Perspectivas para Seções da Fuselagem – Estudo de Caso 03</i> .....	128
<i>Figura 53 - Vista Lateral para Seções da Fuselagem – Estudo de Caso 03</i> .....	128
<i>Figura 54 - Desenhos da aeronave - Estudo de Caso 03</i> .....	129
<i>Figura 55 - Comparação Aeronave Pilatus PC-21 e CA-03</i> .....	150

## Sumário

1	Introdução .....	14
1.1	Objetivo .....	15
2	Revisão Bibliográfica .....	18
2.1	Otimização .....	18
2.2	Otimização do Projeto .....	18
2.3	Otimização Unidisciplinar do Projeto Conceitual ou em Área Específica .....	19
2.4	Otimização Multidisciplinar do Projeto Conceitual .....	21
2.5	Aspectos Únicos e Contribuições do Trabalho .....	23
3	Metodologia de Projeto de Aeronaves .....	25
3.1	Requisitos ou Especificações de Projeto .....	27
3.2	Base de Dados e Projeto Paramétrico .....	28
3.3	A Síntese .....	29
3.4	As Fases do Projeto .....	30
3.4.1	Projeto Conceitual .....	31
3.4.2	Projeto Preliminar .....	32
3.4.3	Projeto Detalhado .....	32
3.5	Aeronaves de Treinamento Militar .....	32
4	Metodologias Aplicadas .....	38
4.1	Otimização Multidisciplinar de Projetos .....	38
4.2	Entropia Estatística .....	40
4.2.1	Características Técnicas e de Serviço .....	43
4.2.2	A Medida de Distância Dinâmica com Base na Teoria da Informação .....	44
4.2.3	A Medida de Transição Crítica .....	46
4.2.4	A Difusão e Convergência .....	46
4.2.5	Aplicação – Entropia Estatística .....	51
4.3	Desdobramento da Função de Qualidade e Teoria Fuzzy – QFD/Fuzzy .....	52
4.3.1	Avaliação da Importância Relativa e Método Fuzzy .....	55
4.3.2	Avaliação Direta do Requerente .....	55
4.3.3	Teoria Fuzzy .....	56
4.3.4	Numero Fuzzy Triangular .....	56
4.3.5	Representação Fuzzy de Avaliação .....	57
4.3.6	Aplicação – QFD/Fuzzy .....	58

4.4	Algoritmo Genético.....	60
4.4.1	Codificação – Criação da População e Avaliação.....	61
4.4.2	Seleção e Reprodução.....	61
4.4.3	Cruzamento.....	61
4.4.4	Mutação.....	62
4.4.5	Número de Gerações.....	62
4.4.6	A População e as Vantagens da Aplicação de AGs.....	62
4.4.7	Algoritmo Genético Multi-Objetivo - Ótimo de Pareto.....	63
4.4.8	Aplicação.....	65
4.5	Método Weissinger – Cargas Aerodinâmicas.....	65
4.5.1	Validação do Método de Weissinger.....	68
4.6	Método Matricial – Estrutura da Longarina.....	70
4.7	Momento de Fuselagem, Área Molhada da Fuselagem e Volume de Cabine.....	73
4.7.1	A Confeção da Fuselagem.....	76
4.8	A Manobra Parafuso.....	78
4.8.1	Cálculos de Parâmetros.....	81
4.9	O Arrasto Aerodinâmico.....	86
4.9.1	Arrasto de Forma ou Pressão – <b><i>Dfo</i></b> .....	87
4.9.2	Arrasto de Fricção – <b><i>Dfr</i></b> .....	87
4.9.3	Arrasto Induzido – <b><i>Di</i></b> .....	87
4.10	Downwash.....	88
5	Diagrama de Blocos e Fluxograma.....	92
6	Elementos de Projeto.....	103
7	Estudo de Casos.....	105
7.1	Projeto do Conceito de Aeronave.....	105
7.2	Avaliação das Necessidades do Cliente para Otimização.....	108
7.3	Otimização.....	109
7.4	Resultados e Discussões.....	112
7.4.1	Métodos de Escolha da Solução Ótima Única.....	112
7.4.2	Estudo de Caso 01.....	115
7.4.3	Estudo de Caso 03.....	123
8	Conclusões.....	131
9	Pesquisas e Trabalhos Futuros.....	133
10	Apêndices.....	134

10.1	Apêndice A.....	134
10.2	Apêndice - B.....	141
10.3	Apêndice - C.....	143
10.4	Apêndice - D.....	150
10.5	Apêndice - E.....	151
11	Refêrencias Bibliográficas .....	152