UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ÁREA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

ALGORITMO GENÉTICO APLICADO À OTIMIZAÇÃO
DE ASAS DE MATERIAL COMPÓSITO DE VEÍCULOS
AÉREOS NÃO TRIPULADOS

Eng^o KLAUS WIDMAIER

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Fernando M. Catalano

São Carlos

2005

A meus pais, Kuno (in memorian) e Nelsi.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Orientador Prof. Dr. Fernando Martini Catalano, pela orientação, pelos valiosos conhecimentos transmitidos e pela amizade ao longo deste trabalho de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de estudo concedida.

Às secretárias Elisabeth Maria Alves Alexandre e em especial a Ana Paula Bueno Bardelotte, pelo auxílio nas questões burocráticas.

Ao Prof. Dr. Jonas de Carvalho, pela primeira orientação e estímulo.

Ao Prof. Dr. João Lirani, pelas valiosas aulas de elementos finitos.

Ao Prof. Dr. Michael Maunsell, pela amizade e pelas agradáveis aulas de aerodinâmica aplicada.

Ao Prof. Dr. Flavio Donizeti Marques, pela amizade e auxílio nas bases da teoria dos Algoritmos Genéticos.

Aos colegas do LAE, pela amizade e coleguismo.

Ao amigo Mariano Eduardo Moreno, pelo vital auxílio técnico.

À Ana, pelo exemplo de dedicação à pesquisa e pelo auxílio na área de biologia.

A todos os amigos da pós-graduação, pelo companheirismo e momentos inesquecíveis.

A todos os amigos da Embraer, pelas críticas construtivas.

“Não se iludam. A ciência não está alicerçada na rocha. A vasta estrutura de suas teorias ergue-se sobre um pântano. É como um edifício sustentado por estacas que mergulham num terreno movediço mas não atingem nenhuma base natural. Muitas questões fundamentais para a ciência continuam em aberto. Se não queremos nos ver reduzidos a meras fatias do conhecimento oficial, precisamos manter abertas também as nossas mentes”.

Karl Popper

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iii
SUMÁRIO	i
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	3
1.2 Descrição dos capítulos	3
2. VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT)	6
2.1 Uso e aplicações	8
2.1.1 Principais aplicações civis	9
2.1.2 Principais aplicações militares	10
2.1.3 Carga típica	13
2.1.4 Especificações típicas da missão de um VANT:	13
2.2 Operação dos VANTs	14
2.2.1 Decolagem	14
2.2.2 Navegação	15
2.2.3 Pouso	16
2.3 Custos aproximados de operação e desenvolvimento de um VANT	17
2.4 Certificação e regulamentação	19
2.5 Iniciativas de VANTs no Brasil	22
2.5.1 Acauã - CTA	22
2.5.2 Arara Embrapa / USP	22
2.5.3 Aurora CenPRA	23
2.5.4 Projeto VANT Finep	24
2.6 Análise Paramétrica	25
2.7 Características típicas de projeto	39
2.7.1 Sistema de propulsão	40
2.7.2 Estrutura de materiais compósitos	42
2.7.3 Asa com baixo arrasto induzido	43
2.7.4 Configuração da fuselagem e cauda	49

2.7.5	Trem de pouso	52
2.7.6	Sistemas de navegação, telemetria e transmissão de dados	52
3.	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	54
3.1	Mecânica dos Materiais Compósitos	56
3.2	Teoria de falha	58
3.3	Características de alguns dos típicos Materiais Constituintes.....	60
3.3.1	Fibra de Carbono	60
3.3.2	Fibra de vidro.....	61
3.3.3	Fibra de Aramida (Kevlar®).....	61
3.3.4	Matriz (Resina Polimérica).....	61
3.4	Otimização utilizando Elementos Finitos	62
3.5	Otimização utilizando o Ansys®	64
3.5.1	Métodos de otimização disponíveis no Ansys®	66
3.5.2	Exemplo de aplicação de otimização com o Ansys®	66
4.	ALGORITMOS GENÉTICOS	74
4.1	Origem: A teoria da seleção natural.....	77
4.2	Fundamentos dos algoritmos genéticos	79
4.2.1	Estrutura Básica do Algoritmo Genético	81
4.2.2	Função objetivo e a aptidão	83
4.2.3	Codificação	84
4.2.4	Reprodução e Seleção	86
4.2.5	Cruzamento.....	87
4.2.6	Mutação	87
4.2.7	Outros operadores.....	88
4.2.8	Esquemas e padrões de similaridade.....	88
4.3	Aplicações de algoritmos genéticos.....	90
4.3.1	Otimização de estruturas de materiais compósitos com AG.....	91
5.	MODELAMENTO E ROTINA DE OTIMIZAÇÃO	94
5.1	Geometria da asa.....	94
5.1.1	Perfil aerodinâmico da asa.....	96
5.2	Modelo estrutural da asa em elementos finitos	97
5.2.1	Propriedades dos materiais do modelo	99
5.3	Carregamento aerodinâmico da asa	100
5.3.1	Condição de vôo limite	100
5.3.2	Distribuição do carregamento aerodinâmico	100
5.4	Implementação da rotina de otimização.....	103

5.4.1	Variáveis de projeto e decodificação do cromossomo	103
5.4.2	Aptidão do modelo da asa	107
5.4.3	Tamanho da População	110
5.4.4	Critérios de parada	110
5.4.5	Integração com o Ansys®	111
5.5	Resultados	114
5.5.1	Efeito do tamanho da população	115
5.5.2	Efeito da equação de aptidão	116
5.5.3	Efeito da probabilidade de cruzamento	120
5.5.4	Efeito da probabilidade de mutação	121
5.5.5	Efeito do Operador inversão	123
5.5.6	Efeito do Elitismo	124
5.5.7	Efeito do compartilhamento	127
5.5.8	Efeito do Escalonamento	128
5.5.9	Parâmetros finais mínimos da otimização com AG	131
5.5.10	Distribuição do critério de falha na asa otimizada	137
5.5.11	Comparação com métodos de otimização do Ansys®	141
6.	CONCLUSÃO E SUGESTÕES	144
6.1	Sobre os VANTs	144
6.2	Sobre a otimização de estruturas de material compósito com AG	144
6.3	Sugestões para pesquisas futuras	145
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147
	APÊNDICE A – Fonte do AG em Fortran	154
	APÊNDICE B - Arquivo “macro-OPT-modelo-final060603.txt”	173
	GLOSSÁRIO	181

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Bomba Voadora V1 (JANSSON, 2001).	7
FIGURA 2.2 - VANT <i>Firebee</i> usado na Coréia e Vietnã (DeGARMO, 2004).	7
FIGURA 2.3 – Fatia de mercado de cada tipo de VANT (SHAMMAI, 2005).	9
FIGURA 2.4 - Perfil de gastos anuais do Departamento de Defesa americano para VANTs, em milhões de dólares por ano (DeGARMO, 2004).	11
FIGURA 2.5 – Classificação típica utilizada para VANTs militares de reconhecimento (III CONFERÊNCIA..., 2005).	14
FIGURA 2.6 – Recuperação por rede (uavcenter.com/english/wwuavs/asia/images/).	16
FIGURA 2.7 – Recuperação por parapente, SHAMMAI (2005).	17
FIGURA 2.8 - VANT Acauã desenvolvido no CTA na década de 80 (III CONFERÊNCIA..., 2005).	22
FIGURA 2.9 - VANT Aurora, plataforma de desenvolvimento dos sistemas autônomos em desenvolvimento no CenPRA (RAMOS, 2005).	23
FIGURA 2.10 – Cronograma da Diretriz de Obtenção de Veículos Aéreos Não.	24
FIGURA 2.11 - Altus (Fonte: http://www.dfrc.nasa.gov/airsci/UAV_Specs/altus_specs.html).	26
FIGURA 2.12 - Altair/Predator B.	26
FIGURA 2.13 - Gnat 750 (Fonte: http://uav.wff.nasa.gov/UAVDetail.cfm?RecordID=Gnat750).	27
FIGURA 2.14 –Prowler (Fonte: http://uav.wff.nasa.gov/db/uav_char.html?key=19).	27
FIGURA 2.15 - Perseus B (Fonte: www.nasa.gov/centers/dryden/history/pastprojects/Erast/perseusb.html).	27
FIGURA 2.16 - Scorpion 100 (Fonte: http://www.freewing.com/scorpion100-50.html).	28
FIGURA 2.17 - Pointer (Fonte: http://www.aerovironment.com/area-aircraft/prod-serv/pointer.html).	28
FIGURA 2.18 – Proteus (Fonte: www.nasa.gov/centers/dryden/news/FactSheets/FS-069-DFRC.html).	28
FIGURA 2.19 – RQ-1A Predator (Fonte: http://uav.wff.nasa.gov/db/uav_char.html?key=18).	29
FIGURA 2.20 – RQ-2B Pioneer (Fonte: http://www.puav.com/pioneer_specifications.asp , http://uav.wff.nasa.gov/db/uav_char.html?key=12).	29
FIGURA 2.21 – RQ-3 Dark Star (Fonte: http://uav.wff.nasa.gov/db/uav_char.html?key=37).	29
FIGURA 2.22 - RQ-4A Global Hawk (Fonte: http://www.fas.org/irp/program/collect/global_hawk.htm).	30
FIGURA 2.23 – Hélios (Fonte: http://www.dfrc.nasa.gov/Gallery/Photo/Helios/HTML/EC99-45161-9.html).	30

FIGURA 2.24 – Heron (Fonte: http://www.israeli-weapons.com/weapons/aircraft/uav/heron/Heron.html).	31
FIGURA 2.25 – Hunter (Fonte: http://www.fas.org/irp/program/collect/hunter.htm).	31
FIGURA 2.26 – Luna (Fonte: www.emt-penzberg.de).	32
FIGURA 2.27 – Pathfinder (Fonte: www.nasa.gov/centers/dryden/news/FactSheets/FS-034-DFRC.html).	32
FIGURA 2.28 – Outrider (Fonte: http://www.fas.org/irp/program/collect/outrider.htm).	33
FIGURA 2.29 - X-45 (Fonte: http://www.boeing.com/phantom/ucav.html , http://www.dfrc.nasa.gov/Research/X45A/index.html).	33
FIGURA 2.30 - X-47 (Fonte: http://www.airforce-technology.com/projects/x47/).	34
FIGURA 2.31 – Visualização gráfica da tabela anterior.	36
FIGURA 2.32 – Variação da autonomia com o alongamento.	37
FIGURA 2.33 – Variação do teto operacional com o alongamento.	37
FIGURA 2.34 – Variação da envergadura com o alongamento.	38
FIGURA 2.35 – Variação do MTOW com o alongamento.	38
FIGURA 2.36 – Variação do Carga-útil com o alongamento.	39
FIGURA 2.37 Faixas de aplicação para diversos tipos de motorização, TSACH (1996).	42
FIGURA 2.38 - Vórtices de ponta de asa que formam o arrasto induzido.	44
FIGURA 2.39 - Vórtices de ponta de asa que formam o arrasto induzido(cont.).	44
FIGURA 2.40 Efeito do corrente de ar descendente sobre o escoamento local numa seção de uma asa finita.	45
FIGURA 2.41 - Influência do alongamento (mantendo a área constante) no D_i e D_p , para $CL = 2.0$	46
FIGURA 2.42 Gráfico $CD_i \times \Lambda$ para asa elíptica e sem torção para vários CL s.	48
FIGURA 2.43 - Ponta de asa com várias <i>winglets</i> , ou aletas de ponta (SMITH et al., 2001).	49
FIGURA 2.44 - Configuração Canard e motor propulsor.	51
FIGURA 2.45 - Cauda em “V” invertido.	51
FIGURA 3.1 - Asas de fibra de vidro sendo laminadas manualmente.	55
FIGURA 3.2 - Molde sendo fechado para colagem de uma fuselagem.	55
FIGURA 3.3 – Tipos de constituição dos materiais compósitos.	56
FIGURA 3.4 – Diferentes padrões de organização das fibras numa camada de um compósito reforçado com fibras.	56
FIGURA 3.5 - Comparação da Teoria de tensor de Tsai-Wu, (JONES, 1975).	60
FIGURA 3.6 - Elemento <i>shell99</i> , usado no Ansys® para modelar cascas laminadas.	65
FIGURA 3.7 - Sequência típica de laminação tipo sanduíche ($\pm 45/0/\pm 45$).	67
FIGURA 3.8 - Corte da seção central da asa.	68

FIGURA 3.9 - Distribuição de pressão sobre o modelo.	68
FIGURA 3.10 - Vínculos e malha da longarina (vista interna).	69
FIGURA 3.11 - Variação das propriedades da casca ao longo da envergadura.	69
FIGURA 3.12 – Distribuição do valor do critério de falha de Tsai-Wu sobre a casca da asa.	71
FIGURA 3.13 - Distribuição do valor do critério de falha de Tsai-Wu sobre a longarina.	71
FIGURA 4.1 - Funções com ruídos e descontinuidades, inviáveis para otimizações pelos métodos tradicionais (GOLDBERG 1989).	75
FIGURA 4.2 Fluxograma de um algoritmo genético convencional.	82
FIGURA 5.1 - Vista em planta da semi-asa esquerda.	95
FIGURA 5.2 – Perfis Selig 1223 e Wortmann FX74-CL5-140.	96
FIGURA 5.3 - Modelo da asa em elementos finitos: Vista do extradorso.	98
FIGURA 5.4 - Modelo da asa em elementos finitos: Vista do intradorso.	98
FIGURA 5.5 - Modelo da asa em elementos finitos: Vista interna (longarina e nervuras).	99
FIGURA 5.6 - Distribuição de C_p para vários Cl 's no perfil Wortmann.	101
FIGURA 5.7 - Aproximação da distribuição de C_p ao longo do extradorso por um polinômio para o perfil Wortmann $Cl = 2,33$ $\alpha = 11,5^\circ$	101
FIGURA 5.8 - distribuição de pressão sobre a malha no extradorso da asa, em N/m^2	103
FIGURA 5.9 – Variação da aptidão com o critério de falha para vários valores da função objetivo ($\beta=1000$, $\gamma=40$, $f(x_{maz})=0,7$).	108
FIGURA 5.10 – Comparação entre a distribuição de aptidão antes e depois de ser escalada.	110
FIGURA 5.11 – Fluxograma completo do AG implementado.	113
FIGURA 5.12 – Efeito do tamanho da população.	115
FIGURA 5.13 – Efeito do tamanho da população considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração.	116
FIGURA 5.14 – Efeito da $f(x_{max})$ na $f(x)$	117
FIGURA 5.15 – Efeito do β da penalidade.	118
FIGURA 5.16 – Efeito do β considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração.	118
FIGURA 5.17 – Efeito do γ da penalidade.	119
FIGURA 5.18 – Efeito do γ considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração.	119
FIGURA 5.19 – Efeito da probabilidade de cruzamento.	120
FIGURA 5.20 – Efeito da probabilidade de cruzamento considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração.	121
FIGURA 5.21 – Efeito da probabilidade de mutação.	122
FIGURA 5.22 – Efeito da probabilidade de mutação considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração.	122
FIGURA 5.23 – Efeito da probabilidade de inversão.	123

FIGURA 5.24 – Efeito da probabilidade de inversão considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração.....	124
FIGURA 5.25 – Efeito do elitismo.....	124
FIGURA 5.26 – Efeito do elitismo considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração.....	125
FIGURA 5.27 – Efeito do elitismo na Aptidão, comparação das médias e máximos de cada geração.....	126
FIGURA 5.28 – Efeito do elitismo na $f(x)$, considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração.....	126
FIGURA 5.29 – Efeito do compartilhamento na aptidão ao longo da evolução.....	127
FIGURA 5.30 – Efeito do compartilhamento na $f(x)$	128
FIGURA 5.31 – Efeito do escalonamento na aptidão.....	129
FIGURA 5.32 – Distribuição da aptidão na 1ª geração, $K = 4$	129
FIGURA 5.33 – Distribuição da aptidão na 35ª geração, $K = 4$	130
FIGURA 5.34 – Distribuição da aptidão na 1ª geração, $K = 2$	130
FIGURA 5.35 – Distribuição da aptidão na 35ª geração, $K = 2$	131
FIGURA 5.36 – Evolução da $f(x)$ de todos os AGs testados.....	132
FIGURA 5.37 – Evolução da aptidão de todos os AGs testados.....	133
FIGURA 5.38 – $f(x)$ min. obtida após 160 corridas com os diferentes parâmetros do AG.....	136
FIGURA 5.39 – $f(x)$ min. obtida após 320 corridas com diferentes parâmetros do AG.....	137
FIGURA 5.40 - Tsai-Wu no extradorso, AG n. 10.....	138
FIGURA 5.41 - Tsai-Wu no intradorso, AG n. 10.....	138
FIGURA 5.42 - Tsai-Wu na longarina e nervuras, AG n. 10.....	139
FIGURA 5.43 - Tsai-Wu no extradorso modelo, AG n. 17.....	139
FIGURA 5.44 - Tsai-Wu no intradorso, AG n. 17.....	140
FIGURA 5.45 - Tsai-Wu na longarina e nervuras, AG n. 17.....	140
FIGURA 5.46 – Representação da seqüência de laminação no extradorso da raiz da asa, AG n. 17.....	141
FIGURA 5.47 – Comparação do AG com métodos de otimização do Ansys®.....	142
FIGURA 5.48 – Mesma comparação anterior, normalizada pelo AG n. 17.....	142

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Exemplos de carga-paga típica de um VANT.....	13
TABELA 2.2 - Custos estimados de desenvolvimento do SRTVP.....	18

TABELA 2.3 - Comparativo de custo de desenvolvimento entre aeronaves tripuladas e VANTs.	18
TABELA 2.4 – Dados de vários VANTs.	35
TABELA 2.5 – Alongamento de algumas aeronaves.	47
TABELA 2.6 – Alongamento de alguns pássaros.	47
TABELA 3.1 - Propriedades de alguns materiais em forma de fibras.	57
TABELA 3.2 - Propriedades típicas de resinas utilizadas como matriz nos compósitos.	62
TABELA 3.3 - Propriedades mecânicas do laminado bidirecional de E-Glass (60%) com matriz Epóxi e da espuma de poliuretano.	67
TABELA 3.4 - Parâmetros das variáveis de otimização.	70
TABELA 3.5 - Valores das variáveis obtidas após a otimização.	72
TABELA 3.6 - Dados de Processamento.	72
TABELA 4.1 – Equivalências entre a Natureza e os AGs.	84
TABELA 4.2 – Exemplo de cromossomo codificado com linguagem binária.	85
TABELA 4.3 – Operação de cruzamento.	87
TABELA 4.4 – Operação de mutação.	88
TABELA 4.5 – Exemplos de Esquemas.	89
TABELA 4.6 – Comprimento e ordem de um esquema.	89
TABELA 5.1 - Parâmetros de voo em cruzeiro.	94
TABELA 5.2 – Coordenadas de alguns pontos de referência da asa.	95
TABELA 5.3 – Resumo dos dados geométricos da asa.	95
TABELA 5.4 - Comparativo dos perfis Selig 1223 e Wortmann FX-C6-140.	97
TABELA 5.5 - Propriedades dos laminados utilizados no modelamento da asa.	99
15900	99
TABELA 5.6 - Parâmetros de voo no caso limite.	100
TABELA 5.7 – Variáveis de projeto.	104
TABELA 5.8 – Variáveis parametrizadas.	104
TABELA 5.9 – Espessuras e orientação de cada região (VP's de 1 a 58).	105
TABELA 5.10 – Espessuras das mesas da longarina	105
TABELA 5.11 – Codificação do número de camadas.	106
TABELA 5.12 – Descrição do cromossomo (exemplo).	111
TABELA 5.13 – Índice da tabela de parâmetros e legendas dos gráficos dos AGs testados.	131
TABELA 5.14 – Lista de Parâmetros dos AGs testados.	134
TABELA 5.15 – Estatísticas dos AGs testados.	134
TABELA 5.16 – Resultados dos AGs testados.	135
TABELA 5.17 – Lista de Parâmetros dos AGs ótimos.	136

TABELA 5.18 – Lista das VP ótimas de todos métodos de otimização.....	143
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AALA	Alta altitude e Longo Alcance
AAM	Missil ar-ar
ADF	<i>Automatic Radio Direction Finder</i> (Radio Goniômetro Automático)
AG	Algoritmo Genético
AGS	Algoritmo Genético Simples
ANT	Aeronave não Tripulada
ATC	Controle de Tráfego Aéreo
BA	Bordo de ataque da asa
BF	Bordo de fuga da asa
c.g.	Centro de Gravidade
C3I	Comando, Controle, Comunicações e Inteligência
CIA	<i>Central Intelligence Agency</i> (Agência de Inteligência Central)
COMINT	<i>Communication Intelligence</i> (Inteligência de Comunicação)
CRF	Compósito Reforçado por Fibra
DAC	Departamento de Aviação Civil
Decea	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DGPS	Sistema de Posicionamento Global Diferencial
DME	<i>Distance Measuring Equipment</i> (Equipamento Radiotelemétrico)
DNA	Ácido desoxirribonucléico
E.U.A	Estados Unidos da América
EADS	<i>European Aeronautic Defence and Space Company</i> (Companhia Aeronáutica de Defesa e Espaço Européia)
EAS	<i>Equivalent air speed</i> (Velocidade do ar equivalente)
ECAC	<i>European Civil Aviation Conference</i> (Conferência Européia de Aviação Civil)
EF	Elementos Finitos
ELINT	<i>Electronic Intelligence</i> (Inteligência Eletrônica)
ERAST	Aeronave de Pesquisa Ambiental e Tecnologia de Sensoriamento
ESDU	<i>Engineering Science Data Unit</i> (Unidade de Dados de Ciência da Engenharia)
Eurocontrol	<i>European Organisation for the Safety of Air Navigation</i> (Organização Européia para Segurança da Navegação Aérea)
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i> (Administração Federal de Aviação)
FAR	<i>Federal Aviation Requirements</i> (Requisitos da Aviação Federal)

FLIR	<i>Forward looking infra-red</i> (Imageador infravermelho termal de visada frontal)
Galileo	Sistema europeu equivalente ao GPS
GALOPPS	Algoritmo Genético Otimizado para Sistema com Portabilidade e Paralelismo
GNSS	<i>Global Navigation. Satellite System</i> (Sistema de Navegação Global por Satélite)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
IAI	Indústria de Aeronaves de Israel
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i> (Organização Internacional de Aviação Civil)
IFR	Regulamentos de Voo por Instrumentos
JAA	<i>Joint Aviation Authorities</i> (Autoridades Aeronáuticas Conjuntas)
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i> (Detecção e Direcionamento de Luz para Mapeamento do Solo)
Mach	número de Mach
MALA	Média Altitude e Longo Alcance
MEF	Método dos Elementos Finitos
MIL-STD	<i>Military Standards</i> (Normas Militares)
MRD	Método da Rigidez Dinâmica
MTOW	<i>Maximum Take Off Weight</i> (Peso Máximo de Decolagem)
MVANT	Mini VANT
NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
Nastran	<i>Nasa STress ANalysis program</i>
OTAN	Organização do Tratado do Atlântico Norte
PAN	Poliacrilonitril (pixe)
Prepreg	Tecido Pré-impregnado
RBHA	Regulamentos Brasileiros de Homologação Aeronáutica
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i> (Radar de Abertura Sintética)
Satcom	Satélite de comunicação
Sck	Schrenk
SIGINT	<i>Signal Intelligence</i> (Inteligência de Sinal)
SNI	Sistema de Navegação Inercial
SRTVP	Sistema Rápido de Teste de Voo de Protótipos
STANAG	<i>Standardized Agreements</i>

TAS	<i>(True airspeed)</i> Velocidade do ar corrigida para altitude e temperatura
TCAS	<i>Traffic Collision Avoidance Systems</i> (Sistema anticollisão de tráfego)
Transponder	Transmissor-receptor de radar secundário de bordo
UAV	<i>Unmanned Air Vehicle</i> (Veículo Aéreo não Tripulado)
UCAV	<i>Unmanned Combat Air Vehicle</i> (Veículo Aéreo não Tripulado de Combate)
UMI	Unidade de Medida Inercial
VA	Velocidade de Manobra
VANT	Veículo Aéreo não Tripulado
VANTC	Veículo Aéreo não Tripulado de Combate
VANTT	Veículo Aéreo não Tripulado Tático
VFR	Regulamentos De Voo Visual
VHF	<i>Very-High Frequency Band</i> (Faixa de Altíssima Frequência)
VOR	<i>Very High Frequency Omnidirectional Radio Range</i> (Faixa de Radio Omnidirecional de Altíssima Frequência)
VRP	Veículo Remotamente Pilotado (DRONE)
VTOL	<i>Vertical Takeoff and Landing</i> (Decolagem e Pouso Vertical)
WAAS	Sistema de Aumento de Área Extensa

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
b	Envergadura
C	Carbono
C	Corda
CD	Coefficiente de arrasto total
CD_i	Coefficiente de arrasto induzido
$CD_{i_{elip}}$	Coefficiente de arrasto induzido para asa elíptica
CF	Critério de Falha
CL	Coefficiente de sustentação da asa
Cl	Coefficiente de sustentação local
Cl_{elip}	Função elíptica do coeficiente de sustentação local
CL_{MAX}	Coefficiente de sustentação máxima (de estol) da asa
CNC	Controle numérico computadorizado
Cr	Corda na raiz da asa
D	Força de arrasto
Di	Força de arrasto induzido
Dp	Força de arrasto de pressão
E_x	Módulo de Young longitudinal no plano do laminado (direção x)
E_y	Módulo de Young transversal no plano do laminado (direção y)
E_z	Módulo de Young normal ao plano do laminado (direção z)
$f(x)$	Função objetivo
$f(x_{max})$	Função objetivo máxima
G	Aceleração da gravidade ($9,81\text{m/s}^2$)
G_{xy}	Modulo de cisalhamento no plano xy
G_{xz}	Modulo de cisalhamento no plano xz
G_{yz}	Modulo de cisalhamento no plano yz
L	Força de Sustentação
L/D	Razão de planeio
K	Fator múltiplo da aptidão
Ps	Probabilidade de seleção
ux	Deslocamento na direção x
uz	Deslocamento na direção z
V	Velocidade
VE	Variáveis de Estado

VP Variáveis de Projeto

Símbolos gregos

A	Aptidão
β	Fator de correção da A se $CF < 0,9$
γ	Fator de correção da A se $CF > 0,9$
λ	Afilamento da asa (C_P/C_R)
Λ	Alongamento
α_e	Ângulo de ataque efetivo
α	Ângulo de ataque geométrico
α_i	Ângulo de ataque induzido
ν_{xy}	Coeficiente de Poison no plano xy
ν_{xz}	Coeficiente de Poison no plano xz
ν_{yz}	Coeficiente de Poison no plano yz
ρ	Densidade
δ	Espessura da camada do laminado
θ_y	Giro no eixo y
θ_z	Giro no eixo z
θ	Orientação da camada do laminado
σ	Tensão
σ_{xc}^f	Tensão de ruptura à compressão na direção x
σ_{yc}^f	Tensão de ruptura à compressão na direção y
σ_{zc}^f	Tensão de ruptura à compressão na direção z
σ_{xt}^f	Tensão de ruptura à tração na direção x
σ_{yt}^f	Tensão de ruptura à tração na direção y
σ_{zt}^f	Tensão de ruptura à tração na direção z
σ_{xy}^f	Tensão de ruptura ao cisalhamento no plano xy
σ_{xz}^f	Tensão de ruptura ao cisalhamento no plano xz
σ_{yz}^f	Tensão de ruptura ao cisalhamento no plano yz

Subscritos

c	Compressão
e	Efetivo
elip	Elíptico

i	Induzido
MAX	Máximo
P	Ponta
R	Raiz
s	Simétrico
t	Tração
x	Direção x
y	Direção y
z	Direção z

RESUMO

WIDMAIER, K. (2005). *Algoritmo genético aplicado à otimização de asas de material compósito de Veículos Aéreos Não Tripulados*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.

O advento dos Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs) representa uma quebra de paradigma no ramo aeronáutico. São revisados os conceitos de projeto envolvidos no desenvolvimento de VANTs e levantadas as suas potenciais aplicações. São também analisadas as características de sua operação e discutidas as questões regulatórias envolvidas na certificação e integração dos VANTs ao tráfego aéreo civil. Dentre as várias características singulares dos VANTs, enfatiza-se a sua necessidade de realizar vôos a grande altitude e com longa autonomia. Isso leva ao emprego de materiais mais leves e configurações com asas de grande alongamento, que provocam menor arrasto induzido. É feita uma revisão sobre materiais compósitos, que são materiais de uso crescente no ramo aeronáutico por sua leveza e resistência, e que por sua característica de anisotropia, são suscetíveis à otimização estrutural. Métodos e ferramentas de otimização estrutural de compósitos laminados ainda são pouco empregados, por suas características discretas e pelo grande número de parâmetros envolvidos. Um método eficiente e adequado à otimização de um problema desse tipo é o método dos Algoritmos Genéticos (AG). Assim foi desenvolvida uma sub-rotina de otimização baseada em algoritmos genéticos, usando a linguagem de programação *Fortran*. A sub-rotina desenvolvida trabalha em conjunto com um programa comercial de análise estrutural baseado no Método dos Elementos Finitos, o Ansys®. Foi também proposta uma configuração de asa de um VANT típico, de grande alongamento e fabricada com materiais Compósitos Reforçados com Fibras (CRF). A asa proposta teve o número e a orientação das camadas do laminado otimizadas com o uso da sub-rotina desenvolvida, e resultados satisfatórios foram encontrados. Foram também analisados os efeitos da variação dos parâmetros dos operadores do AG, como probabilidades de mutação, cruzamento, tipo de escalonamento, entre outros, no desempenho do mesmo. Também foram feitas otimizações no mesmo modelo de asa proposto, empregando outros métodos disponíveis no próprio programa de análise estrutural. Os resultados das otimizações através desses métodos foram comparados com os resultados obtidos com a sub-rotina desenvolvida.

Palavras-chave: VANT; algoritmo genético; material compósito; otimização; veículo aéreo não tripulado.

ABSTRACT

WIDMAIER, K. (2005). *Genetic algorithm applied to optimization of composite material wings of Unmanned Air Vehicles*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.

The advent of the Unmanned Air vehicles (UAVs) represents a paradigm break in the aeronautical field. The project concepts involved in the development of UAVs are revised and its potential applications are rose. Also the issues related to UAVs operation are assessed and the regulatory questions involved in their certification and integration to the civil air space are argued. Amongst many singular characteristics of the UAV, its necessity of performing flights at high altitudes and with long endurance is emphasized. This leads to the employment of lighter materials and to configurations with high aspect ratio wings that cause minor induced drag. A revision on composite materials, which are of increasing use in the aeronautical field for their lightness and strength, and that are appropriate for being optimized due to their anisotropy characteristics, is made. Methods and tools of structural optimization of laminated composites are still seldom employed, due to their discrete nature and to the large number of parameters involved. An efficient and suitable method for the optimization of this kind of problem is the Genetic Algorithm (GA). Thus, an optimization sub-routine based on genetic algorithms was developed, using FORTRAN programming language. The developed sub-routine works in combination with Ansys®, a structural analysis commercial program based on the Finite Elements Method. A configuration of a typical UAV wing, made from Composite Reinforced Plastics (CRP) was also proposed. The proposed wing had the number of plies and the orientations of its layers optimized using the developed sub-routine, and satisfactory results had been found. Also the effect of the variation of AG's operator parameters in its performance, as mutation probabilities, crossover probabilities, fitness scaling, among others, have been assessed. The same wing model considered was also optimized using other build-in methods of the structural analysis program. The results of these optimizations have been compared with the results obtained with the developed sub-routine.

Keywords: UAV; genetic algorithm; composite material; optimization; unmanned air vehicle.

1. INTRODUÇÃO

No ramo aeronáutico, já não é mais novidade que o advento dos Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs) representa uma nova revolução, talvez do porte ou maior do que a aplicação de aviões para fins militares, a quebra da barreira do som, ou o início do uso comercial de aviões para transporte de passageiros. Suas potenciais aplicações civis, comerciais e militares transcendem mesmo o campo da aviação, invadindo áreas desde as antes reservadas a satélites, para retransmissão de dados e sensoriamento remoto a um custo muito mais baixo, ou aplicações na agricultura. Também existem grandes possibilidades de aplicação em vigilância urbana e em zonas de conflitos militares, onde a ausência de uma tripulação na aeronave representa um enorme ganho, pela eliminação do risco a que ela seria submetida.

Apesar de serem quase tão antigos quanto a aviação tripulada, com os recentes avanços nos sistemas de navegação e controle, seu uso passou a ser estudado com cada vez maior interesse por indústrias aeronáuticas, institutos de pesquisa e principalmente organizações militares. Essas últimas com grande destaque na mídia, por ocasião dos recentes conflitos bélicos no Afeganistão e no Iraque.

“Nosso objetivo é obter a liderança em sistemas não tripulados. A Boeing é uma companhia de Us\$ 58 bilhões. Quão grande você tem de ser para ser qualificado como signficante? Nós pensamos que devemos estar na vizinhança de algo em torno de 1 bilhão por ano. O mercado como um todo para sistemas não tripulados pode facilmente crescer a 6 bilhões ou mais até o fim da década.”

Essa foi a declaração dada por Mike Heinz, vice-presidente da recém estabelecida unidade de Sistemas não Tripulados da Boeing, em St. Louis, EUA, por ocasião do anúncio do primeiro voo do X-45A, o demonstrador de conceito do UCAV X-45B, segundo WALLACE (2002). Ele ainda afirma que o Pentágono prevê que por volta do ano de 2020, cerca de um terço das aeronaves militares de combate sejam não tripuladas, ou robóticas.

Suas missões tipicamente têm longa duração e alcance, e são realizadas em grande altitude, alcançando as mais altas camadas da troposfera ou até atingindo a estratosfera. Ora para evitar medidas defensivas do inimigo em caso de emprego militar, ora para estabelecer um grande raio de alcance de comunicação e imagem, ou para realizar medições atmosféricas. Existem muitos desafios de engenharia relacionados à construção de VANTs, como os sistemas de navegação e controle e sua integração com o tráfego aéreo. Do ponto de vista estrutural e aerodinâmico, é de vital importância que a aeronave possua grande autonomia e uma alta razão

de planeio (L/D). Isso é obtido, dentre outros meios, através do emprego de asas de grande alongamento, que reduzem o arrasto induzido.

Para a construção das estruturas das aeronaves têm-se cada vez mais empregado materiais avançados como os compósitos. Eles possuem alta resistência, permitem um ótimo acabamento e podem ter suas propriedades alteradas, mudando-se a estrutura e orientação da laminação de forma a otimizá-las. São portanto muito apropriados a uma estrutura com as características de uma asa de grande alongamento.

O projeto de uma asa ou outra superfície de uma aeronave deve levar em consideração as suas características estruturais, dinâmicas e aerodinâmicas, que são interdependentes, e levam a um problema adicional, o aeroelástico. Isso torna o seu projeto um problema multidisciplinar, e que só pode ser resolvido satisfatoriamente e em tempo não muito longo, caso se queira minimizar ensaios experimentais caros e demorados, com o emprego de ferramentas de análise avançadas. Existem diferentes métodos que se prestam a resolver os problemas de cada área separadamente. Para uma análise estrutural e dinâmica, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é provavelmente o mais empregado. Com a velocidade de processamento obtida pelos computadores atualmente, é possível obter excelentes resultados para as mais diversas estruturas em pouco tempo. Para resolver o problema aerodinâmico, existe uma diversidade maior de métodos utilizados. Para as análises que visam otimização de desempenho, como minimização de arrasto e maximização do coeficiente máximo de sustentação ($CL_{máx}$), são necessários preferencialmente métodos numéricos que levem em conta a viscosidade e eventualmente a compressibilidade do ar. Para isso são utilizados métodos como diferenças finitas, volumes finitos ou o próprio MEF, para resolver as equações de Navier Stokes. Esses métodos exigem uma quantidade enorme de tempo de processamento – considerando os processadores disponíveis atualmente – e ainda não são suficientemente precisos para eliminar a necessidade de ensaios experimentais. Já para a determinação do carregamento aerodinâmico do componente, para fins de dimensionamento estrutural, métodos mais simples e rápidos podem ser utilizados. Exemplos são os métodos potenciais como o Vortex Lattice e o método dos painéis, que consideram o escoamento incompressível e invíscido e são eficientes dentro de certos limites, e Eulerianos, que são um caso particular da solução das equações de Navier Stokes, desconsiderando o efeito da viscosidade. Existem também muitos métodos potenciais associados a algum método alternativo que simule os efeitos da camada limite, que apresentam uma ótima relação de qualidade de resultados com tempo de processamento.

Finalmente, existem vários métodos que visam a otimização de cada um dos problemas individualmente, e até simultaneamente, através da interação dos métodos estruturais e aerodinâmicos de forma a otimizar os parâmetros de projeto.

Focando a questão estrutural, um método que tem mostrado grande potencial para aplicação de estruturas de materiais compósitos, é o dos algoritmos genéticos (AGs).

1.1 Objetivo

A partir do que foi exposto anteriormente, pretende-se com este trabalho contribuir para a formação de uma base de conhecimentos a respeito dos conceitos primários envolvidos no projeto e uso de VANTs, um relativamente novo e crescente campo de pesquisa. E mais especificamente, pretende-se desenvolver uma ferramenta de otimização estrutural baseada em AG, que permita otimizar os parâmetros construtivos de um VANT de material compósito e de grande alongamento, que são características típicas e importantes dos VANTs.

Assim este trabalho é dividido em duas áreas. A primeira é a realização de uma revisão bibliográfica sobre VANTs, seus conceitos de projeto e suas potenciais aplicações, onde pretende-se demonstrar as vantagens do uso de materiais compósitos e de configurações de VANTs com asas de grande alongamento.

A segunda área em que este trabalho é dividido é o desenvolvimento de uma rotina de otimização de materiais compósitos baseada em Algoritmos Genéticos, para ser utilizada como uma sub-rotina personalizada para o Ansys®, um programa comercial de análise estrutural que utiliza o método dos elementos finitos. Pretende-se com essa sub-rotina demonstrar que AGs são mais uma opção eficiente de otimização estrutural.

Assim pretende-se fazer uma descrição das características e da mecânica dos materiais compósitos, introduzir os conceitos envolvidos na otimização usando algoritmos genéticos e discutir a modelagem de compósitos no Ansys®. Finalmente, se desenvolverá a sub-rotina, em Fortran®. A sub-rotina será usada para otimizar alguns parâmetros de laminação de uma asa típica de um VANT, visando a minimização do peso estrutural da mesma para um dado carregamento.

Será analisada a influência de diferentes parâmetros e operadores do AG no desempenho do mesmo, e também o melhor resultado da otimização utilizando o AG desenvolvido será comparado com os métodos de otimização disponíveis no próprio Ansys®.

1.2 Descrição dos capítulos

Este trabalho aborda duas áreas, a primeira tratando-se de uma revisão bibliográfica sobre VANTs, mais geral, e uma segunda área, que trata do desenvolvimento de uma rotina de otimização baseada em AG aplicada a uma asa de um VANT. Assim, os referidos temas são abordados através dos seguintes capítulos:

- **VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT)**

Nesse capítulo, reflete-se sobre o significado dos VANTs, seu contexto histórico e importância futura. O capítulo é dividido em sete seções: a primeira trata-se de um breve levantamento das principais aplicações civis e militares para VANTs, e das características dessas aplicações; a segunda apresenta um resumo do funcionamento da operação dos VANTs; a terceira faz um breve levantamento dos custos envolvidos no desenvolvimento de VANTs; a quarta sumariza a questão da certificação dos VANTs e sua integração no sistema de tráfego aéreo civil, destacando as questões mais sensíveis; a quinta apresenta um levantamento das iniciativas de VANTs no Brasil; na sexta, reflete-se sobre uma série de VANTs existentes, e é feita uma análise paramétrica; e finalmente na sétima, discutem-se quais são as características de projeto mais importantes a serem consideradas no desenvolvimento de um VANT.

- **MATERIAIS COMPÓSITOS**

Este capítulo é dividido em cinco seções: a primeira trata-se de uma revisão bibliográfica sobre as características físicas dos materiais compósitos, focando o tipo de material comumente utilizado no ramo aeronáutico; a segunda discute a análise e previsão de falha em componentes de material compósito; na terceira faz-se um levantamento sobre as propriedades e características dos constituintes típicos dos materiais compósitos; a quarta seção apresenta uma revisão bibliográfica sobre o uso do MEF na otimização de asas de material compósito; e a quinta lista os métodos e seus fundamentos da otimização utilizando o Ansys®, um software comercial de elementos finitos, e apresenta um exemplo de otimização de uma asa de material compósito utilizando estes métodos.

- **ALGORITMOS GENÉTICOS**

Este capítulo é dividido em três seções: a primeira aborda de forma ampla a origem da teoria dos algoritmos genéticos, ou seja, da lei da seleção natural, de Darwin, até o advento da genética; a segunda revisa seus principais fundamentos teóricos e discute os seus operadores; a terceira destaca suas principais aplicações.

- **MODELAMENTO E ROTINA DE OTIMIZAÇÃO**

Aqui se trata do desenvolvimento da rotina de otimização proposta. O capítulo divide-se em cinco seções: a primeira discute e propõe uma geometria de asa a ser otimizada; a segunda aborda a modelagem da asa em elementos finitos; a terceira discute a obtenção da distribuição do carregamento aerodinâmico da asa para a condição limite considerada; a quarta seção propõe e descreve o desenvolvimento da rotina de otimização propriamente dita; a quinta discute os resultados da otimização encontrados utilizando diferentes parâmetros no AG desenvolvido, e compara-o com os outros métodos de otimização do Ansys®.

- CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Neste capítulo, dividido em três seções, é analisada a consecução dos objetivos a que se propôs este trabalho. Aqui se destaca a importância de se desenvolver pesquisa relacionada aos VANTs, e são discutidas as implicações dos resultados obtidos, que qualificam o algoritmo de otimização desenvolvido. Também são propostos temas a serem pesquisados em maior profundidade e sugeridas melhorias que podem ser obtidas no algoritmo.

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Lista as fontes das referências bibliográficas consultadas no desenvolvimento desse trabalho.

- APÊNDICE A – Fonte do AG em fortran

Contém o código fonte do programa, em Fortran, da rotina de otimização desenvolvida.

- APÊNDICE B - Arquivo “macro-OPT-modelo-final060603.txt”

Contém o código fonte da *macro* do Ansys® que trabalha em conjunto com a rotina de otimização desenvolvida.

- GLOSSÁRIO

Descreve o significado de alguns termos técnicos relacionados com os assuntos abordados neste trabalho.

2. VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT)

"Não há nenhuma razão para que alguém queira ter um computador em sua casa "

Ken Olson, presidente e fundador da *Digital Equipment Corp.*, 1977

Veículos aéreos não tripulados têm várias definições que podem ser encontradas na literatura. As mais comuns são, em inglês, “*Unmanned Aerial Vehicle*” e “*Unmanned Air Vehicle*” (*UAV*), ou seja, Veículos Aéreos não Tripulados. Às vezes eles são associados ao VRP - Veículo Remotamente Pilotado “*Remote piloted vehicle*” (*RPV*), que são igualmente veículos aéreos não tripulados, porém não autônomos, e sim controlados remotamente. Essa característica de capacidade de voo autônomo dos VANTs é o que os tornam especialmente interessantes para certas aplicações.

Segundo JAXA-MALACHOWSKI (1996), o primeiro voo de um VANT ocorreu em 1908. Desde então eles têm acompanhado o crescimento da aviação. Durante a 1ª Guerra Mundial alguns aviões foram convertidos em aviões radio-controlados, que carregados de explosivos, eram guiados até seu alvo inimigo.

Na década de 1930, com a guerra novamente à espreita, o interesse em VANTs ressurgiu, mas dessa vez para a prática de tiro. Nessa época foram desenvolvidos na Inglaterra mais de 400 veículos *alvo* não tripulados, conhecidos como *Queen Bees* (Abelhas Rainha). Ainda hoje esse tipo de aeronave é muito usado, porém é mais conhecida como *Drone* (Zangão), DeGARMO (2004).

No final da 2ª Guerra surgiram as bombas voadoras V1 *Fieseler Fi 103* (FIGURA 2.1) e A4 (mais tarde rebatizada de V2) desenvolvidas na Alemanha. Segundo JANSSEN (2001), a V1 *Vergeltungswaffe* (bomba de retaliação), que também era chamada de bomba vibradora ou sibilante pelos ingleses, era propulsionada por um motor pulso-jato e levava aproximadamente 840 kg de explosivos em seu nariz. Sua grande vantagem era a simplicidade e baixo custo de fabricação. Voava a uma velocidade aproximada de 640 km/h e entre 600 m e 1500 m de altitude. Seu sistema de navegação era bastante simples. Ele apenas mantinha a V1 em sua proa e altitude pré-programada.

organizações científicas e industriais têm se destacado no desenvolvimento de VANTs, como a Indústria de Aeronaves de Israel (IAI), NASA, Boeing, EADS e muitas outras.

Segundo THOMPSON et al. (1994), o que mais contribuiu recentemente para o desenvolvimento de VANTs foi a melhora dos sistemas de navegação, como o Sistema de Posicionamento Global (GPS).

Além disso, recentes avanços na tecnologia da computação e desenvolvimento de programas, materiais leves de alta resistência, sistemas de comunicação avançados (telefonia celular, por exemplo), sensores sofisticados e miniaturização de componentes potencializam a demanda por VANTs.

Atualmente pelo menos 32 países estão desenvolvendo VANTs, sendo que os EUA, seguidos por Israel, estão liderando em tamanho, variedade e sofisticação dos mesmos. Outros países que possuem programas significativos de desenvolvimento de VANTs são: Japão, Coreia do Sul, Austrália, França, Inglaterra, Itália, Alemanha e Suécia. Em termos de número de VANTs operacionais, atualmente o Japão lidera com aproximadamente 2000 VANTs, que estão sendo usados para pulverização de lavouras e plantio. Além desses países que possuem programas de desenvolvimento, são conhecidos 41 países que operam VANTs. Conforme DeGARMO (2004), aproximadamente 90% a 95% dos VANTs são de uso militar e realizam missões de vigilância.

Como as tecnologias utilizadas ainda são muito recentes, é necessária muita pesquisa para a formação de massa crítica, incorporação de tecnologia e do estabelecimento de conceitos de projeto. Na próxima seção é apresentado um pequeno resumo de conceitos e projetos já utilizados.

2.1 Uso e aplicações

VANTs do tipo MALA (Média Altitude e Longo Alcance) devem possuir a maior fatia de mercado das suas diferentes classes, principalmente devido a sua adequação a aplicações como operações de segurança de fronteiras e guarda de costas marítimas, ou seja, aplicações militares, conforme SHAMMAI (2005). A FIGURA 2.3 mostra a provável divisão de mercado para os diferentes tipos de VANTs.

FIGURA 2.3 – Fatia de mercado de cada tipo de VANT (SHAMMAI, 2005).

Entretanto, VANTs de menor porte também devem ter largo uso em aplicações como monitoramento urbano, conforme mostra CELESTINO (2005), e em sensoriamento remoto na agricultura, de acordo com JORGE (2005). A seguir são enumeradas algumas das principais aplicações civis e militares dos VANTs.

2.1.1 Principais aplicações civis

Conforme SHAMMAI (2005), o mercado global para aplicações civis e comerciais de VANTs deve totalizar algo próximo de Us\$ 2 bilhões até 2014.

As missões potenciais para aplicação civil são (VITALI et al. (1996), OLIVEIRA 2005):

- **Monitoramento e pesquisa ambiental**
 - Poluição
 - Inspeção e monitoramento de linhas de petróleo
 - Prevenção de desastres naturais
 - Derramamento de petróleo
 - Patrulha contra pesca ilegal
 - Controle de safras agrícolas
- **Pesquisa florestal**
 - Detecção de queimadas
 - Levantamento de recursos florestais
- **Clima**
- **Fotografia aérea**

- VANTs equipados com câmaras podem cobrir grandes áreas em pouco tempo. A vantagem dos VANTs sobre satélites é o seu preço de aquisição, disponibilidade e a resolução fotográfica, conforme TSACH et al. (1996).
- **Comunicação (satélite de baixo custo)**
 - Telefonia celular
 - Transmissão televisiva
- **Vigilância Policial de Áreas Urbanas**
 - Controle de fronteiras
 - Patrulha e busca em fronteiras e costas marítimas
- **Combate ao contrabando e narcotráfico**

Em países ou regiões extensas e com baixa densidade populacional não é economicamente viável estabelecer uma infra-estrutura baseada em terra para repetidoras de sinais de televisão, e nesses casos também pode ser interessante o uso de VANTs de alta altitude e grande autonomia.

Segundo SUSPENDE... (2003), VANTs devem em breve suplantar os satélites na retransmissão de dados. Um VANT de grande autonomia operando sobre uma determinada área a uma altitude aproximada de 20000m pode substituir os satélites geoestacionários que hoje realizam esse trabalho. Estando mais perto do solo, (os satélites geoestacionários orbitam a uma altitude de 36000 km) os transmissores e receptores necessitam de menos potência, e mais informações podem ser transmitidas a um custo bem menor.

Além das citadas, ainda podem surgir muitas outras aplicações, por ser esse um campo vasto e ainda inexplorado.

2.1.2 Principais aplicações militares

Nos anos de 2002 e 2003, os gastos militares com VANTs subiram de aproximadamente Us\$ 350 milhões por ano para mais de Us\$ 1 bilhão apenas nos E.U.A, como mostrado na FIGURA 2.4. A previsão é de que esses gastos cheguem a no mínimo Us\$ 16 bilhões até 2010 no mundo todo, segundo DeGARMO (2004).

FIGURA 2.4 - Perfil de gastos anuais do Departamento de Defesa americano para VANTs, em milhões de dólares por ano (DeGARMO, 2004).

A seguir são listadas algumas previsões de investimentos em VANTs em diversos países:

- A França está estudando substituir o caça Rafale por um VANTC. Ela possui um programa de Us\$ 350 mi para produzir um VANTC até 2015 que seja capaz de transportar duas bombas guiadas de 230 kg. A França também está interessada em desenvolver ou adquirir sistemas AALA e MALA.
- A força aérea inglesa, através de seu programa *Whatchkeeper*, de Us\$ 1,3 bilhões, pretende adquirir VANTs MALA e VANTT.
- A força aérea italiana está desenvolvendo um VANTC, que deve estar em operação até 2008.
- A Suécia tem desenvolvido e operado VANTs de pequena escala, mas pretende se juntar aos franceses no desenvolvimento do VANTC contribuindo com aproximadamente Us\$ 80 milhões.
- A Alemanha pretende adquirir o VANT americano Global Hawk.

- O estado de Israel tem desenvolvido e operado um grande número de VANTs, primariamente para operações de inteligência. Eles também possuem diversos contratos de fornecimento de VANTT com diversos clientes estrangeiros.
- Os militares russos têm avaliado diversos VANTT de fabricantes russos. A empresa *Yakolev* está estudando o desenvolvimento de um VANTC; A *Tupolev* pretende desenvolver um VANT MALA; e a *Sukhoi*, em conjunto com a *Dassault* está também desenvolvendo um VANT.
- A Austrália também está considerando a aquisição de um VANTC e do Global Hawk da *Boeing*.

Essas são apenas algumas das iniciativas em curso. De acordo com uma estimativa européia, o gasto mundial agregado com VANTs militares de 2003 ate 2012 será de 25 bilhões de Euros (DeGARMO, 2004).

Segue uma lista das principais aplicações militares de VANTs:

- **Reconhecimento**
 - Fotografia
 - Visualização Eletro Óptico / Infra Vermelho
 - Radar de abertura sintética
 - Inteligência de sinal (SIGINT)
 - Detecção de minas
- **Apoio**
 - Interferência em rádio-comunicação
 - Interferência em radar
 - Iluminação / marcação a laser de alvo
 - Retransmissão de dados (comunicação)
 - Mapeador Digital
 - Combate
 - Transporte Logístico
 - Ataque ar-solo:
 - Ataque ao Solo (ex.: *Predator* no Afeganistão)
 - Supressão de defesas aéreas inimigas
 - Ataque ar-ar:
 - Interceptação

2.1.3 Carga típica

Apesar de estruturalmente um VANT se aproximar do projeto de um motoplanador ou avião, a sua carga paga é normalmente de tecnologia muito avançada e exige grande infraestrutura. Desse ponto de vista, o projeto de VANTs mais se aproxima do de um moderno caça-bombardeiro, segundo JAXA-MALACHOWSKI (1996). Na TABELA 2.1 estão listados alguns equipamentos, sensores e sistemas típicos de VANTs.

TABELA 2.1 – Exemplos de carga-paga típica de um VANT.

Aplicação	Equipamento
Meteorologia	Sensores de umidade, pressão, temperatura, CO ₂
Retransmissão de dados	Satcom
Geologia	Magnêtometro
Cartografia, espionagem, reconhecimento, patrulha...	Câmara digital, Câmera infravermelha para visão noturna, SAR, FLIR, apontador de alvo Laser, ELINT, LIDAR
Agricultura	Máquina fotográfica digital

2.1.4 Especificações típicas da missão de um VANT:

Já foi exibida na FIGURA 2.3 a divisão dos diversos tipos de VANTs no mercado. As especificações variam enormemente com o tipo de missão e o tipo de VANT empregado.

Considerando as missões mais frequentes, que são militares e de reconhecimento, podemos considerar que elas requerem:

- Missões de longa duração (em alguns casos até mais de 24 horas)
- Altitude de vôo de 7000 m a 10000 m (para VANTs tipo MALA)
- Altitude de vôo de 10000 m a 20000 m (para VANTs tipo AALA)
- Carga-paga de até 50 kg a 250 kg
- Transporte de vários sensores e antenas
- Baixo custo de operação e manutenção

Já VANTs menores em geral requerem:

- Missões de curta duração (em geral uma a duas horas)
- Altitude de vôo de até 1000 m, em geral de 100 m a 300 m
- Carga-paga de até 5 kg
- Transporte de pequenos sensores, e equipamento de vídeo/foto digital
- Baixo custo de operação e manutenção

Alguns exemplos de características como alcance, altitude e vôo, autonomia e carga paga para diferentes tipos de VANTs são exibidos na FIGURA 2.5.

FIGURA 2.5 – Classificação típica utilizada para VANTs militares de reconhecimento (III CONFERÊNCIA..., 2005).

2.2 Operação dos VANTs

2.2.1 Decolagem

Existem várias maneiras de uma aeronave alçar voo. Cada tipo de procedimento de decolagem é mais adequado a um tipo de operação. Quando operando a partir de um local onde exista uma pista de decolagem, pode-se usar a maneira mais simples, que é equipar a aeronave com um trem de pouso e decolar de uma pista. Para que a aeronave fique mais leve, pode-se usar um carrinho que é preso à aeronave, e se solta após a decolagem. Esse tipo de decolagem foi muito utilizado em planadores. Também é característico do *Messerschmitt 163 Comet*, onde causou alguns problemas. A desvantagem é que o pouso não pode ser feito da mesma forma, sendo necessário um patim ou outro método. Uma alternativa, para operação em locais onde não exista uma pista de decolagem, como locais remotos, estações móveis ou a partir de barcos ou navios, pode ser a utilização de trilhos ou de uma catapulta. Existe porém o mesmo problema de pouso do método de decolagem com carrinho. Deve-se também, neste caso, considerar no projeto as acelerações durante o lançamento. Segundo THOMPSON et al. (1994), elas são em torno de 5g. Algumas vezes, para decolagens curtas, pode-se utilizar foguetes auxiliares. Outra possibilidade é o lançamento a partir de um avião, que economiza tempo e combustível em missões mais longas.

2.2.2 Navegação

Com o estabelecimento do sistema NAVSTAR em 1981, mais conhecido como Sistema de Posicionamento Global (GPS), é possível navegar por todo o globo terrestre com uma precisão de alguns poucos metros. Ele foi primariamente desenvolvido para uso militar, mas em 1995 foi oficialmente declarado operacional para uso civil. O GPS é formado por uma constelação de 24 satélites de navegação em uma órbita quase-síncrona em alta altitude. Eles transmitem continuamente dados sobre sua efeméride e erros de horário. Assim, um receptor GPS recebendo dados de pelo menos três satélites pode calcular sua posição exata sobre o globo.

Além do sistema americano, existe o seu equivalente russo, “Glonass” (Sistema de satélites de navegação global) composto por 21 satélites. Ele foi oficialmente declarado operacional em 1993 pela federação Russa, segundo GLONASS...(2004).

Além desses dois, segundo COMMUNICATION...(2004), a comunidade européia pretende lançar o seu próprio sistema de navegação por satélite (GNSS), chamado de Galileo, composto por 30 satélites. Ele deverá estar operacional em 2008.

Em julho de 2003, o FAA (Autoridade federal de aviação nos Estados Unidos) tornou operacional um novo sistema de melhora de sinal do GPS, chamado WAAS (Sistema de aumento de área extensa), que permite precisão de um a 1,5 metros em 90 % do território americano. Instrumentos compatíveis com esse sistema já permitem aproximações a até 100 m de altitude com visibilidade de até 1600 m em mais de 5400 pistas.

Além de obviamente possuir um sistema de navegação, é essencial que o VANT esteja integrado ao sistema de tráfego aéreo e em comunicação com o ATC (Controle de Tráfego Aéreo). Existem ainda muitos empecilhos regulatórios que complicam essa questão. Eles serão abordados no item 2.4.

Alguns exemplos do que hoje já existe em termos de integração e sistemas de navegação de VANTs no sistema de tráfego aéreo são destacados a seguir.

Na África do Sul, conforme apresentado por FERREIRA (2005), já existe um acordo com as autoridades locais, a *Civil Aviation Authority* (SA-CAA) e a *Air Traffic & Navigation Services* (ATNS), permitindo a operação de VANTs, desde que seja demonstrado que eles oferecem a mesma segurança que operações de aeronaves tripuladas. Lá são feitas as seguintes exigências ao operador do VANT:

- Preencher um plano de vôo;
- Seguir as normas de vôo IFR;
- Estar em comunicação VHF com o ATC, direta e através de retransmissão pelo VANT;

- VANT estar equipado com *Transponder* com modo “C”;
- Procedimentos de emergência;
 - Vôo pré-programado em caso de perda de contato de comunicação;
 - Pára-quedas para limitar impacto em caso de queda;
- Piloto remoto qualificado.

Na França, desde Janeiro de 2004, está valendo a norma de operação militar “DIRCAM” Instrução 2250, conforme ALLOUCHE (2005). Essa norma estabelece que se deve usar corredores especiais de VANTs quando transitando entre áreas restritas e respeitando margens de segurança às bordas do espaço aéreo, 4,5 km de afastamento lateral e 150 m de afastamento superior e inferior. O afastamento de outras aeronaves dentro do espaço aéreo restrito deve ser de 9,2 km / 300 m.

Além disso, na França e também na Alemanha e na Inglaterra já é permitido o voo de VANTs sobre cidades, desde que com MTOW de até 15 kg, de acordo com CELESTINO (2005).

Em Israel, onde o espaço aéreo é totalmente controlado por autoridades militares, a operação de VANTs já está integrada ao espaço aéreo, pelas características políticas e governamentais singulares daquele país, altamente militarizado.

2.2.3 Pouso

O pouso pode ser feito de maneira convencional, numa pista de pouso e decolagem, por controle remoto ou automatizado. A aeronave pode também ser capturada em uma rede (FIGURA 2.6). Essa última operação é mais adequada para locais remotos ou baseados em mar. Outra alternativa para a recuperação do VANT é o uso de pára-quedas, ou para VANTs menores, sacos de ar (*air-bags*). No caso de sacos de ar, os mesmos são acionados após o VANT entrar em estol profundo (*deep stall*).

FIGURA 2.6 – Recuperação por rede (uavcenter.com/english/wwuavs/asia/images/).

Uma outra solução engenhosa é a mostrada por SHAMMAI (2005). A solução, para um VANT de aproximadamente 60 kg, constitui-se no uso não de um pára-quedas mas sim de um parapente (um pára-quedas com razoável razão de planeio e controlabilidade), para pousar em espaços muito reduzidos (FIGURA 2.7).

FIGURA 2.7 – Recuperação por parapente, SHAMMAI (2005).

2.3 Custos aproximados de operação e desenvolvimento de um VANT

A principal vantagem do uso de VANTs, além da eliminação de risco à tripulação, é o potencial baixo custo de operação em relação aos aviões tripulados ou satélites. Em muitos casos o VANT os substitui, além de com um menor custo, com melhor desempenho.

Como exemplo, THOMPSON et al. (1994) citam o custo de reconhecimento de condições meteorológicas severas, utilizando aeronaves Orion ou Hércules, sendo de Us\$ 10.000,00 por hora de voo. O custo de levantamento geológico aéreo com aviões tripulados é de Us\$ 2.500,00 por hora de voo. O custo estimado para um VANT é de Us\$ 150,00 e Us\$ 100,00 respectivamente.

Outro exemplo de custo é um sistema chamado Sistema Rápido de Teste de Voo de Protótipos (SRTVP), desenvolvido por HALLBERG et al. (1999). Seu objetivo é testar novos algoritmos de controle de VANTs. Ele é composto por um VANT de teste equipado com aviônicos necessários para voo autônomo, e por uma estação de terra responsável pelo controle de voo do VANT e coleta de dados. Eles procuraram fazer uso extensivo de tecnologia disponível comercialmente para torná-lo mais econômico.

Além desses equipamentos, fazem parte do sistema SRTVP um computador pessoal, uma estação de trabalho Sun®, um conversor A/D de 6 canais, e um rádio controle Futaba®, além de outros cujo custo são menos relevantes. Abaixo, na TABELA 2.2 estão discriminados os maiores custos envolvidos no desenvolvimento do SRTVP. Na TABELA 2.3 estão listados os custos de desenvolvimento de vários tipos de aeronaves, a título de comparação.

TABELA 2.2 - Custos estimados de desenvolvimento do SRTVP.

Sistema	Custo (Us\$)
UMI (Unidade de Medida Inercial)	11.000,00
DGPS	600,00
Dois Modens	5.000,00
Piloto automático	300,00
Motor	1.100,00

Fonte: HALLBERG et al.(1999)

TABELA 2.3 - Comparativo de custo de desenvolvimento entre aeronaves tripuladas e VANTs.

Missão / Avião	Data de Início do programa	Data do 1º Voo	Custo atualizado p/ 1º Voo em milhões de Us\$
Reconhecimento			
U2	12/54	08/55	243
VANT RQ-4/Global Hawk	10/94	02/98	205
Ataque / Combate			
F-16	02/72	01/74	103
VANTC X-45	03/98	03/01	102
Reconhecimento / Penetração			
SR-71	08/59	03/62	915
D-21	03/63	02/65	174
Furtivo			
XST/Have Blue (F-117)	03/76	12/77	103
VANT RQ-3/DarkStar	06/94	03/96	134

O programa "Aeronave de pesquisa ambiental e Tecnologia de sensoriamento" (ERAST) é uma iniciativa da NASA para desenvolver um VANT de demonstração que seja economicamente viável para missões científicas. Dois perfis de missão científica foram identificados pela comunidade científica como sendo críticos para a coleta, identificação, e monitoramento de dados ambientais para a avaliação de mudança global. A primeira é o voo até altitudes extremas, definidas pela região de 24 km até 30 km de altitude, com capacidade de

carga útil de 230 kg e com um tempo mínimo de permanência em altitude de 2 horas. A segunda missão é definida como excedendo 96 horas em operação contínua a altitudes de 15 km até 23 km levando uma carga útil de no mínimo 450 kg. Para cada missão, o custo máximo desejado por hora de voo é de Us\$ 5.000,00. Ambas as missões devem ser feitas a velocidades subsônicas para evitar a alteração química das amostras, conforme PATHFINDER... (2003).

2.4 Certificação e regulamentação

O uso do espaço aéreo e os requisitos de certificação das aeronaves são regulados por legislações nacionais e internacionais, por autoridades civis e militares (KÜKE, 2002).

Exemplos são:

- Militares
 - MIL-STD (EUA), STANAG (OTAN), Decea (Brasil)
- Cíveis
 - Nacionais: FAA (EUA)
 Decea, CAVC (Brasil)
 - Multinacionais: JAA (Europa)
 Eurocontrol (Europa)
 ECAC (Europa)
 - Internacionais: ICAO

No Brasil, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (Decea) está subordinado ao Comando da Aeronáutica – Ministério da Defesa, e sua missão é de planejar, implantar, integrar, normatizar, coordenar e fiscalizar as atividades de controle do espaço aéreo brasileiro, de telecomunicações aeronáuticas e de informática.

O CAVC (Certificação de Aviação Civil), subordinado ao Comando da Aeronáutica – Ministério da Defesa / CTA (Centro Técnico Aeroespacial) / IFI (Instituto de fomento e Coordenação Industrial) é o responsável no Brasil pela certificação de aeronaves e produtos aeronáuticos.

Também no Brasil o Departamento de Aviação Civil (DAC), uma organização também subordinada ao Comando da Aeronáutica – Ministério da Defesa, cuja missão é estudar, orientar, planejar, controlar, incentivar e apoiar as atividades da Aviação Civil pública e privada, tem por finalidade a consecução dos objetivos da Política Aeroespacial Nacional no setor da Aviação Civil. O DAC divulga o Código Brasileiro de Aeronáutica (CBAer) e os Regulamentos Brasileiros de Homologação Aeronáutica (RBHA).

As normas e requisitos em geral, evoluíram historicamente de lições aprendidas a partir de acidentes e incidentes, não possuem uma metodologia definida e nem sempre possuem justificativa racional. Por essas razões, VANTs com suas características especiais não são apropriadamente considerados por essas normas e regras. Atualmente, os construtores de VANTs têm procurado seguir as regras aplicáveis às aeronaves tripuladas.

Não obstante, muitas missões já têm sido realizadas por VANTs, mas predominantemente na área militar. E até agora, na maior parte dos países, apenas em espaços aéreos restritos, sobre áreas de baixa densidade populacional, e com autorizações especiais prévias. Uma das poucas exceções é o estado de Israel, que vive num permanente estado de guerra, e por isso o espaço aéreo é totalmente controlado por autoridades militares, conforme KOFFLER (2005).

No presente momento, devido às emergentes aplicações civis e comerciais, já começa, principalmente nos países desenvolvidos, a existir uma demanda para se operar VANTs sobre áreas populosas e utilizar o espaço aéreo não segregado. Isso implica no estabelecimento de regras para tal, mais precisamente, regras de aeronavegabilidade (*airworthiness*), que determinem normas de projeto seguros e confiáveis, e normas de operação que permitam a integração no espaço aéreo civil. Ou seja, que determinem regras, requisitos de sistemas anticollisão, qualificação do operador e controlador, manutenção, etc. (ALLOUCHE, 2005).

Para atingir esse objetivo, foram estabelecidas várias comissões, comitês e grupos. Alguns deles são:

- UISCO - *UAV Safety Issues for Civil Operations* (Europa)
- USAR – *UAV System Airworthiness Requirements* (França)
- JAA – *Eurocontrol UAV Task-Force* (Europa)
- *Unmanned Aerial Vehicle Planning Task Force* (E.U.A)
- *Joint Planning and Development Office (JPDO) UAV National Task Force (UNTF)* (E.U.A)

No Brasil ainda não há nenhuma norma relativa a operação de VANTs. Porém está em discussão pública uma proposta de RBHA, conforme PROPOSTA...(2004). Segundo o texto atual da proposta, VANTs só podem ser operados no Brasil se tiverem menos de 20 kg e se operados por controle remoto. Se tiverem mais de 20 kg, só podem ser operados com autorização especial prévia, sobre áreas desabitadas.

VANTs autônomos não podem ser operados. A proposta entretanto abre uma brecha, definido que “veículos aéreos não tripulados operados pelas Forças Armadas ou por organizações de pesquisas e desenvolvimento fiscalizadas pelo governo federal” não estão submetidos ao referido regulamento.

Como mostra DeGARMO (2004) em seu trabalho, as propostas de requisitos em geral determinam que os VANTS apresentem um nível “equivalente de segurança”, num quesito chamado de **detectar e evitar**, ao de uma aeronave tripulada. **Detectar e evitar** significa detectar outras aeronaves próximas e evitar rotas de colisão com as mesmas. Isso é algo muito subjetivo, dado que existem diferenças nos hábitos, habilidades e destreza dos humanos. Nem todos pilotos possuem a mesma acuidade visual, a mesma percepção de profundidade de campo, não despendem a mesma quantidade de tempo olhando pela janela e nem seguem técnicas consistentes de varredura. Além disso, o ambiente operacional também varia devido às condições climáticas, e ao fato de que nem todos os aviões oferecerem a mesma visibilidade externa.

De fato, muitas das situações em que ocorrem colisões em voo acontecem durante boas condições climáticas, o que leva a crer que um piloto humano não é uma boa referência.

Outra questão a ser considerada é que se for permitido aos VANTs operar em condições VFR, seria de se esperar que os pilotos de aeronaves tripuladas também os detectassem. Mas muitos dos VANTs são pequenos, difíceis de se ver. E mesmo que vistos, seria difícil ao piloto julgar sua distância e velocidade relativa. Essa é uma questão difícil de se tratar para estabelecer uma regra do tipo **detectar e evitar**.

Além da dificuldade de estabelecer um requisito, existe a dificuldade quanto aos sensores que cumpram esses requisitos. Os meios ópticos existentes hoje ainda são suscetíveis às condições de visibilidade, e radares não se adequam a equipar VANTs menores, que possuem restrições de carga paga e de custo. O mesmo problema ocorre com o *transponder*, que é adequado aos VANTs maiores, mas não aos menores. O *Traffic Collision Avoidance Systems* (TCAS), (Sistema anticolisão de tráfego), também tem sido proposto como um sistema anticolisão para VANTs, mas estudos indicam que ele apenas é recomendável para VANTs maiores, com o VANT *Global Hawk*.

Não obstante, muita pesquisa ainda tem sido feita aproveitando as tecnologias disponíveis para criar um sistema eficiente que cumpra o requisito **detectar e evitar** (eletro-ópticos, infravermelho, *transponders*, radio, *Automated Dependent Surveillance-broadcast* (ADS-B), etc.). Com a tendência de miniaturização, eles ainda podem vir a serem favorecidos. Existem inclusive previsões de que em breve radares leves e de baixo custo estejam disponíveis.

Outra tendência atual é o desenvolvimento de sistemas que reúnam e utilizem concomitantemente todas as informações provenientes de vários sistemas de identificação e anticolisão, e possam com isso atingir um nível bem maior de confiabilidade.

Uma outra abordagem possível é o uso da nascente tecnologia de visão computadorizada, que deve estar disponível no mercado com uma resolução muito maior que a atual num futuro próximo, sendo assim mais uma solução viável.

2.5 Iniciativas de VANTs no Brasil

A seguir são relacionadas as principais iniciativas governamentais e de centros de pesquisa no desenvolvimento de tecnologias relacionadas aos VANTs, no Brasil.

2.5.1 Acauã - CTA

Com mostra OLIVEIRA (2005), na década de 80, o CTA teve a necessidade de um alvo aéreo manobrável para o desenvolvimento do míssil MAA-1 Piranha. Com isso, iniciou um programa de capacitação em VANT, chamado Projeto Acauã (FIGURA 2.8). O VANT Acauã tinha como finalidade servir de banco de ensaios para o desenvolvimento de um sistema de controle e telemetria de um futuro alvo aéreo manobrável (AAM) de alto desempenho, que era previsto para os ensaios do programa do míssil Piranha. Essa iniciativa foi descontinuada nos anos 90 por falta de verbas.

FIGURA 2.8 - VANT Acauã desenvolvido no CTA na década de 80 (III CONFERÊNCIA..., 2005).

O Acauã servirá de plataforma para o projeto FINEP, discutido adiante, no item 2.5.4.

2.5.2 Arara Embrapa / USP

O projeto ARARA (Aeronaves de Reconhecimento Assistidas por Rádio e Autônomas), em desenvolvimento no Lab. de Computação de Alto Desempenho do ICMSC-USP em São Carlos desde 1998, em parceria com a EMBRAPA, visa através de quatro fases distintas, desenvolver um sistema VANT para sensoriamento remoto aplicado à agricultura conforme JORGE (2004) e NERIS (2001). O projeto já inclui uma aeronave capaz de operar remotamente,

um sistema de telemetria completo, e capta imagens. Atualmente está em desenvolvimento um sistema para voo autônomo.

2.5.3 Aurora CenPRA

O projeto Aurora, iniciado em 1997 pelo CenPRA (Centro de Pesquisas Renato Archer), do Minist. da Ciência e Tecnologia, na DRVC (Divisão de Robótica e Visão Computacional), visa desenvolver um sistema de controle e navegação autônomo. A plataforma utilizada é a de um balão dirigível (FIGURA 2.9).

De acordo com RAMOS (2005), o projeto já estabeleceu competências nas seguintes áreas:

- Modelagem dinâmica e identificação
- Ferramentas de simulação
- Arquitetura de hardware e integração sensorial
- Arquitetura de software básico e tempo real
- Telemetria e interface de operação
- Métodos de controle e guiagem
- Controle e navegação baseado em visão
- Planejamento e execução de trajetórias
- Arquitetura híbrida: deliberação e reação

FIGURA 2.9 - VANT Aurora, plataforma de desenvolvimento dos sistemas autônomos em desenvolvimento no CenPRA (RAMOS, 2005).

2.5.4 Projeto VANT Finep

Conforme MUNARETTO (2005), em 14 de junho de 2004 foi publicado no Diário Oficial da União, Seção 1, a Portaria nº 606 de 11 de junho de 2004, onde o Ministério da Defesa estabelece as diretrizes para desenvolvimento de VANT pelas Forças Armadas e Indústria de Defesa. A Portaria nº 606, conforme BRASIL (2004a) diz que:

Art. 7º São objetivos estratégicos que permitem a implementação da Diretriz de Obtenção de Veículos Aéreos Não Tripulados:

I - estabelecer os objetivos de curto, médio e longo prazo referentes a VANT;

II - orientar as Forças nos seus planejamentos estratégicos;

III - estimular e intensificar cooperações e interações entre as Forças;

IV - elevar a capacitação industrial e tecnológica dos setores de interesse da área de defesa; e

V - criar condições para o aperfeiçoamento das indústrias de defesa, da base tecnológica e da atração de novos parceiros no desenvolvimento de projetos de aplicação dual.

Logo em seguida foi estabelecida uma Comissão permanente de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) conforme BRASIL (2004b), para dar início a execução dessas diretrizes.

Assim, no final de 2004, o CTA, em parceria com a Avibrás e instituições de C&T do Exército (CTEx) e Marinha (IPqM), tiveram a aprovação do Projeto VANT pela FINEP, com a utilização de recursos do Fundo do Setor Aeronáutico (CT-Aero). O Projeto receberá R\$ 9 milhões, sem incluir as bolsas de pesquisa, na primeira fase de 3 anos (III CONFERÊNCIA..., 2005). Na FIGURA 2.10 vê-se um cronograma do projeto FINEP, cujo prazo final é 2016.

FIGURA 2.10 – Cronograma da Diretriz de Obtenção de Veículos Aéreos Não Tripulados do projeto Finep (MUNARETTO, 2005).

O projeto utilizará como plataforma de voo o VANT Acauã, já existente, e será desenvolvido um Sistema de Navegação e Controle (SNC) completamente novo, inclusive com navegação autônoma.

Os Participantes do projeto são:

- Financiadora de Estudos e Projetos (MCT)
- Fundação Casimiro Montenegro Filho
- Centro Técnico Aeroespacial (COMAER) (coordenador do projeto)
- Centro Tecnológico do Exército
- Instituto de Pesquisas da Marinha
- Avibrás

2.6 Análise Paramétrica

O Global Hawk é provavelmente o VANT avançado mais bem sucedido até o momento. Ele é constituído de uma fuselagem convencional de alumínio e asa de carbono laminado. Existem atualmente em andamento muitos programas de desenvolvimento de carga útil que prevêem a sua utilização. O projeto teve início em 1995, como parte de um programa americano de desenvolvimento de um conjunto de VANTs para inteligência, reconhecimento e vigilância militar. O programa, chamado de Tier, inicialmente previa a construção de três tipos de aeronaves. A primeira foi o Tier I, hoje conhecido como GNAT-750, que foi produzido para a operação de observação da CIA na Bósnia em 1994. A segunda foi o Tier II, hoje Predator, que voou em missões de vigilância nos Bálcãs no final dos anos 90. A terceira, o Tier III, inicialmente deveria ter a capacidade de carga útil, alcance e autonomia que tem o Global Hawk atualmente, e ainda ser “furtiva”, como o bombardeiro B-2. Ele foi cancelado por ter custos inaceitáveis, e foi substituído por duas aeronaves. A Tier II+, o Global Hawk, e a Tier III-, o DarkStar, uma aeronave com tecnologia “furtiva”, mas de autonomia e carga útil menor, de acordo com LOEGERING (2002). O programa do DarkStar acabou sendo interrompido, mas o Global Hawk ainda está sendo desenvolvido como demonstrador de tecnologia de conceitos avançados, o que o desobriga de seguir uma grande quantidade de regulamentos associados a aquisições militares. Esses são apenas quatro exemplos representativos. Como já dito antes, existe um número muito grande de VANTs em desenvolvimento e em operação, com grande sucesso, e seria impossível citar todos eles aqui.

A seguir são exibidas fotografias de diversos VANTs, das mais variadas aplicações. Pode-se rapidamente notar que apesar dos diferentes tamanhos, duas características são frequentes: asas de grande alongamento e configurações de cauda menos usuais do que os

utilizados na aviação em geral. Há também a tendência de se utilizar o motor na posição propulsora.

FIGURA 2.11 - Altus (Fonte: http://www.dfrc.nasa.gov/airsci/UAV_Specs/altus_specs.html).

FIGURA 2.12 - Altair/Predator B
(Fonte: <http://www.dfrc.nasa.gov/Newsroom/ResearchUpdate/PredatorB/index.html>).

FIGURA 2.13 - Gnat 750 (Fonte: [http://uav.wff.nasa.gov/UAVDetail.cfm?RecordID=Gnat 750](http://uav.wff.nasa.gov/UAVDetail.cfm?RecordID=Gnat%20750)).

FIGURA 2.14 –Prowler (Fonte: http://uav.wff.nasa.gov/db/uav_char.html?key=19).

FIGURA 2.15 - Perseus B (Fonte: www.nasa.gov/centers/dryden/history/pastprojects/Erast/perseusb.html).

FIGURA 2.16 - Scorpion 100 (Fonte: <http://www.freewing.com/scorpion100-50.html>).

FIGURA 2.17 - Pointer (Fonte: <http://www.aerovironment.com/area-aircraft/prod-serv/pointer.html>).

FIGURA 2.18 – Proteus (Fonte: www.nasa.gov/centers/dryden/news/FactSheets/FS-069-DFRC.html).

FIGURA 2.19 – RQ-1A Predator (Fonte: http://uav.wff.nasa.gov/db/uav_char.html?key=18).

FIGURA 2.20 – RQ-2B Pioneer (Fonte: http://www.puav.com/pioneer_specifications.asp, http://uav.wff.nasa.gov/db/uav_char.html?key=12).

FIGURA 2.21 – RQ-3 Dark Star (Fonte: http://uav.wff.nasa.gov/db/uav_char.html?key=37).

FIGURA 2.22 - RQ-4A Global Hawk (Fonte: http://www.fas.org/irp/program/collect/global_hawk.htm).

FIGURA 2.23 – Hélios (Fonte: <http://www.dfrc.nasa.gov/Gallery/Photo/Helios/HTML/EC99-45161-9.html>).

FIGURA 2.24 – Heron (Fonte: <http://www.israeli-weapons.com/weapons/aircraft/uav/heron/Heron.html>).

FIGURA 2.25 – Hunter (Fonte: <http://www.fas.org/irp/program/collect/hunter.htm>).

FIGURA 2.26 – Luna (Fonte: www.emt-penzberg.de).

FIGURA 2.27 – Pathfinder (Fonte: www.nasa.gov/centers/dryden/news/FactSheets/FS-034-DFRC.html).

FIGURA 2.28 – Outrider (Fonte: <http://www.fas.org/irp/program/collect/outrider.htm>).

As duas próximas figuras exibem dois VANTC em desenvolvimento, apenas a título de informação. Essas aeronaves possuem características diferenciadas em relação aos VANTs.

FIGURA 2.29 - X-45 (Fonte: <http://www.boeing.com/phantom/ucav.html>, <http://www.dfrc.nasa.gov/Research/X45A/index.html>).

FIGURA 2.30 - X-47 (Fonte: <http://www.airforce-technology.com/projects/x47/>).

Na TABELA 2.4 estão compilados alguns dados técnicos de alguns dos VANTs exibidos anteriormente.

TABELA 2.4 – Dados de vários VANTs.

VANT	Pot. (Hp)	Veloc. Cruzeiro (km/h)	Comp. (m)	Enverg. (m)	Alongamento	Altitude Max (m)	Autonom. (hr)	MTOW (kg)	Carga útil (kg)
Altair	750	nd	11,0	26,2	23,5	15850	30	3175	300
Altus	100	nd	7,2	16,9	23,2	21000	30	975	150
Gnat 750	120	85	5,3	10,8	19,0	7620	48	520	63
Helios	28	270	3,6	75,0	31,0	30000	100	930	329
Heron	100	200	8,5	16,6	21,2	9150	nd	1100	250
Hunter	nd	nd	6,9	8,9	nd	4880	10	725	113
Luna	nd	70	2,4	4,2	nd	3500	3	nd	nd
Outrider	nd	200	3,0	3,4	nd	4600	4,9	175	nd
Pathfinder	nd	32	3,6	29,5	12,0	nd	nd	252	45
Perseus A	nd	Nd	8,0	17,9	14,3	25000	6	830	50
Perseus B	100	180	7,6	21,8	26,4	19800	24	998	120
Pointer	0,4	50	1,8	2,8	nd	900	1,5	4,53	1
Proteus	nd	Mach 0,42	17,2	28,0	28,1	19200	18	5700	nd
Prowler	38	101	3,4	5,5	nd	6400	6	91	22,7
RQ-1A Predator	105	167	8,2	14,8	19,2	7900	24	1040	205
RQ-2B Pioneer	26	148	4,3	5,2	nd	4600	5,5	204	45
RQ-3 Dark Star	1900	463	4,6	21,1	14,8	14000	10	3900	450
RQ-4A Global Hawk	nd	635	13,5	35,4	25,0	20000	42	11200	862
Scorpion 100	65	138	3,6	4,9	nd	4600	6,5	215	27

No gráfico exibido na FIGURA 2.31 a seguir, são exibidos os dados compilados da TABELA 2.4.

FIGURA 2.31 – Visualização gráfica da tabela anterior.

A partir dos dados exibidos na TABELA 2.4, é feita uma análise paramétrica das características geométricas dos VANTs. Na FIGURA 2.35, FIGURA 2.32, FIGURA 2.33,

FIGURA 2.35 e FIGURA 2.36 é possível identificar a tendência de aumento da autonomia do teto operacional, da envergadura, do MTOW e da carga útil com o aumento do alongamento.

FIGURA 2.32 – Variação da autonomia com o alongamento.

FIGURA 2.33 – Variação do teto operacional com o alongamento.

FIGURA 2.34 – Variação da envergadura com o alongamento.

FIGURA 2.35 – Variação do MTOW com o alongamento.

FIGURA 2.36 – Variação do Carga-útil com o alongamento.

2.7 Características típicas de projeto

A maioria dos VANTs é muito semelhante às aeronaves da aviação em geral, utilizando os mesmos princípios de projeto. A carga do VANT, por sua vez, é de alta tecnologia e ela necessita de uma grande infra-estrutura. Um programa de desenvolvimento de um VANT pode ser dividido nas seguintes áreas de projeto:

- propulsão
- aeronave (plataforma)
- equipamento da missão
- piloto automático
- sistemas de controle e transmissão de dados
- planejamento da missão
- estação de operação em terra
- unidade de lançamento e recuperação
- unidade de logística

Cada uma dessas áreas pode desenvolver-se independentemente, embora o posterior processo de integração seja por muitas razões parte crucial do projeto. O projetista tem de ter em mente todos os problemas que possam surgir, o que leva à crescente colaboração entre equipes diversas de projeto. O projeto sempre deve começar com uma pesquisa de mercado e de especificações do operador. Sua funcionalidade de operação e manutenção deve ser matéria de interesse, pois são fatores vitais que influenciam no sucesso do serviço. Missões além das

especificadas também devem ser investigadas. O processo pode levar a melhores capacidades multi-missão. A análise dos métodos específicos de lançamento e recuperação, assim como do planejamento estratégico da missão também são vitais para o sucesso de um bom projeto. Toda a infra-estrutura de suporte de terra também deve ser levada em conta pois ela tem influência significativa no custo.

É interessante considerar também que os órgãos que regulam a operação e tráfego aéreo ainda não criaram nenhuma legislação específica de operação de VANTs, como citado no item 2.4, mas não tardará para que ela seja criada. O tema já está em franca discussão. Assim, deve-se ter em mente que o VANT deve seguir os requisitos de certificação aeronáuticos e deve estar integrado ao tráfego aéreo e a suas normas e deve manter comunicação via rádio com o Controle de Tráfego Aéreo (ATC), via um operador em solo, quando operando em regiões controladas.

A seguir são tecidas algumas considerações a respeito de algumas das áreas de projeto de VANTs.

2.7.1 Sistema de propulsão

A configuração propulsora de motor, mostrada na FIGURA 2.44, tem várias vantagens. Por ser o fluxo sobre a superfície da estrutura à frente do motor mais lento do que seria numa configuração convencional, o arrasto de atrito viscoso é menor. Além disso, a zona de baixa pressão à frente da hélice contribui para que não se forme um gradiente adverso de pressão na superfície da estrutura, mantendo o escoamento colado por mais tempo e conseqüentemente diminuindo o arrasto de pressão e aumentando o CL_{max} . Mas a vantagem mais importante dessa configuração é manter o nariz da aeronave limpo, permitindo a fixação de instrumentos de medição livremente, sem interferência de sistemas do motor e sem perturbações no fluxo causadas pela hélice, no caso de serem feitas medições atmosféricas.

Quatro opções de motorização podem ser consideradas para o caso aqui estudado: turbofan, turbo-hélice, motor elétrico e motor a pistão, sendo este último aspirado ou turbo-alimentado.

Turbofans são mais apropriados para vôos a grandes altitudes (acima de 15000 m) e/ou de grande velocidade. Eles têm alta confiabilidade, altíssimo custo de aquisição e alto consumo. Motores a pistão são baratos, têm baixo consumo e podem ser usados até 20000 m com o uso de dois compressores em série. A desvantagem é a baixa confiabilidade do sistema. Muitos VANTs utilizam motores rotativos, que possuem uma relação peso/potência mais baixa (FARMER, 2005). Já os motores turbo-hélice se enquadram entre os dois, aliam as vantagens do motor turbofan com um melhor rendimento em médias altitudes e menores velocidades em que aquele opera.

O uso de motores elétricos alimentados por painéis solares é um desafio promissor aos projetistas atualmente, segundo GUGLIERI e QUAGLIOTTI (1996). A grande vantagem de

motores elétricos é a possibilidade de se obter grande autonomia, pois a fonte de energia não vem dos combustíveis convencionais. Teoricamente seria possível obter uma autonomia indefinida, se a fonte de energia fosse baseada em energia solar. Autonomia é essencial para o VANT em aplicações onde ele potencialmente substitua satélites de comunicação. O problema é a acumulação de energia elétrica para a inevitável escuridão da noite. As baterias recarregáveis que existem atualmente ainda são muito pesadas. O método mais eficiente sugerido é o do ciclo fechado de célula de carga. Ele usa a eletricidade proveniente de células fotovoltaicas para quebrar água em hidrogênio e oxigênio durante o dia, e à noite a célula de combustível produz eletricidade e água como resíduo, fechando o ciclo. Mas ainda existem grandes limitações, como a baixa eficiência do processo de conversão de energia solar em elétrica, a dificuldade de adaptar as células fotovoltaicas à curvatura do perfil, a limitação a regiões e períodos de tempo com boa insolação e finalmente, ao peso dos sistemas de células de carga. YOUNGBLOOD et al. (1984) propuseram um VRP elétrico misto, usando células fotovoltaicas durante o dia e uma célula de combustível de hidrogênio-oxigênio (H_2-O_2) para suprir a energia durante a noite, por vários dias. O oxigênio seria retirado do ar e o hidrogênio levado a bordo. O resultado da análise foi uma aeronave muito grande e com pouca carga útil.

Um dos VANTs movidos à energia solar mais avançados em desenvolvimento atualmente é o Hélios, segundo artigo da SUSPENDED... (2003). Desafortunadamente o protótipo caiu em junho de 2003, durante um ensaio. Não obstante, a empresa que está desenvolvendo o projeto, a AeroVironment, pretende lançar comercialmente um serviço de retransmissão de dados baseado em VANTs em três anos.

A Boeing anunciou recentemente um projeto em conjunto com a “Intelligent Energy”, a Diamond AI e as companhias espanholas Sener e Aerlyper entre outras, para investigar a integração de células de carga em aeronaves. O demonstrador será baseado num motoplanador Katana Xtreme, com motor elétrico. A intenção é a substituição futura de turbinas a gás auxiliares, segundo divulgação da BOEING... (2003b).

Outro exemplo de VANT movido à energia solar é o Centurion, que como todos os outros tem uma grande limitação de carga-útil.

Outra fonte de energia sugerida é a nuclear. Não por fissão, mas por geração de calor por decaimento radioativo, que seria convertido em eletricidade por termopares. O problema aí reside nas complicações políticas e de risco ambiental, ainda segundo a SUSPENDED... (2003).

A FIGURA 2.37 apresenta um diagrama com as faixas mais apropriadas para cada tipo de propulsão.

FIGURA 2.37 Faixas de aplicação para diversos tipos de motorização, TSACH (1996).

Para que o desempenho do VANT seja otimizado em todo o envelope de vôo, é ainda interessante considerar o uso de uma hélice de passo variável.

2.7.2 Estrutura de materiais compósitos

A obtenção de estruturas que sejam as mais leves possíveis, sem sacrifício da resistência, é fundamental no projeto de aeronaves. Um meio muito eficiente de se obter isso, e que é muito utilizado em estruturas aeronáuticas onde não haja cargas concentradas, é projetar estruturas com paredes muito finas. Porém aí surge a dificuldade de estabilizar essas superfícies, principalmente sobre cargas de compressão e cisalhamento. Um modo tradicional de resolver esse problema é o uso de nervuras e reforçadores. Segundo NIU (1996), uma solução mais eficiente é o uso de superfícies gêmeas com um meio estabilizante entre elas, chamado de sanduíche. Normalmente usam-se duas superfícies finas de um material de alta

resistência na casca, como fibra de vidro ou carbono laminada, e um material de baixa densidade no núcleo, como espuma rígida ou colméias.

As mesas da longarina principal normalmente são feitas de grossos laminados de fita pré-impregnada. Nesses casos é comum surgirem trincas ao longo da espessura, paralelas às fibras, por causa do diferente coeficiente de expansão térmica entre os grupos de fibras de 0° e 45° , o que segundo GALI (1996), pode ser minimizado diminuindo o número de camadas com a mesma orientação em cada grupo e com a redução da temperatura de cura. Por exemplo alterando uma sequência do tipo $\{[\pm 45^\circ, (0^\circ_3)]_{12}, (0^\circ_{60})\}_s$ para $[\pm 45^\circ, (0^\circ_8)]_{24}$. Deve-se lembrar no entanto, como demonstra WEST (1996), que quanto maior o número de camadas do laminado, melhor será do ponto de vista de confiabilidade em relação à fratura.

2.7.3 Asa com baixo arrasto induzido

Uma das características desejáveis de um VANT é que tenha grande autonomia, capacidade de carga e teto operacional. Assim, a aeronave deve ter seu arrasto minimizado e o $CL_{\max}$ maximizado. Uma solução de projeto que contribui em muito para a obtenção desse objetivo é utilizar uma asa de grande alongamento, com um perfil laminar de alto $Cl_{\max}$.

O mecanismo físico que cria a sustentação em uma asa é a diferença de pressão no extra e intradorso. Como, pela equação de Bernoulli, isso implica numa velocidade do escoamento maior em cima do que embaixo, isso é chamado de circulação. Na ponta da asa, o escoamento tende a contorná-la, indo da região de maior pressão, no intradorso, à de menor pressão, no extradorso, conforme THOMAS (1979). Esse comportamento tridimensional é o que diferencia uma asa finita do comportamento de um perfil bidimensional. Conseqüentemente, todo o escoamento ao longo da asa acaba sendo afetado. O fluxo no extradorso, onde existe a menor pressão, adquire uma componente na direção da envergadura, e faz com que as linhas de corrente se desviem na direção da raiz da asa. No intradorso acontece o inverso, criando-se assim uma esteira de pequenos vórtices atrás do bordo de fuga da asa, onde os escoamentos voltam a se encontrar sofrendo um cisalhamento. E em cada ponta da asa um forte vórtice é criado, como mostrado na FIGURA 2.38 e FIGURA 2.39.

Esse movimento circulatório do vórtice induz um componente para baixo no fluxo que deixa a asa. Esse componente é chamado de corrente de ar descendente. Esse desvio no fluxo causado pela corrente de ar descendente altera o ângulo de ataque efetivo (α_e) do perfil da asa. A corrente de ar descendente induz um ângulo de ataque induzido (α_i). Assim, tem-se que:

$$\alpha_e = \alpha - \alpha_i, \quad (2.1)$$

FIGURA 2.38 - Vórtices de ponta de asa que formam o arrasto induzido.

FIGURA 2.39 - Vórtices de ponta de asa que formam o arrasto induzido(cont.).

Como mostrado na FIGURA 2.40, o vetor L (sustentação), que é perpendicular ao escoamento relativo, também acaba se inclinando de α_i além da vertical. Assim, existe um componente de L local na direção da velocidade V_∞ . Ou seja, existe um componente de arrasto criado pela corrente de ar descendente.

Da teoria tridimensional de pequenas perturbações sabe-se que a distribuição de circulação ótima é aquela que cria uma distribuição de velocidade de corrente descendente constante na esteira da asa, ao longo da envergadura. Com essa distribuição de velocidade, a distribuição de sustentação ao longo da envergadura é elíptica, e o arrasto induzido é mínimo. Ou seja, a forma elíptica de distribuição de sustentação é a que permite o menor arrasto induzido possível para um dado alongamento e coeficiente de sustentação (CL).

FIGURA 2.40 Efeito do corrente de ar descendente sobre o escoamento local numa seção de uma asa finita.

Uma forma em planta elíptica da asa é a que sempre produz uma distribuição elíptica, para qualquer CL. Nesse caso, o coeficiente de arrasto induzido, CD_i , é dado por:

$$CD_{i_{elip}} = \frac{CL^2}{\Lambda \pi} \quad (2.2)$$

Essa expressão vale para uma asa de forma elíptica e sem torção, onde Λ representa o alongamento:

$$\Lambda = \frac{b^2}{A} \quad (2.3)$$

Como a maioria das asas é trapezoidal, por razões construtivas, pode-se através da torção geométrica da asa obter uma distribuição de sustentação ideal, igual a da asa elíptica, mas apenas para um dado CL.

Para uma asa retangular e sem torção, a eq. (2.2) é corrigida com a adição de um fator K, que é tabulado. Ela fica na forma:

$$CD_i = \frac{KCL^2}{\Lambda \pi} \quad (2.4)$$

Uma outra forma de visualizar fisicamente a força de arrasto induzido (D_i) é como sendo a energia despendida para gerar os vórtices das pontas da asa, que possuem grande quantidade de energia cinética.

Quanto maior o alongamento, menor é o arrasto induzido, como mostra a eq. (2.2). Teoricamente quanto maior o alongamento mais o escoamento da asa se aproxima do caso bidimensional. Por outro lado, para uma mesma área de asa, um maior alongamento implica numa menor corda. Isso diminui o número de Reynolds para uma mesma condição de voo. E o arrasto de perfil tende a aumentar com a diminuição do número de Reynolds no regime laminar. Isso é mostrado mais claramente na FIGURA 2.41, onde são comparadas as variações do arrasto de pressão e arrasto induzido com a variação do alongamento (conseqüentemente também da corda e de Re). Os dados foram obtidos utilizando-se o XFOIL 6.94, um código de CFD livre, desenvolvido por DRELA (2001), e da eq. (2.2). Na figura pode-se observar qualitativamente, a partir de que ponto o aumento do alongamento deixa de ser vantajoso do ponto de vista de arrasto aerodinâmico.

FIGURA 2.41 - Influência do alongamento (mantendo a área constante) no D_i e D_p , para $CL = 2.0$.

Também a necessidade de uma maior fuselagem e/ou cauda para uma maior envergadura faz aumentar o arrasto parasita. Assim existe um ponto ótimo de alongamento. Para altos CL s, o alongamento tem um efeito claramente dominante, como pode ser visto na FIGURA 2.42, onde estão mostradas as curvas provenientes da equação (2.2). Além disso, esbarra-se num limite de resistência estrutural. A maioria das aeronaves com asas de grande alongamento não ultrapassam um $\Lambda = 30$. Alguns exemplos são mostrados na TABELA 2.5 a seguir, e a título de curiosidade, alguns exemplos de alongamento de pássaros são mostrados na TABELA 2.6.

TABELA 2.5 – Alongamento de algumas aeronaves.

Aeronave	Λ	Mach cruzeiro
Airbus A-310	8,8	0,80
Boeing 737	8,8	0,76
Boeing 747-400	8,0	0,83
Boeing B-17 (bombardeiro)	7,58	-
Concorde	1,85	2,05
Consolidated B-24 (bombardeiro)	11,54	0,24
Dassault Mirage 2000	2,0	2,2
Douglas DC-3	9,1	0,24
Eta (planador)	51	-
Fokker 50	12,0	0,46
SB10 (planador)	30	-
Solar Powered Centurion (VANT)	26	-
Tupolev Tu-154	7,0	-
U2	10,3	0,75
US F-18 (McDonnell-Douglas)	3,5	1,8

TABELA 2.6 – Alongamento de alguns pássaros.

Pássaro	Λ
Albatroz (<i>Diomedea exulans</i>)	19 a 20
Cegonha branca (<i>Ciconia alba</i>)	8
Gaivota (<i>Larus argentatus</i>)	10
Ganso patola (<i>Sula bassana</i>)	6,3
Trinta-réis-boreal (<i>Sterna hirundo</i>)	12

FIGURA 2.42 Gráfico CD_i x Λ para asa elíptica e sem torção para vários CLs.

Existem várias maneiras de se minimizar o arrasto induzido de uma asa alterando as características do vórtice de ponta da mesma. A mais comum é o emprego de *Winglets*, que foram propostas e desenvolvidas por Richard Whitcomb, para uso em jatos comerciais em meados dos anos 70, segundo ESDU (1998). Conforme diz STINTON (1983), Whitcomb propôs como regra geral que “Winglets produzem o dobro de aumento de eficiência de envergadura do que uma extensão de ponta de asa para o mesmo aumento de momento fletor na raiz da asa”. Elas foram inicialmente testadas em túneis de vento e num *Boeing 707*, pela NASA. No final dos anos 70 alguns fabricantes de planadores experimentaram *winglets*, mas obtiveram resultados não conclusivos. No final dos anos 80 elas foram re-introduzidas, e se estabeleceram quase que como um item padrão para planadores de alto desempenho, com mostra MASAK (1991). Atualmente muitos jatos comerciais modernos também são dotados de *winglets*. Ainda existe alguma controvérsia sobre a vantagem de se usá-las, sendo que às vezes é usada mais por razões estéticas do que aerodinâmicas. No entanto, para altos CLs seu ganho é significativo. Ela faz com que os vórtices de ponta da asa se afastem, como se o alongamento efetivo fosse maior, o que diminui o arrasto induzido. Segundo ESDU (1998), as *Winglets* são mais eficientes para asas que são relativamente mais carregadas na ponta. Para baixos CLs, o aumento do arrasto parasita provocado pelo aumento da área molhada da asa supera a diminuição do arrasto induzido.

Em geral, para uma asa totalmente nova, projetada desde o início, é mais vantajoso em termos de arrasto induzido, aumentar o alongamento da asa do que adotar *winglets*, se

considerarmos uma área de asa total (incluindo a *winglet* no caso em que ela é adotada) fixa. Mas nos casos em que já se tem uma aeronave projetada e certificada, ou se existem restrições de envergadura a *winglet* é vantajosa. O ganho depende de muitos fatores, mas em geral varia entre desprezível a 24 % de diminuição no D_i , conforme McCORMICK (1995).

Outra maneira que tem sido estudada são as pontas de asa com fendas. SMITH et al. (2001) ensaiaram em túnel de vento uma asa com múltiplas *winglets*, FIGURA 2.43, e encontraram uma redução de arrasto induzido e uma melhora de L/D da ordem de 15-30% comparado com a configuração básica da asa.

FIGURA 2.43 - Ponta de asa com várias *winglets*, ou aletas de ponta (SMITH et al., 2001).

Um fator a ser considerado na definição da asa é o seu afilamento, que visa primariamente aliviar o peso estrutural. Assim as asas costumam ter uma corda na ponta menor do que na raiz. Mas uma razão de afilamento muito alta tem um efeito indesejável, que é o de favorecer o estol de ponta de asa. Isso pode provocar uma entrada em parafuso, ou uma catastrófica perda de controle na decolagem. Em geral usam-se razões de afilamento λ entre 0,3 e 0,45.

2.7.4 Configuração da fuselagem e cauda

De um modo geral, a configuração propulsora é a mais adequada, pelos motivos discutidos na seção 2.7.1. A partir daí tem-se as seguintes opções de configuração para a fuselagem, cauda e motor, que serão aqui consideradas:

1) Fuselagem

a) Fuselagem única com motor parasol

Um exemplo desse tipo de configuração é o VANT Luna, FIGURA 2.26.

Vantagem: mais leve e mais simples.

Desvantagem: limitação do diâmetro da hélice, problema de compensação devido ao afastamento do motor do eixo do avião, o que causa um momento de arfagem que varia com a variação de potência.

b) Fuselagens gêmeas

Dois exemplos desse tipo de configuração são os VANTs Pioneer (FIGURA 2.20) e o Heron (FIGURA 2.24).

Vantagem: solução natural para utilização de configuração de asa e cauda convencionais com motor propulsor, rigidez de asa.

Desvantagem: maior peso, projeto mais complexo, manutenção mais difícil, maior área molhada (maior arrasto).

c) Motor na cauda

O maior problema é o c.g. que fica muito próximo da cauda, exigindo ou um nariz muito comprido ou uma área de cauda muito grande.

d) Hélice na cauda com eixo prolongador

O eixo é de alto custo, aumenta o peso e a complexidade.

2) Cauda (empenagem)

a) Canard

O canard é a solução mais elegante e natural para a configuração propulsora (FIGURA 2.44). Possui também uma grande vantagem, pelo menos teórica, de ajudar na produção de sustentação. Uma cauda convencional produz uma força de sustentação para baixo para contrabalançar o momento de arfagem da asa. Com o canard contribuindo para a sustentação, a área de asa pode ser menor e o arrasto induzido também será menor. As desvantagens são: interferência devido à corrente de ar descendente (*downwash*) do canard na asa, não aproveitamento do CL_{max} da asa e a dificuldade de se usar flapes.

FIGURA 2.44 - Configuração Canard e motor propulsor.

b) V invertido

Muitos VANTs empregam uma configuração "V" invertido na cauda. A vantagem da cauda em "V", teoricamente, é que para uma mesma projeção de área vertical e horizontal de uma cauda convencional, ela tem uma área molhada menor. E, sendo invertida, produz um acoplamento de rolagem-guinada favorável, ao contrário da "V" convencional. Ela é especialmente adequada para cauda com fuselagens gêmeas. A desvantagem desse tipo de empenagem é a complexidade do sistema de atuação de comandos, que precisa "misturar" o profundor e leme. Nas configurações de fuselagem única, o "V" invertido torna-se inadequado por problemas de folga com o solo durante o pouso, como no caso do Gnat 750 (FIGURA 2.13) e do Predator (FIGURA 2.19).

FIGURA 2.45 - Cauda em "V" invertido.

2.7.5 Trem de pouso

Para minimizar o arrasto parasita é de grande valia o uso de um trem de pouso retrátil. As desvantagens são maior peso estrutural, maior custo de manutenção, além de prejudicar o espaço interno e a espessura da asa, caso o trem de pouso seja recolhido dentro da mesma.

2.7.6 Sistemas de navegação, telemetria e transmissão de dados

Como já citado no item 2.1.3, além de tipicamente possuírem uma avançada gama de eletrônica embarcada, uma variedade de sensores, VANTs possuem avançados sistemas de navegação e controle.

Para que o VANT possa realizar uma missão de forma autônoma, ele necessita de um sistema de navegação que possa determinar sua posição de forma precisa e confiável. É necessário medir tempo, latitude, longitude, velocidade relativa ao vento, velocidade relativa ao solo, altitude barométrica, altura em relação ao solo, proa magnética, posições relativas à pontos conhecidos, parâmetros do motor, como RPM, temperatura, pressão óleo, combustível, entre outros.

Numa aeronave tripulada os instrumentos básicos são: altímetro, indicador de coordenação de curva (*turn and bank*), horizonte artificial, bússola, indicador de velocidade do ar, bússola giroscópica, variômetro, GPS, ILS, *Transponder*, DME, ADF, radio VHF, muitos redundantes, e vários medidores de parâmetros do motor. Muitas dessas informações para navegação são fornecidas por um GPS, como já descrito no item 2.2.2.

Além dos equipamentos citados acima, é necessário a bordo do VANT todo um sistema de controle de pilotagem autônomo ou remoto, bem como sistemas de transmissão e recepção de dados que enviem à estação de terra os parâmetros de telemetria e dedicados da missão (como imagens) e recebam instruções, de preferência com redundância e independência de sistemas. Também é importante lembrar que todos esses sistemas mais os sistemas de missão embarcados consomem razoável quantidade de energia elétrica. Entrar em detalhes a respeito desses sistemas e alternativas à medição desses parâmetros foge do escopo deste trabalho; mais detalhes a respeito podem ser encontrados no trabalho de NERIS (2001), que desenvolve um sistema de pilotagem automático para VANTs. NERIS (2001) também lista opções comerciais de sistemas de telemetria e de controle automático de baixo custo, como o fornecido pela *U-NAV Silvertone Elecronics*, compatível com sistemas de R/C de aeromodelos, cujo custo é de Us\$ 700,00, e um mais avançado, o *MP1000 / MP2000* da *MicroPilot*, cujo custo é de Us\$ 10.000,00.

Após ter-se discutido uma série de considerações a respeito das características de projeto de VANTs, pode-se resumir as suas características típicas de projeto em:

- Asa de grande alongamento, perfil laminar de alto $C_{L_{máx}}$, eventualmente com *winglets*
- Asa com tanque integrado de alta razão de espessura
- Trem de pouso retrátil
- Motor propulsor, com hélice de passo variável
- Empenagem em “V”
- Estrutura de materiais compósitos tipo sanduíche, de baixo peso, com fabricação através de laminação manual seguida de processo de cura com bolsa de vácuo
- Sistema aviônico avançado, com comunicação, controle de voo, e sistemas elétricos

3. MATERIAIS COMPÓSITOS

Um material compósito pode ser definido como a combinação de dois ou mais materiais diferentes com diferentes propriedades. Juntos formam um novo material que possui as boas qualidades dos materiais combinados e/ou com suas fraquezas minimizadas, conforme FABRICATION... (1983).

Na natureza observamos inúmeros exemplos, como a madeira, que é composta de fibras em uma matriz de celulose. O homem já utiliza essa técnica há muito tempo, trabalhando a madeira ou usando concreto armado, por exemplo. Na antiguidade já se fabricavam tijolos de barro reforçados com fibras naturais, conforme observa NIU (1996).

Existem muitos tipos de compósitos, que variam com o tipo de materiais dos quais são combinados, como plásticos, metais ou cerâmicos. Mas existe um tipo em especial, cujo uso tem se expandido muito. São os compósitos poliméricos, nos quais os reforços são unidos por uma matriz polimérica. Mais precisamente, com o desenvolvimento dos compósitos de fibra de vidro e poliésteres nos anos 40 e dos de boron e carbono nos anos 60. Esses últimos são denominados atualmente de compósitos avançados.

No ramo aeronáutico, os materiais compósitos foram inicialmente utilizados apenas como uma alternativa para alívio de peso. Não se aproveitava o que é uma de suas mais distintas vantagens: ser possível projetar suas propriedades.

Uma estrutura de material compósito, anisotrópica, pode falhar se carregada numa direção inesperada onde sua resistência ou rigidez seja baixa. Assim, ligas de alumínio eram substituídas por materiais compósitos com uma relação densidade/resistência melhor sem ênfase no projeto das suas propriedades. Costumava-se criar laminados quase-isotrópicos, o que praticamente anula as vantagens de propriedades unidirecionais, tornando-os elasticamente semelhantes aos materiais isotrópicos, usando seqüências de laminação do tipo $[0/45/-45/90]_s$, que são simétricas e balanceadas. Assim criam-se compósitos com a metade da rigidez de um compósito unidirecional, mas próxima da do Alumínio, no caso de se usar Carbono. E como a rigidez específica do compósito de carbono é maior que a do Alumínio, pode-se ganhar significativa redução de peso com o mínimo de re-cálculo, conforme GÜRDAL et al. (1999).

Ao longo dos últimos anos, cada vez mais componentes aeronáuticos têm empregado materiais compósitos na sua fabricação, e essa tendência deve apenas se acelerar. Com o desenvolvimento de novas técnicas de projeto computacionais e com o amadurecimento dos critérios e metodologias dos projetistas da área aeroespacial, poder-se-á aproveitar ainda mais as potencialidades dos materiais compósitos. Os maiores obstáculos à disseminação do emprego de materiais compósitos na aviação são o alto custo de fabricação e a falta de uma larga base de dados de engenharia, como a que existe sobre as ligas metálicas empregadas na aviação, que nesse ponto não avança por conservadorismo. Por isso eles ainda são mais utilizados em

aeronaves militares e na aviação geral, mas mesmo na aviação comercial esse quadro está se revertendo. Um exemplo é o novo projeto da Boeing, o 787 *Dreamliner*.

De acordo com BOEING... (2003a), o 787 será o primeiro jato comercial a ter a maior parte de sua estrutura primária, incluído a asa e a fuselagem, feita de materiais compósitos avançados. Serão utilizados compósitos de grafite/epóxi e grafite/titânio.

Na indústria aeronáutica, o processo de fabricação de laminados mais utilizado é a laminação manual (*Hand Lay-up*) seguida de cura com bolsa de vácuo (*vacuum bagging*). Esse é o método mais simples e barato na produção de pequenas quantidades. O sistema de bolsa de vácuo tem a função de manter as lâminas unidas, retirar bolhas de ar e excesso de resina. Outros métodos mais elaborados utilizam o *prepreg*, onde as camadas de tecido já estão pré-impregnadas com resina, que cura sob a ação do calor de um autoclave ou sob temperatura ambiente, e também a moldagem de transferência rápida, onde a resina é injetada sob pressão no molde contendo as fibras.

Atualmente, para certas aplicações, o processo de laminação manual vem sendo substituído por processos como o *Fiber placement* ou bobinagem (*Filament Winding*), onde por meio de uma máquina automatizada, ao invés de se empilhar camadas de tecido sobre um molde manualmente, fibras contínuas são posicionadas por um robô sobre o molde ou enroladas na superfície de um mandril num padrão geométrico preciso e controlado.

FIGURA 3.1 - Asas de fibra de vidro sendo laminadas manualmente.

FIGURA 3.2 - Molde sendo fechado para colagem de uma fuselagem.

3.1 Mecânica dos Materiais Compósitos

Em geral, podemos dividir os materiais compósitos em três tipos. Os fibrosos, os laminados e os particulados, mostrados na FIGURA 3.3. O tipo abordado neste trabalho, o mais comum em aplicações aeronáuticas, é de uma classe híbrida de compósitos fibrosos e laminados. São mais conhecidos como compósitos reforçados de fibra, ou CRF.

FIGURA 3.3 – Tipos de constituição dos materiais compósitos.

Camadas de material reforçado com fibras são empilhadas, com cada camada tendo uma orientação diferente de suas fibras, para se obter diferente resistência e rigidez em diferentes direções. Na FIGURA 3.4 estão representadas várias formas em que as fibras podem estar organizadas dentro de uma camada.

FIGURA 3.4 – Diferentes padrões de organização das fibras numa camada de um compósito reforçado com fibras.

Materiais em forma de longas fibras, com um diâmetro da ordem de grandeza do tamanho dos cristais de sua estrutura cristalina, são inerentemente mais resistentes e rígidos que na sua forma monolítica. Estruturas fibrosas são mais perfeitas pois os cristais na fibra estão alinhados ao longo de seu eixo. E existem menos defeitos internos na microestrutura, como deslocamentos, em uma fibra do que no material em forma monolítica. Quanto maior forem as trincas, menor será a resistência efetiva do material. A resistência teórica dos materiais, calculada a partir da atração atômica, é muito maior que a verificada experimentalmente. O ferro tem uma resistência teórica de 19,9 GPa. No entanto, aços estruturais comuns têm resistência de 520 MPa a 700 MPa. Segundo ULLER (1999), ao se transformar um material em fibra, o tamanho médio dos defeitos diminuem, sendo sempre menores que o diâmetro da fibra. Alguns raios típicos da fibra são: Carbono = 0,005 mm; Boron = 0,05 mm. Na TABELA 3.1 estão listados as propriedades mecânicas de alguns materiais, quando em forma de fibras.

Normalmente as fibras são disponíveis comercialmente como puros fios, fitas unidirecionais pré-impregnadas ou em forma de tecido, com diversas combinações de tramas.

TABELA 3.1 - Propriedades de alguns materiais em forma de fibras.

Fibra	Densidade, ρ (g/cm ³)	Ruptura em compressão, σ_c (GPa)	Ruptura em tração, σ_t (GPa)	σ_t/ρ	G (GPa)	E_t (GPa)	E_t/ρ
S-glass	2,49	1,75	4,8	1,93	nd	400	160,57
E-glass	2,55	nd	3,4	1,34	28,7	190	74,61
Boron	2,57	nd	3,4	1,32	nd	72	27,97
Grafite	1,41	nd	1,7	1,20	nd	300	212,51
Carbono	1,41	nd	1,7	1,20	nd	86	60,92
Aramida (Kevlar) ¹	1,45	nd	2,9		nd	130	nd
Berílio	1,85	nd	1,7	0,92	nd	207	111,62
Aço	7,81	nd	4,1	0,53	nd	73	9,35
Titânio	4,71	nd	1,9	0,40	nd	250	53,13
Alumínio	2,68	nd	0,62	0,23	nd	115	42,83

Fontes: JONES (1975), p. 3., com exceção de: 1 – ULLER (1999)

Materiais compósitos exibem muitas características que diferem dos materiais mais convencionais, que em geral são homogêneos e isotrópicos, ou seja, suas propriedades são as mesmas em todas as direções em qualquer ponto. Em contraste, materiais compósitos são freqüentemente heterogêneos e anisotrópicos ou ortotrópicos. Um material heterogêneo pode ter

diferentes propriedades em diferentes pontos. Um material ortotrópico tem diferentes propriedades em três direções mutuamente perpendiculares em um ponto e possui três planos de simetria. Nos materiais anisotrópicos as propriedades são diferentes em todas as direções, não havendo nenhum plano de simetria. Devido a essas características dos compósitos, eles são estudados a partir de dois pontos de vista: Micromecânica e Macromecânica.

Micromecânica é o estudo do comportamento dos compósitos onde a interação dos materiais constituintes (fibra x matriz) é examinada em uma escala microscópica. Tal detalhamento está fora do escopo deste trabalho.

Macromecânica é o estudo do comportamento dos compósitos onde eles são presumidos homogêneos e apenas suas propriedades “aparentes” são consideradas.

3.2 Teoria de falha

Para um bom projeto é necessário que se possa prever com precisão a resistência de um componente a um dado carregamento. E esse carregamento pode envolver várias componentes de tensões normais e de cisalhamento.

A maioria dos dados experimentais disponíveis referentes à resistência dos materiais são baseados em estados de tensão uniaxial. Porém os problemas práticos em geral envolvem estados de tensão pelo menos biaxiais, quando não triaxiais. A grande maioria dos compósitos laminados, por sua vez, tem resistência dependente da orientação. Para tentar resolver esse problema um tanto complicado, um meio é o uso de transformações de tensores de resistência e o uso de critérios de falha fenomenológicos (pois apenas a ocorrência da falha é prevista, não o modo).

Algumas das teorias desse tipo, desenvolvidas para carregamentos biaxiais, são: Teoria de Tensão Máxima, Teoria de Deformação Máxima, Teoria de Tsai-Hill, Teoria de tensores de Tsai-Wu, entre outras. Em todas essas teorias, o material é considerado ortotrópico e homogêneo. As duas primeiras, muito similares, na verdade apenas comparam as tensões ou deformações nas direções principais com os limites ensaiados nessas direções, não considerando a interação entre elas. Isso acaba levando a um erro que segundo JONES (1975), chega a 100 %, tornando o uso dessas teorias inviável. A teoria de Tsai-Hill, que já considera a interação entre os esforços, é uma extensão do critério de escoamento de Von Mises para materiais isotrópicos. Von Mises, por sua vez, está relacionado com a quantidade de energia usada para distorcer um corpo, sem mudar o seu volume. Em materiais ortotrópicos sob carregamentos biaxiais ambos não podem ser dissociados. Uma teoria mais apropriada é a de Tsai-Wu. Ela possui termos de tensão adicionais, ficando porém mais complicada.

De acordo com ANSYS (1995a), em conformidade com SKUDRA et al. (1986), para condições de tensão plana, esta teoria postula que para um material ortotrópico, a falha numa lâmina ocorre quando $\xi \geq 1$, sendo:

$$\xi = \frac{1}{\left(-\frac{B}{2A} + \sqrt{\left(\frac{B}{2A} \right)^2 + \frac{1}{A}} \right)} \quad (3.1)$$

$$A = -\frac{\sigma_x^2}{\sigma_{xt}^f \sigma_{xc}^f} - \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{yt}^f \sigma_{yc}^f} - \frac{\sigma_z^2}{\sigma_{zt}^f \sigma_{zc}^f} + \frac{\sigma_{xy}^2}{(\sigma_{xy}^f)^2} + \frac{\sigma_{yz}^2}{(\sigma_{yz}^f)^2} + \frac{\sigma_{xz}^2}{(\sigma_{xz}^f)^2} +$$

$$+ \frac{C_{xy} \sigma_x \sigma_y}{\sqrt{\sigma_{xt}^f \sigma_{xc}^f \sigma_{yt}^f \sigma_{yc}^f}} + \frac{C_{yz} \sigma_y \sigma_z}{\sqrt{\sigma_{yt}^f \sigma_{yc}^f \sigma_{zt}^f \sigma_{zc}^f}} + \frac{C_{xz} \sigma_x \sigma_z}{\sqrt{\sigma_{xt}^f \sigma_{xc}^f \sigma_{zt}^f \sigma_{zc}^f}}$$

$$B = \left(\frac{1}{\sigma_{xt}^f} + \frac{1}{\sigma_{xc}^f} \right) \sigma_x + \left(\frac{1}{\sigma_{yt}^f} + \frac{1}{\sigma_{yc}^f} \right) \sigma_y + \left(\frac{1}{\sigma_{zt}^f} + \frac{1}{\sigma_{zc}^f} \right) \sigma_z \quad (3.2)$$

Onde,

C_{xy} = coeficiente de acoplamento x-y para teoria de Tsai-Wu ($=2F_{xy}$)

C_{yz} = coeficiente de acoplamento y-z para teoria de Tsai-Wu ($=2F_{yz}$)

C_{xz} = coeficiente de acoplamento x-z para teoria de Tsai-Wu ($=2F_{xz}$)

onde F_{ij} são tensores de tensão, σ_i as tensões principais e σ_i^f os limites de resistência.

A maior dificuldade é a determinação do termo de interação F_{xy}^* . Em muitas teorias o termo F_{xy}^* é dependente, mas na teoria de Tsai-Wu, ele precisa ser determinado em ensaios de carregamento bi-axiais. Segundo TSAI et al. (1980), na falta de dados experimentais pode-se considerar que $F_{xy}^* = -0,5\sqrt{F_{xx}F_{yy}}$ embora reconhecendo que pequenas mudanças em F_{xy}^* podem afetar significativamente a resistência prevista. Por outro lado JONES (1975) diz que mudança em F_{xy}^* de um fator de 4 causa poucas alterações na resistência prevista na faixa entre $0 < \theta < 25$, conforme mostrado na FIGURA 3.5.

Aqui se considera que o laminado falha assim que qualquer uma das suas lâminas falhar, o método da falha da 1ª lâmina, que é conservativo. Na prática, um componente ainda pode eventualmente continuar resistindo por tempo indeterminado mesmo depois de alguma camada ter falhado. Um método menos conservativo é a da falha da última lâmina.

FIGURA 3.5 - Comparação da Teoria de tensor de Tsai-Wu, (JONES, 1975).

3.3 Características de alguns dos típicos Materiais Constituintes

3.3.1 Fibra de Carbono

Fibras de carbono são fabricadas pela pirólise de um precursor orgânico como rayon ou poliacrilonitril (PAN), ou pixe. Normalmente o módulo de elasticidade aumenta com a diminuição do limite de resistência.

Fibras de carbono (93 a 95 % C) ou grafite (>95%C) são divididas em três tipos:

- PAN : o tipo mais antigo, são as que têm mais alta resistência mecânica e são disponíveis em módulos de elasticidade de baixos a altos (~900 GPa). São as que têm a melhor combinação de propriedades.
- Pixe (“*petroleum pitch*”): não possuem a mesma resistência do tipo anterior, mas podem ser obtidos módulos muito altos.
- Rayon: Fibras fabricadas a partir do rayon não possuem as mesmas altas propriedades que as anteriores, e são usadas quase exclusivamente em reforços de Carbono/Carbono em bocais de foguetes, discos de freio, etc.

As fibras de carbono apresentam ainda resistência à fadiga bem maior que o aço e o alumínio, maior amortecimento à vibração e coeficiente de dilatação térmica cada vez mais negativo com o aumento do módulo, segundo NIU (1996).

3.3.2 Fibra de vidro

É o tipo de fibra mais largamente utilizado, pelo seu baixo custo, peso e alta resistência. Os dois tipos mais comuns são o "E" (elétrico) e "S" (resistência). O tipo "E" possui excelentes propriedades dielétricas, enquanto o "S" tem melhores propriedades mecânicas. Uma limitação da fibra de vidro é seu relativamente baixo módulo de elasticidade. Daí é comum o seu uso em conjunto com carbono, como em asas de fibra de vidro com longarina de carbono.

3.3.3 Fibra de Aramida (Kevlar®)

A Aramida, cujo nome comercial registrado pela Du Pont® é Kevlar®, é uma fibra orgânica sintética. Ela é utilizada em aplicações estruturais desde os anos 70. Combina dureza extremamente alta, capacidade de absorção de energia, resistência à tração, rigidez e baixa densidade, de acordo com NIU (1996). Suas fraquezas são a baixa resistência à compressão (devido a flambagem interna dos filamentos) e péssima trabalhabilidade. Às vezes usam-se híbridos de Aramida /Carbono com a Aramida apenas sob tração. Possui ainda boa resistência à fadiga.

3.3.4 Matriz (Resina Polimérica)

A função da matriz é manter as fibras unidas umas às outras, transferir as cargas entre elas e protegê-las de auto-abrasão. Também as protege de agentes externos como umidade, corrosão química e oxidação, conforme REINHART e CLEMENTS (1987). Além disso, ela mantém as fibras orientadas corretamente, evitando a propagação de trincas e fornecendo resistência ao cisalhamento interlaminar.

As matrizes podem ser de materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos. Para a maioria das aplicações em compósitos aeronáuticos utilizam-se polímeros termofixos, em geral resina epóxi. O epóxi entre as resinas é a que possui as melhores propriedades mecânicas. Possui também estabilidade química e excelente adesão à maioria das fibras. Sua maior limitação é a operação em temperaturas maiores que 93° C. Ao contrário das fibras, que em geral têm um comportamento linear elástico sob tensão, as resinas como o epóxi tem comportamento viscoelástico ou viscoplástico. Isso não chega a ser relevante, pois as fibras acabam recebendo quase todo o carregamento. Na TABELA 3.2 são exibidas as propriedades de uma resina epóxi típica utilizada em compostos laminados, e também as propriedades de uma resina de Poliéster, para comparação.

TABELA 3.2 - Propriedades típicas de resinas utilizadas como matriz nos compósitos.

Matriz	Densidade ρ (g/cm ³)	Ruptura em tração, σ_t (MPa)	Ruptura em compressão, σ_c (MPa)	E_t (GPa)	E_c (GPa)
Epóxi Narmco 2387	1,213	29	158	3,38	3,86
Poliéster	1,6 ~ 2,0	33,5 - 70	138 - 150	3,102 – 10,6	nd

Fonte: MATWEB (2003).

3.4 Otimização utilizando Elementos Finitos

Baseado nas conclusões de YURKOVICH apud BISHOP (1998) de que o peso final de uma asa otimizada para *flutter* e carga estática é largamente dependente da geometria interna, BISHOP (1998) compara a influência da complexidade do modelo de uma asa em elementos finitos usando o Sistema de Otimização Estrutural Automatizado (SOEA), quando restrições aeroelásticas são impostas. Esse sistema combina respostas de módulos estruturais de um modelo de elementos finitos, de onde obtém respostas estáticas, dinâmicas e de frequências, módulos de aerodinâmica sub e supersônica, transientes, estacionários, e um módulo de otimização. O objetivo é validar o uso de modelos simplificados numa fase em que ainda não se conhecem os detalhes da estrutura.

Algumas limitações são encontradas, como diferenças nas pressões de reversão de comando, entre o modelo mais pobre e o mais complexo, além de diferenças entre os regimes sub e super sônicos. Ele consegue apenas obter mínimos locais, sendo necessário partir de várias condições iniciais (Esse último problema é contornado com o uso de Algoritmos Genéticos, tema que será abordado adiante em mais detalhe).

Até agora foram poucos os trabalhos que examinaram a influência das decisões de engenharia que são tomadas na modelagem no processo de otimização.

ANASTASIADIS (1996) investigou a influência na obtenção de uma estrutura ótima da mudança do tipo de elemento finito (linear ou parabólico e tipo sanduíche ou não), do critério de falha (Von Misses ou Tsai-Wu), e de considerar flambagem localizada da casca ou não.

Ele concluiu que:

- O uso de elementos parabólicos tem influência significativa
- A influência de restrições de deslocamento é relativa
- O uso do critério de falha de Tsai-Wu é significativo
- A consideração de flambagem local é significativa
- O uso de duas longarinas leva a uma configuração mais otimizável

YURKOVICH, R. (1994). The use of taguchi techniques with the ASTROS code for optimum wing structural design, AIAA *Proceedings of the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 35th Structures, Structural Dynamics, and Materials conference, AIAA.Washington, DC p. 1334-1342.*

DALEN et al. (1994) desenvolveram procedimentos de otimização apropriados ao projeto da estrutura de uma asa no seu estágio inicial. A mesma malha é utilizada para análise em EF e no método dos painéis, que é usado para o cálculo do carregamento aerodinâmico. Isso permite que o carregamento seja recalculado facilmente, levando-se em conta a deformação da estrutura.

São usadas duas rotinas de otimização. Uma interativa, que é mais rápida mas não garante um ponto ótimo, outra baseada em análise de sensibilidade, que consome muito mais tempo computacional. O desempenho das duas é comparado. Os resultados são validados comparando-os com o método de previsão de peso de uma asa, variando o alongamento da mesma, desenvolvido por TORENBEEK (1992).

KAM et al. (1996) propõe um novo algoritmo para otimização de peso de compósitos laminados. O algoritmo é um método de otimização global de multi-início que permite encontrar um mínimo global, ao contrário dos anteriores que só permitiam encontrar mínimos locais. Ele usa o algoritmo para investigar a sensibilidade de vários parâmetros de laminação de placas submetidas a limites de tamanho e resistência, como critério de falha, alongamento, número de grupos de camadas e condições de contorno. Ele conclui que o alongamento e as condições de contorno têm efeitos significativos sobre os parâmetros de otimização.

O critério de falha por outro lado tem poucos efeitos, embora o critério de falha de Tsai-Wu seja ligeiramente melhor. KAM et al. (1996) também concluem que adicionar camadas a laminados com mais de seis grupos de lâminas não resulta em melhoras significativas na resistência específica. Como reduzir o número de camadas reduz o tempo de laminação, seguindo esse limite pode-se também se reduzir os custos.

JACOB et al. (1998) utilizam uma abordagem probabilística para o projeto de uma asa de um VRP. Devido as suas diferentes possíveis aplicações, existe uma série de casos de carregamentos críticos a serem considerados.

A estrutura laminada é avaliada quanto a flambagem, compressão, tração, e fadiga. A análise é realizada resolvendo-se a equação diferencial de deflexão de uma placa engastada assimétrica com rigidez variando segundo os eixos x e y . A partir daí são calculadas as tensões em várias seções da asa, e as tensões principais são determinadas através do método de Mohr. O programa então otimiza os parâmetros de laminação modificando a rigidez em cada direção segundo as tensões principais, as deflexões máximas e frequência fundamental. Três diferentes configurações são escolhidas a partir do método de otimização e analisados pelo método dos elementos finitos.

SCOTT et al. (1996) conseguem uma significativa redução do peso e custo em uma superfície de controle de asa laminada, tipo sanduíche, substituindo-o por uma estrutura de casca fina laminada, integralmente enrijecida, e que flamba antes de atingir o limite estrutural de projeto. Apenas as longarinas são desenhadas para não flambarem. Alguns processos e

elementos de fixação foram eliminados através da co-cura de nervuras e seminervuras. A superfície de controle é modelada em EF e uma análise não-linear é conduzida utilizando-se o *Nastran*. Os resultados são validados experimentalmente. A redução do peso pretendida é atingida e é comprovada a possibilidade de se utilizar uma estrutura laminada até além do limite de flambagem sem prejuízo a integridade estrutural.

LILLICO et al. (1997) desenvolvem um programa para minimizar o peso de uma asa laminada levando em conta a velocidade de flutter e divergência, e a tensão do material. Normalmente critérios aeroelásticos são abordados em fases adiantadas do projeto, levando a modificações que certamente não levam à estrutura ótima. Análises com os métodos tradicionais de EF são demorados e não permitem que se obtenha liberdade de se analisar várias opções de projetos diferentes. Em seu programa, a asa é modelada usando-se elementos de viga a partir das duas longarinas e da casca entre elas. Essa modelagem que possui solução exata forma uma boa aproximação da estrutura real. Durante a otimização, é utilizada a teoria das faixas para o cálculo do carregamento aerodinâmico. Para a análise de vibração livre, é usado o método da rigidez dinâmica (MRD). Nesse método usam-se funções de forma exatas e obtém-se apenas uma única matriz dinâmica para massa e rigidez.

3.5 Otimização utilizando o Ansys®

O Ansys® permite o modelamento de materiais compósitos usando elementos especializados chamados elementos laminados. O elemento mais apropriado para o tipo de modelo aqui estudado é o *shell99*, mostrado na FIGURA 3.6. Ele é triangular ou quadrado, quadrático, de 8 ou 6 nós, com 6 graus de liberdade em cada nó. É indicado para modelar placas ou cascas com uma razão de comprimento/espessura aproximadamente igual ou maior do que 10. Ele permite o cálculo das tensões interlaminares e do valor do critério de falha, além dos deslocamentos e deformações.

Para a análise de falha no laminado pode-se utilizar no Ansys® o critério de Tsai-Wu. Ver a eq. (3.2).

Otimização estrutural é uma técnica que tenta determinar um projeto ótimo. Por “projeto ótimo” entende-se aquele que satisfaz todas as especificações requeridas com um mínimo dispêndio de certos fatores como peso, área superficial, volume, tensão, custo, etc. Ou seja, o projeto ótimo é usualmente aquele que é tão eficaz quanto possível. Em termos mais matemáticos, otimização é uma técnica que busca a minimização de uma função única submetida a restrições.

FIGURA 3.6 - Elemento *shell99*, usado no Ansys® para modelar cascas laminadas.

A seguir, serão dadas algumas definições básicas do procedimento de otimização no Ansys®: variável de projeto, variável de estado, função objetivo, arquivo de análise, etc.

Variáveis de Projeto (VP) são quantidades independentes que são variadas com o objetivo de se obter o projeto ótimo. Limites superiores e inferiores são especificados para servir como “contorno” nas variáveis de projeto. Exemplos são: número de camadas, espessura, orientação, etc.

Variáveis de Estado (VE) são quantidades que definem as especificações do projeto. Elas também são conhecidas como “variáveis dependentes”, e são tipicamente quantidades resultantes que são função das variáveis de projeto. Exemplos são: tensão, deformação, critério de falha, etc.

A **Função Objetivo ($f(x)$)** é a variável dependente que se está tentando minimizar. Ela deve ser uma função das variáveis de projeto. Por simplicidade, aqui ela é representada como função de apenas uma variável x . Exemplos dessas variáveis são: peso, deslocamento, etc.

O arquivo de análise é um arquivo de entrada do Ansys® que contenha uma sequência de análise completa, (pré-processamento, solução, pós-processamento). O modelo tem de ser definido parametricamente, onde os parâmetros são todas as variáveis de otimização. Depois de encontrada a solução, as variáveis de interesse são recuperadas para uso na rotina de otimização. A partir deste arquivo, um arquivo laço de otimização é criado e usado automaticamente pelo otimizador para realizar os ciclos de análise.

3.5.1 Métodos de otimização disponíveis no Ansys®

Dois métodos de otimização são disponíveis no Ansys®:

Aproximação de Subproblema - É um método avançado de ordem-zero que requer apenas os valores das variáveis de estado, e não suas derivativas. Ele usa aproximações (ajuste de curva “*Curve fitting*”) para todas as variáveis dependentes (VE e $f(x)$). É um método geral que pode ser aplicado eficientemente a um vasto número de problemas de engenharia, segundo ANSYS (1995b).

Método de primeira ordem – Esse método usa informações de derivativas, ou seja, gradientes das variáveis dependentes com relação às VP. Ele é de alta exatidão e funciona bem com problemas que possuem variáveis dependentes que variam largamente sobre um grande intervalo do espaço de projeto. Sua desvantagem é que tende a ser computacionalmente caro.

Além desses métodos, o Ansys® possui algumas ferramentas auxiliares de otimização, que são utilizadas para medir e entender o espaço de projeto do problema. Normalmente são usadas antes de se realizar a otimização com os métodos citados acima. Segue uma breve descrição das mesmas:

Varredura de VP – Começando de um ponto de referência no espaço de projeto, ela varia uma VP de cada vez, por todo o seu intervalo permissível, usando incrementos uniformes. Ou seja, ela faz avaliações variacionais globais da $f(x)$ e das possíveis variáveis de estado.

Avaliação de gradiente – A partir de um ponto de referência especificado no espaço de projeto, é uma ferramenta que calcula os gradientes da $f(x)$ a das variáveis de estado com relação às VP. É usada para investigar sensibilidades de projeto locais.

Além desses métodos, o Ansys® também aceita uma função de otimização definida pelo usuário.

3.5.2 Exemplo de aplicação de otimização com o Ansys®

WIDMAIER e CATALANO (2000) utilizam uma rotina de otimização do Ansys® para otimizar uma asa de material compósito. Foram utilizados dois métodos de otimização. Primeiro o de ‘Geração de Projeto Aleatória’, onde o programa realiza um número específico de laços (*loops*) de análise usando valores de variáveis de projeto aleatórios para cada laço. Ele é uma boa ferramenta para se chegar rapidamente a uma configuração inicial de parâmetros, que pode ser usada com um método mais preciso. Após foi utilizado o método de ‘Aproximação de Subproblema’, que é um método avançado de ordem-zero que requer apenas os valores das variáveis dependentes, e não suas derivativas.

A asa modelada por WIDMAIER e CATALANO (2000) é toda laminada, com uma sequência de laminação tipo sanduíche, usando-se tecido bidirecional E-Glass/Epóxi e espuma

de poliuretano, cujas propriedades encontram-se na TABELA 3.3. Na FIGURA 3.7 vê-se um diagrama da seqüência de laminação.

TABELA 3.3 - Propriedades mecânicas do laminado bidirecional de E-Glass (60%) com matriz Epóxi e da espuma de poliuretano.

E-GLASS/EPÓXI TECIDO BIDIRECIONAL	ESPUMA DE POLIURETANO
$\rho = 2100 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 35 \text{ kg/m}^3$
$E_X = E_Y = 15,9 \text{ GPa}$	$E = 10,3 \text{ MPa}$
$E_Z = 8,7 \text{ GPa}$	$\nu = 0,25$
$\nu_{xy} = 0,20$	$G = 4,1 \text{ MPa}$
$\nu_{xz} = \nu_{yz} = 0,28$	$\sigma_x^{\text{tu}} = 250 \text{ KPa}$
$G_{xy} = 4,1 \text{ GPa}$	$\sigma_{xc}^f = 250 \text{ KPa}$
$G_{xz} = G_{yz} = 2,9 \text{ GPa}$	$\sigma_{yt}^f = 250 \text{ KPa}$
$\sigma_{xt}^f = 228 \text{ MPa}$	$\sigma_{yc}^f = 250 \text{ KPa}$
$\sigma_{xc}^f = 165 \text{ MPa}$	
$\sigma_{yt}^f = 228 \text{ MPa}$	
$\sigma_{yc}^f = 165 \text{ MPa}$	
$\sigma_{xy}^f = 50 \text{ MPa}$

FIGURA 3.7 - Seqüência típica de laminação tipo sanduíche ($\pm 45/0/\pm 45$).

Na FIGURA 3.8 pode-se ver um corte da asa. A seqüência inicial de laminação obedece ao padrão de orientação (θ) do laminado ($\pm 45/0/\pm 45$), simétrica à camada central de espuma. A longarina, de seção I, é posicionada onde o perfil possui a sua maior espessura, e sua alma possui o mesmo tipo de laminado que a casca. As mesas da longarina são de tecido unidirecional, alinhado com o eixo da longarina. Foram colocadas nervuras apenas na raiz e na ponta.

FIGURA 3.8 - Corte da seção central da asa.

Como o problema possui simetria, apenas uma semi-asa é modelada. O modelo construído é de uma asa de 5 m de semi-envergadura, com 1m de corda na raiz e 0,40 m na ponta, tendo portanto uma área de 3,48 m². O perfil da asa é NACA 4412. A malha foi gerada automaticamente sobre a superfície. É utilizado o elemento de casca laminada, *shell99*. Foi considerado apenas um caso de carregamento, equivalente a uma arfagem brusca do avião voando na velocidade máxima de manobra, V_A . Para a aplicação do mesmo, aplicou-se uma pressão constante sobre cada elemento (FIGURA 3.9), cujo valor foi calculado previamente. A força resultante normal à direção de voo, que é a sustentação, é obtida da seguinte equação, considerando o escoamento bidimensional:

$$L = CL\rho.\frac{V^2}{2}.A \quad (3.3)$$

onde ρ é a densidade do ar, A a área da asa e V a velocidade. Para a situação da asa voando com um ângulo de incidência de 11° (ângulo de estol do perfil) a 34,7 m/s (aqui definida arbitrariamente, como sendo a Velocidade de Manobra, V_A), a força de sustentação é 4737,91N.

FIGURA 3.9 - Distribuição de pressão sobre o modelo.

Todos os nós da longarina na raiz da asa foram vinculados em u_x , u_z , θ_x e θ_y , e dois nós, na posição onde estariam os pinos de torção da asa, na nervura principal, foram vinculados em u_x e u_y , conforme a FIGURA 3.10.

A seqüência de laminação foi definida previamente. A casca da asa foi dividida em cinco seções de igual comprimento, sendo que a da raiz possui dez camadas de tecido mais a de espuma, no centro. Cada seção seguinte possui duas camadas a menos, até a última, que possui apenas três (FIGURA 3.11). A longarina possui cinco camadas na alma, incluindo a de espuma. As mesas foram modeladas como uma camada de tecido unidirecional, mas são normalmente construídas como uma barra de fibra pultrudada (FIGURA 3.10).

FIGURA 3.10 - Vínculos e malha da longarina (vista interna).

FIGURA 3.11 - Variação das propriedades da casca ao longo da envergadura.

Foram definidas 12 variáveis de projeto, a espessura e a orientação (θ) de cada camada de fibra da casca e da longarina. Os intervalos de espessuras do tecido possíveis foram restringidos ao intervalo entre a máxima e mínima disponível comercialmente. Como variável de estado foi definido o valor do critério de falha, que deveria ficar abaixo de 0,8, dando uma margem de segurança de 25%. A função objetivo a ser minimizada foi definida como sendo o volume, que é proporcional ao peso. Não foi dada nenhuma restrição ao deslocamento, que num problema real deveria ser levado em conta, por razões aerelásticas.

A seguir são apresentados alguns dados da modelagem:

TABELA 3.4 - Parâmetros das variáveis de otimização.

Variável	Min	Max	Tolerância
Critério de falha max	0,0000	0,8000	0,0500
Esp. Camada 1 (m)	0,0002	0,0006	0,0000
Esp. Camada 2 (m)	0,0002	0,0006	0,0000
Esp. Camada 3 (m)	0,0002	0,0006	0,0000
Esp. Camada 4 (m)	0,0002	0,0006	0,0000
Esp. Camada 5 (m)	0,0002	0,0006	0,0000
Esp alma (m)	0,0002	0,0006	0,0000
Esp mesa longarina (m)	0,0010	0,0800	0,0006
$\theta 1$	0,0900	90,0000	0,8991
$\theta 2$	0,0900	90,0000	0,8991
$\theta 3$	0,0900	90,0000	0,8991
$\theta 4$	0,0900	90,0000	0,8991
$\theta 5$	0,0900	90,0000	0,8991
Volume	-	-	0,0100

Após 15 ciclos, atingiu-se uma configuração que não falha, embora a margem de segurança tenha ficado abaixo de 25%. Na FIGURA 3.12 pode-se observar que a região próxima do engaste é a que tem a menor margem de segurança. Também é possível notar que perto da ponta da asa as tensões são baixas, e seria possível obter uma otimização mais efetiva modificando a sequência de laminação (extensão de cada camada, FIGURA 3.11). Ainda nota-se na região do bordo de ataque uma concentração de tensões.

Nas FIGURA 3.12 e FIGURA 3.13 pode-se ver a distribuição do critério de falha para a casca e longarina.

FIGURA 3.12 – Distribuição do valor do critério de falha de Tsai-Wu sobre a casca da asa.

FIGURA 3.13 - Distribuição do valor do critério de falha de Tsai-Wu sobre a longarina.

TABELA 3.5 - Valores das variáveis obtidas após a otimização.

Variável	Tipo	Valor
Critério de falha max	(VE)	0,92074
Esp. Camada 1 (m)	(VP)	0,00039
Esp. Camada 2 (m)	(VP)	0,00042
Esp. Camada 3 (m)	(VP)	0,00025
Esp. Camada 4 (m)	(VP)	0,00035
Esp. Camada 5 (m)	(VP)	0,00031
Esp alma (m)	(VP)	0,00020
Esp mesa longarina (m)	(VP)	0,07580
θ_1	(VP)	37,19700
θ_2	(VP)	40,54600
θ_3	(VP)	72,87100
θ_4	(VP)	60,52500
θ_5	(VP)	83,85200
Volume	$(f(x))$	0,07535

TABELA 3.6 - Dados de Processamento.

Nº elementos	639
Graus de liberdade	11268
Matriz dos elementos	12,25 MBytes
Matriz triangularizada	42,12 MBytes
Tempo de proces p/ laço “loop”	4 min
Nº de ciclos	15
Massa final da asa	55,612 Kg

Em seu trabalho, WIDMAIER e CATALANO (2000) constataam as seguintes dificuldades:

1) Dificuldade em se definir como variável de projeto o número de camadas do laminado. A dificuldade se deve à maneira como são definidas as propriedades do elemento *shell99*, e à impossibilidade de se atribuir apenas valores inteiros à variável de projeto.

2) Na prática, mudar a espessura só seria possível para poucos valores discretos, que seriam as espessuras de tecido disponíveis comercialmente. Mas isso também não pôde ser feito. Definida a variável, o programa atribui qualquer valor real que esteja dentro do intervalo definido.

3) Não é possível definir a massa diretamente como função objetivo, que no caso de elementos de densidade variável, como no laminado sanduíche, seria mais apropriado.

Também seria interessante fazer, e o programa o permite, uma análise da sensibilidade de cada variável de projeto na função objetivo, permitindo uma melhor avaliação dos parâmetros do projeto.

4. ALGORITMOS GENÉTICOS

“Idéias antigas são lentamente abandonadas, pois são mais que categorias e formas lógicas abstratas. São hábitos, predisposições, atitudes de aversão e preferência profundamente enraizadas. Além disso persiste a convicção - embora a história mostre que se trata de uma alucinação - de que todas as questões que a mente humana formulou podem ser respondidas em termos das alternativas que as próprias questões apresentam. Entretanto, na verdade, o progresso intelectual normalmente ocorre através do completo abandono das questões, juntamente com as alternativas que elas pressupõem - um abandono que resulta de sua vitalidade enfraquecida e de uma mudança do interesse mais urgente. Nós não resolvemos os problemas, passamos por cima deles. Velhas questões são resolvidas pelo desaparecimento, volatilização, enquanto os novos problemas, correspondentes às atitudes de iniciativa e preferência modificadas, tomam seu lugar. Sem dúvida, a revolução científica que teve seu clímax em *A Origem das Espécies* é a maior dissolvente das velhas questões, a maior precipitadora de novos métodos, novas intenções, novos problemas dentro do pensamento contemporâneo.”

John Dewey

Otimização é a tentativa de melhorar o desempenho de algo em direção de algum ponto ou pontos ótimos, conforme VANDERPLAATS (1999). Existe uma clara distinção do processo de melhora e do objetivo ou ponto ótimo. Normalmente estamos apenas preocupados se determinado método converge, e não na sua performance intermediária. Essa ênfase provém da origem da otimização no cálculo. Todavia, nem sempre o ótimo é o ideal. Às vezes no mundo real é mais interessante obter sensíveis melhoras em um menor tempo, sem preocupar-se com a perfeição absoluta.

Segundo MARCELIN et al. (1995), o processo de otimização pode ser entendido como o cálculo de um extremo de um problema restringido. Esse extremo pode ser um mínimo, como o menor peso de uma estrutura mecânica enquanto ainda suporta seu carregamento, ou um máximo, como a rigidez máxima considerando todas as restrições dadas.

Podemos dividir os métodos de busca em três principais: baseados em cálculo, enumerativos e aleatórios. O método de otimização mais estudado na literatura é o baseado em cálculo diferencial e variacional, conforme HAFTKA (1991). Nos métodos chamados indiretos, os máximos são procurados buscando-se os pontos onde os gradientes são nulos. Outra classe de método baseado em cálculo, chamado de direto, são as técnicas de otimização denominadas *escalada de morro*. Basicamente, esses métodos de pesquisa encontram um ponto ótimo movendo-se na direção do maior gradiente local da função.

O problema desses métodos é que eles podem levar a máximos locais e não globais, e são apenas aplicáveis a fenômenos bem comportados dependem da existência de derivadas e de continuidade da função objetivo. Para domínios onde há muitas descontinuidades, grandes espaços multimodais ou ruídos (como visto na FIGURA 4.1), eles são pouco robustos.

FIGURA 4.1 - Funções com ruídos e descontinuidades, inviáveis para otimizações pelos métodos tradicionais (GOLDBERG 1989).

A base da técnica enumerativa é verificar o valor da função objetivo em cada ponto de um espaço finito ou discreto, um de cada vez. Esse método é extremamente ineficiente para problemas com espaços de pesquisas de tamanhos moderados e complexos.

Algoritmos de pesquisa aleatória realizam buscas de forma aleatória pelo espaço de pesquisa do problema, guardando o melhor resultado encontrado. Eles são tão ineficientes quanto os métodos enumerativos.

Por outro lado, existem técnicas de busca aleatória que se utilizam de escolhas aleatórias como ferramenta para se guiarem através do espaço de pesquisa do problema. Os dois tipos de algoritmos de pesquisa aleatória mais populares são têmpera simulada e algoritmos genéticos.

A técnica de têmpera simulada é uma técnica computacional que usa processos aleatórios derivados da mecânica estatística para conduzir uma busca guiada por estados de mínima energia. Basicamente ela estabelece uma analogia entre a otimização e a maneira pela qual os metais solidificam e cristalizam ou esfriam, como nos processos de têmpera e recozimento. Quando um metal em estado líquido, onde as moléculas estão se movendo livremente uma em relação a outra, é esfriado muito lentamente, eles vão se alinhando e ordenando até formar um cristal único e atingir o estado de mínima energia. Se esfriado rapidamente, as moléculas não se alinham e ele se solidifica numa forma policristalina ou amorfa, conforme HAFTKA (1991).

O importante a ser notado aqui é que busca aleatória não implica necessariamente numa busca cega e sem direção. Os algoritmos genéticos utilizam o conhecimento adquirido durante as várias gerações para se aproximar da solução ótima, como será visto mais adiante.

Mais um algoritmo de busca probabilístico interessante que vale a pena citar, é o conhecido como Colônia de Partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO). Ele foi proposto em 1995, portanto é muito recente. É um algoritmo baseado no comportamento social de aves, e tem relação com a teoria de *swarming* (enxames), conforme VENTER e SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI (2004). De acordo com PARSOPOULOS e VRAHATIS (2002), ele é eficiente em otimizações de funções multiobjetivos e ruidosas, com descontinuidades. O algoritmo se baseia na busca por alimento ou pelo ninho e a interação entre os pássaros ao longo do voo. Desta forma, a área sobrevoada é equivalente ao espaço de projeto e encontrar o local com comida ou o ninho é análogo a encontrar o ótimo.

Numa comparação com AGs, PRADO e SARAMAGO (2005) verificam que as duas técnicas convergem para os mesmos resultados, e que a otimização por colônia de partículas trabalha com um tamanho de população bastante reduzido, portanto com pequeno esforço computacional.

Segundo SOREMEKUN (1997), os AGs são sabidamente ferramentas de otimização bastante custosas, especialmente quando o custo de análise de cada indivíduo é alto. E esse é o caso quando cada indivíduo é uma estrutura de material compósito.

Os algoritmos genéticos usam técnicas inspiradas na natureza, no princípio da seleção natural e na genética. AGs são uma técnica de computação evolutiva, que é um ramo da inteligência artificial. Como diz GÜRDAL (1999), algoritmos genéticos são um ramo dos algoritmos evolucionários, predominantes na escola européia. Características dos algoritmos evolucionários são a sua dependência à aptidão, informação aleatória, e regras probabilísticas ou determinísticas de reprodução para ajudar na busca a um ponto ótimo no espaço de projeto. Algoritmos genéticos possuem diferenças importantes de outros algoritmos evolucionários, como Estratégias Evolucionárias e Programação Evolucionária. Essas duas últimas dependem predominantemente do operador mutação, e utilizam regras de auto-adaptação para controlar a taxa de mutação. Estratégias evolucionárias utilizam diversos tipos de operadores de recombinação que também são usados para certos procedimentos de auto-adaptação ao invés de pesquisar o espaço de busca. EE e PE também usam esquemas de extinção seletiva, onde alguns indivíduos da população são excluídos de serem escolhidos para reprodução. PE não utiliza nenhum tipo de operador de recombinação e usa métodos de seleção determinísticos. Já algoritmos genéticos utilizam o operador cruzamento como a principal ferramenta de busca e não utiliza nenhum tipo de processo de auto-adaptação. Métodos extintivos também não são utilizados em algoritmos genéticos.

A seguir será feito um breve resumo histórico do desenvolvimento da teoria da seleção natural, que serve de base aos algoritmos genéticos.

4.1 Origem: A teoria da seleção natural

Já na Grécia antiga os filósofos buscavam explicações para a origem das espécies, como pode ser notado na mitologia. Platão dizia que as formas eram apenas imitações imperfeitas das formas perfeitas transcendentais. Mas não se admitia evolução, apenas uma variação estática entre as espécies, conceito adotado pela teologia cristã, conforme FUTUYMA (2002).

Os primeiros trabalhos modernos de biologia datam do final do século XVIII, como o trabalho de Carolus Linnaeus, que introduziu a taxonomia. Seu extenso trabalho para classificar as espécies teve grande influência na biologia, e as bases do método são utilizadas até hoje em dia, apesar de a maioria das classificações por ele feitas terem sido alteradas. Ele acreditava que era tarefa dos naturalistas construir uma “classificação natural” que revelasse a glória divina da criação de Deus. Embora sua motivação fosse religiosa, ele já observava que a natureza era uma “guerra de todos contra todos” e que novas espécies surgiam por hibridização, conforme KING (1974).

Também de grande importância foi o trabalho de Thomas Robert Malthus, que estudou os fatores ambientais como disponibilidade de alimentos, doenças e clima no crescimento de uma população. Ele afirmava que os recursos alimentares aumentam de forma aritmética, enquanto as populações tendem a aumentar em progressão geométrica.

Outro naturalista de suma importância, embora seu trabalho não tenha tido o devido reconhecimento por muito tempo, foi Jean Baptiste Lamarck, que em 1809, em sua obra “Filosofia zoológica”, propôs duas leis básicas, a de que todas as espécies descendiam de outras espécies e a de que elas evoluíam pelo uso e desuso dos órgãos. Ou seja, um órgão muito usado por um indivíduo se desenvolveria e essa nova característica se transmitiria para seus descendentes. Ele também às vezes atribuía, segundo STRICKBERGER (1993) e FUTUYMA (2002), a evolução progressiva das espécies à alguma propriedade intrínseca, um “fogo etéreo”, que levava as espécies a uma progressiva e inevitável maior complexidade e perfeição, e que surgiam a partir de “geração espontânea”.

Inspirados nesses e em outros estudos, Alfred Russel Wallace e Charles Darwin simultaneamente desenvolveram a teoria de evolução através de seleção natural. Darwin também foi influenciado pelo trabalho de seu amigo Lyell, um geólogo que expôs teorias que indicavam que a terra era muito antiga e o efeito lento, constante e cumulativo das forças naturais produzia modificação contínua ao longo da história da terra. Embora o próprio Lyell negasse a evolução biológica, Darwin logo percebeu as implicações de suas teorias.

Após coletar muitos dados em sua viagem no *Beagle*, de 1831 a 1836, Darwin, influenciado por um ensaio de Malthus de 1798, propôs duas teses separadas: a de que todas as espécies descendem de um ancestral comum; e de que o agente modificador é a seleção natural. Ele considera o processo da evolução análogo ao tipo de seleção exercido pelos criadores de gado, cavalos ou cães, processo que conhecia bem, por ser fazendeiro. Na seleção artificial o homem escolhe para cruzar variedades cujas características lhe pareçam desejáveis. Na seleção natural, os agentes primários são as condições ambientais que, sobre as variações continuamente produzidas em cada espécie, operam para “favorecer” algumas e “desencorajar” ou eliminar outras. As variações ocorrem inteiramente ao acaso. A direção é inteiramente imposta pela seleção natural. Uma variação que confira a um animal mesmo pequena vantagem aumenta-lhe a probabilidade de deixar prole durável, nas palavras de CURTIS (1977).

Conforme descrito por STRICKBERGER (1993), se existe um excedente de indivíduos nascendo e, devido às restrições ambientais impostas exista uma freqüente e recorrente luta pela existência, então deve ocorrer que qualquer ser vivo que se modifique, mesmo imperceptivelmente, obtenha um benefício para si mesmo sob as complexas e variáveis condições de vida. Este, portanto terá maiores chances de sobrevivência, e assim será **selecionado naturalmente**. Baseando-se no poderoso princípio da herança, toda variante selecionada tenderá a propagar a sua nova forma modificada.

A diferença essencial da proposição de Darwin e a das outras teorias predecessoras é a importância do processo de variação, que segundo os outros eram apenas distúrbios no plano geral, enquanto para Darwin era a essência mesmo do processo de evolução. Darwin veio a publicar a sua famosa obra “*On the Origin of Species by Means of Natural Selection*” com a sua teoria completa, apenas em 1859, causando impacto não só na biologia mas também nos meios religiosos e filosóficos.

A teoria de Darwin e Wallace tinha algumas lacunas, pois não explicava o mecanismo da transmissão das características dos indivíduos para sua prole. A resposta veio com o trabalho de Gregor Mendel, publicado em 1866, sobre princípios da transmissão hereditária das características físicas. O seu trabalho ficou esquecido até depois de sua morte, mas por volta de 1900 foi redescoberto por três cientistas e a partir daí teve grande influência sobre os futuros trabalhos relacionados à evolução, conforme GARDNER (1991).

Seu primeiro princípio (a lei da segregação), afirma que os genes se encontram agrupados em pares (hoje conhecidos como *alelos*) nas células somáticas e que se separam durante a formação das células sexuais (gametas femininos ou masculinos). Seu segundo princípio (a lei da segregação independente) afirma que a atuação de um gene, para determinar uma característica física simples, não recebe influência de outras características. As leis de Mendel forneceram as bases teóricas para a genética moderna e a hereditariedade, conforme KING (1974), STANSFIELD (1974) e GARDNER et. al (1991).

Ainda segundo os mesmos autores, a união da genética com a teoria da seleção natural deu origem à ciência que hoje é conhecida como “Neo-darwinismo”, ou a Síntese Moderna, desenvolvida nos anos entre 1930 e 1950. Essa revisão do darwinismo reconciliou os dados de biogeografia, paleontologia e sistemática utilizados por Darwin no livro com os princípios da genética. Os principais avanços foram, segundo SANTOS (2002):

1. Demonstraram que caracteres adquiridos não eram herdados;
2. A variação contínua tem a mesma base mendeliana mas depende da interação de muitos genes;
3. A variação dentro e entre regiões geográficas tem base genética, e algumas delas tem sentido adaptativo;
4. Os sistematas demonstraram que as espécies não são tipos morfológicos, mas populações de formas variáveis e isoladas reprodutivamente de outras populações.

Os principais fundamentos deixados pela Síntese Moderna foram:

1. Populações contêm variação genética que surge ao acaso através de mutações e intensificada (ou embaralhada) pela recombinação;
2. Populações evoluem (microevolução) através de mudanças nas frequências gênicas e genotípicas induzidos principalmente pela Seleção Natural. Outros fatores evolutivos atuam em menor escala: deriva genética, fluxo gênico, endogamia, mutações recorrentes, etc;
3. Os variantes se apresentam como um contínuo de diferenças fenotípicas individuais, desde os menos aos mais adaptados e essas mudanças são graduais;
4. Diversificação se dá através da especiação (isolamento reprodutivo);
5. Este processo de diversificação quando é acentuado e em um prazo mais longo leva à origem de taxas superiores: famílias, ordens, classes, filos, etc.

4.2 Fundamentos dos algoritmos genéticos

As primeiras pesquisas envolvendo simulação computacional de processos evolucionários ocorreram por volta de 1960. Os algoritmos genéticos propriamente ditos foram desenvolvidos por HOLLAND (1992) e seus colaboradores no início dos anos 70, na Universidade de Michigan. Eles tinham como objetivo abstrair e explicar rigorosamente os processos adaptativos dos sistemas naturais e reproduzi-los em sistemas artificiais.

Nas palavras de GOLDBERG (1989), algoritmos genéticos são:

“Algoritmos de pesquisa baseados nos mecanismos da seleção natural e da genética”.

Na natureza, quando uma população de criaturas evolui por várias gerações, características individuais que são úteis para a sobrevivência tendem a ser passadas para as gerações futuras, pois os indivíduos que as possuem têm maior chance de sobreviver e portanto de se reproduzir. Na natureza, as características dos indivíduos são armazenadas nos cromossomos. Nos algoritmos genéticos, assim como no processo de seleção natural, ocorre uma troca estruturada, embora aleatória, de informações genéticas entre os cromossomos dos indivíduos através de operações como **cruzamento**, **reprodução** e eventual **mutação**.

Segundo CAMP et al. (1998), AGs não necessitam uma relação explícita entre a função objetivo e as restrições. AGs acham soluções globais facilmente, conforme OKUMURA et al. (1995).

Segundo GOLDBERG (1989), os algoritmos genéticos são robustos, (eficientes e eficazes), e diferem dos métodos convencionais de otimização em:

1. Algoritmos genéticos manipulam representações de variáveis de controle ou decisão no nível de sua codificação para explorar similaridades entre codificações que representam alta performance. Outros métodos usualmente lidam com funções e suas variáveis de controle diretamente. Por algoritmos genéticos operarem no nível da codificação, eles normalmente não encontram maiores dificuldades mesmo quando a função é difícil de ser tratada por esquemas tradicionais.
2. Algoritmos genéticos trabalham com uma população: muitos outros métodos trabalham a partir de um único ponto. Mantendo uma população de amostras de pontos bem adaptados, a probabilidade de atingir um pico local é reduzida.
3. Algoritmos genéticos atingem grande parte de sua abrangência ignorando informações além daquelas relativas ao valor da função objetivo. Outros métodos dependem fortemente dessas informações adicionais, como derivadas, e em problemas onde essas informações necessárias não estão disponíveis ou são difíceis de se obter, essas outras técnicas falham. Algoritmos genéticos permanecem gerais aproveitando-se de informações disponíveis em qualquer problema de busca. Algoritmos genéticos processam similaridades nos códigos em que se baseiam as estruturas conjuntamente com informações que as ordenam de acordo com sua capacidade de sobrevivência no ambiente em que

se encontram. Explorando informações tão vastas, algoritmos genéticos podem ser aplicados a virtualmente qualquer problema.

4. Algoritmos genéticos possuem regras de transição estocásticas, enquanto muitos outros métodos possuem regras de transição determinísticas. No entanto existe uma diferença entre os operadores aleatórios dos algoritmos genéticos e outros métodos que são simples buscas aleatórias. Algoritmos genéticos usam escolhas aleatórias para guiar uma busca altamente oportunística.
5. Enquanto o algoritmo genético processa n indivíduos, ele processa cerca de n^3 esquemas úteis, sem necessidade de nenhum recurso adicional de memória. Isso é tão importante e único ao algoritmo genético, que é chamado de paralelismo implícito.

4.2.1 Estrutura Básica do Algoritmo Genético

Basicamente, os passos de um AG, em forma algorítmica, são:

1. **[Início] (geração inicial)** Começa com a geração aleatória de uma população de n cromossomos. O cromossomo é a representação de um indivíduo de forma codificada. Geralmente, cada indivíduo é gerado combinando números binários 0 e 1 aleatoriamente.
2. **[Decodificação]** Traduzir o código que representa o indivíduo para uma forma apropriada de parâmetros, de modo que possa ser avaliada durante o passo seguinte.
3. **[Seleção]** Selecionar cromossomos progenitores da população de acordo com seus valores de aptidão (função objetivo). Os mais adaptados têm maior chance de serem selecionados, ou seja, de sobreviverem e deixarem descendentes. Os mais fracos desaparecem. É a versão artificial da seleção natural de Darwin.
4. **[Codificação]** Re-codificar os indivíduos para a forma do cromossomo.
5. **[Operações genéticas]**
 - a. **[Cruzamento]** Cruzar com uma determinada probabilidade os cromossomos selecionados, os mais aptos, para formar a nova geração de cromossomos.
 - b. **[Reprodução]** Nos casos em que não há cruzamento, os novos cromossomos serão cópias dos progenitores.
 - c. **[Mutação]** Com uma determinada probabilidade de mutação, realizar mutações em cada locus (posição em um cromossomo) dos novos cromossomos produzidos.

6. **[Geração]** Inserir os novos cromossomos na nova população.
7. **[Substituição]** Substituição da antiga população pela nova população gerada.
8. **[Teste]** Verifica se a condição de parada foi satisfeita. Se sim, parar a execução e retornar à melhor solução da população atual.
9. **[Laço]** Voltar ao passo 2, dando sequência à mais uma geração de indivíduos.

FIGURA 4.2 Fluxograma de um algoritmo genético convencional.

Na FIGURA 4.2 encontra-se representado um fluxograma descrevendo os passos básicos de um AG. Nela, GER representa o número da geração, i representa o número do indivíduo de uma dada geração, M o tamanho da população de cada geração, Pr , Pc e Pm as probabilidades de reprodução, cruzamento e mutação. Quando o AG atinge um critério de parada, que pode ser tanto um determinado número de gerações ou taxa de convergência, ele finaliza.

A seguir encontra-se uma descrição mais detalhada de cada operação que ocorre dentro do AG.

4.2.2 Função objetivo e a aptidão

Na maioria dos problemas de otimização, o objetivo é minimizar alguma função de custo ou maximizar alguma função de utilidade, qualidade ou lucro. Logo, essa será a função objetivo. Assim parece ser uma tarefa simples mapear essa função de utilidade num valor de aptidão.

Na biologia, aptidão significa o quão adaptado um indivíduo está ao seu meio - qual a sua capacidade de sobreviver aos predadores, ao clima, sua capacidade de se alimentar, ou seja, de sobreviver a todos os obstáculos e se reproduzir.

A única exigência é que a aptidão não pode assumir valores negativos, pois isso causaria um problema para determinar a probabilidade de seleção.

4.2.2.1 Penalidade

Às vezes existem algumas restrições à função objetivo, que não devem ser violadas. Podem ser restrições como uma dimensão geométrica ou temporal, por exemplo. Poderia-se simplesmente para os indivíduos que violassem tais restrições atribuir uma aptidão nula. Mas algumas vezes indivíduos que violem levemente as restrições podem conter informações úteis que poderiam ser aproveitadas. Assim, ao invés de descartar tais indivíduos, criou-se o *método da penalidade*. Nesse método, em vez de criar restrições à função objetivo, associa-se um custo ou penalidade às violações de restrições. Esse custo é incluído na avaliação da função objetivo.

4.2.2.2 Escalonamento da aptidão

Em algoritmos genéticos de pequenas populações, é comum que no início haja alguns poucos indivíduos muito aptos e o resto seja medíocre. Se usássemos a regra de seleção básica, com uma probabilidade de seleção $P_s = a_i / \sum a_i$, os poucos indivíduos que se destacam dos demais deixariam uma grande parte da descendência na nova geração. Isso é ruim, pois diminui a diversidade da população, o que poderia levar a uma convergência precipitada e a perda de busca em partes do domínio. Já nas gerações mais avançadas, pode haver grande diversidade na população, mas a aptidão média ser próxima à do melhor indivíduo. Isso faria com que todos

acabassem sendo copiados praticamente na mesma proporção, o que leva a uma estagnação da evolução. Assim, é uma boa medida escalonar a aptidão. A formulação detalhada usada pode ser vista no item 5.4.2.1.

4.2.3 Codificação

Algoritmos genéticos requerem que os parâmetros do problema a ser otimizado sejam codificados em um cromossomo de comprimento finito usando algum alfabeto também finito. A representação mais simples é a que utiliza um código binário. Dentro do algoritmo genético, cada indivíduo que representa uma possível solução é representado de forma codificada por uma sequência de códigos agrupados, que chamamos de cromossomo, devido a sua analogia com os cromossomos nos sistemas biológicos.

Nos seres vivos, os cromossomos são sequências de DNA (ácido desoxirribonucléico) que sós ou combinados prescrevem geneticamente a forma e o funcionamento do organismo. Os cromossomos por sua vez são formados por genes, uma combinação de proteínas. A disposição, sequência e interação dos genes definem cada característica, por exemplo, a textura do cabelo, a cor da pele, a predisposição a alguma doença. Os possíveis valores das características são chamados alelos. Cada gene tem sua própria posição no cromossomo. Essa posição denomina-se locus.

O conjunto completo do material genético (todos os cromossomos) é chamado de genoma. Um conjunto particular de genes no genoma é denominado genótipo. O organismo formado pela interação do genótipo com o meio ambiente é chamado de fenótipo.

TABELA 4.1 – Equivalências entre a Natureza e os AGs.

NATUREZA	ALGORITMOS GENÉTICOS
Cromossomo	Código, sequência, <i>string</i>
Gene	Característica, caráter ou detector
Alelo	Valor da característica
Locus	Posição na <i>string</i>
Genótipo (todo código genético)	Estrutura (conjunto de <i>strings</i>)
Fenótipo (organismo resultante do genótipo + ambiente)	Conjunto de parâmetros, solução alternativa, ponto ou estrutura decodificada
Epistasia	Não linearidade. A dependência do efeito causado por um gene de outro gene.

Não existe nenhuma restrição teórica à forma de codificação. GOLDEBERG (1989) enuncia dois princípios que devem ser seguidos para se obter uma boa codificação.

O “princípio dos tijolos expressivos” que diz:

“O usuário deve selecionar uma codificação tal que esquemas curtos, de baixa ordem são relevantes ao problema subjacente e relativamente não-relacionados aos esquemas de outras posições fixas”.

E o “princípio do alfabeto mínimo” que diz:

“O usuário deve selecionar o menor alfabeto que permite uma expressão natural do problema”.

A **codificação binária** é a forma mais comum de codificar *strings* principalmente por razões históricas; os primeiros trabalhos sobre algoritmos genéticos utilizavam esse tipo de codificação. Além disso, quanto maior o alfabeto, mais difícil de garantir que todo o gene possível esteja presente na população inicial.

Na codificação binária cada cromossomo é formado por uma sequência de “0”s e “1”s.

TABELA 4.2 – Exemplo de cromossomo codificado com linguagem binária.

Cromossomo A	101000101011001111
Cromossomo B	110010111010011011

Outras formas de codificação são:

- Codificação por Permutação
- Codificação por Valor
- Codificação em Árvore

Na codificação por permutação cada cromossomo é uma sequência de números que representa uma sequência de eventos. A codificação por permutação pode ser usada em problemas de ordenação, tais como o problema do caixeiro viajante GOLDBERG (1989).

Na codificação por valor cada cromossomo é uma sequência de números com o próprio valor da variável do problema. Esse tipo de codificação é muito usado com os *Algoritmos evolucionários*, variantes dos algoritmos genéticos, mais difundidos na Europa, que usam valores reais.

A codificação em árvore é usada principalmente em problemas que envolvem expressões, para programação genética e desenvolvimento de programas. Cada cromossomo é uma árvore de alguns objetos, tais como funções ou comandos de uma linguagem de programação.

4.2.4 Reprodução e Seleção

A função dos operadores genéticos é manipular e transformar os cromossomos, fazendo com que a população se diversifique e explore novos pontos do espaço de pesquisa.

Durante a operação de reprodução, os indivíduos são selecionados e copiados de acordo com sua aptidão para gerarem novas populações.

Copiar *strings* de acordo com sua aptidão significa que *strings* mais aptas tem maior probabilidade de contribuírem com um ou mais descendentes na próxima geração. Há uma infinidade de métodos possíveis para se selecionar os melhores indivíduos. Alguns dos mais usados são: seleção por roleta e seleção por classificação, entre outros. Depois que a nova geração é selecionada, ela vai para uma *piscina de acasalamento*, onde sofrerá outras operações. Segue uma breve descrição desses métodos de reprodução.

4.2.4.1 Roda de roleta

Nesse método, cada indivíduo da população é representado na roleta por uma fenda de tamanho proporcional à sua aptidão. Ou seja, os indivíduos com maior aptidão são representados por fendas maiores, enquanto os de aptidão mais baixa por fendas menores da roleta. Finalmente, a roleta é girada um número de vezes igual ao tamanho da população, selecionando os indivíduos que participarão da próxima geração. Os mais aptos são assim escolhidos com maior probabilidade enquanto os menos aptos tendem a desaparecer.

Uma desvantagem desse método é que quando poucos ou um só indivíduo tem aptidão muito maior que os demais, os outros podem nem ser selecionados, e a geração seguinte terá baixa diversidade, o que pode levar à convergência a um mínimo local.

4.2.4.2 Seleção por Classificação

A *Seleção por Classificação* é semelhante ao da roleta, com a diferença de que a população é classificada e ordenada de acordo com a aptidão de cada indivíduo, atribuindo-se para cada cromossomo um valor de acordo com essa classificação. Dessa forma, a distribuição de indivíduos na roleta se torna linear. A desvantagem é que ele pode apresentar convergência muito lenta porque os melhores indivíduos não se destacam muito dos outros.

4.2.4.3 Populações sobrepostas

Nesse método, parte da população que tem maior aptidão é transferida inteira para a próxima geração, e outra parte é eliminada.

4.2.4.4 Seleção por Elitismo

Introduzido por DE JONG apud GOLDBERG (1989), o elitismo previne que os melhores indivíduos não corram o risco de desaparecer pela manipulação dos operadores genéticos ou eventualmente não serem selecionados pela roleta. Basicamente, ao aplicar esse método garante-se que o melhor ou os n melhores indivíduos de uma geração sempre estejam presentes na geração seguinte.

4.2.5 Cruzamento

O cruzamento aliado com a reprodução é o operador mais importante do algoritmo genético. Ele é o maior responsável pelo “desbravamento” do espaço de busca, combinando características positivas dos indivíduos mais adaptados para tentar encontrar melhores performances. GOLDBERG (1989) faz uma analogia com boas idéias e conceitos que se combinam e interagem de várias formas até gerarem inovação e ganhos.

Nos algoritmos genéticos, o processo de cruzamento é bastante simples. Seleciona-se aleatoriamente um ponto de corte ao longo dos genes de dois cromossomos também escolhidos aleatoriamente, que são divididos em dois pedaços. Cada pedaço de um é então combinado com o outro pedaço do outro cromossomo, gerando dois cromossomos filhos que os substituíram na nova geração. O processo está exemplificado na TABELA 4.3 abaixo, considerando uma codificação binária. O símbolo “/” mostra o local do corte.

TABELA 4.3 – Operação de cruzamento.

Pais	Prole
00101/100111010	00101001100010
01110/001100010	01110100111010

Existem muitas variações da operação de cruzamento, como cruzamento por dois ou multipontos, onde o cromossomo sofre uma concatenação, em anel, em árvore, e outras formas mais. Para cruzamento, é aconselhável utilizar uma taxa de cruzamento menor do que 100%, para preservar esquemas (ver item 4.2.8).

4.2.6 Mutação

Ao contrário de outros algoritmos evolucionários existentes, a operação de mutação tem um papel secundário nos algoritmos genéticos, de acordo com GOLDBERG (1989). A mutação é necessária porque, apesar de a reprodução e o cruzamento efetivamente realizarem a busca e promoverem a evolução da população, eventualmente alguma informação genética pode se perder. Isso pode ocorrer quando nenhum indivíduo de uma dada geração tiver um “0” ou um “1” em uma dada posição do cromossomo, no caso de uma codificação binária. Muitas vezes

ocorre também que a população inicial não contém todas as opções para todos os genes. Isso limita o espaço de busca, e com a mutação torna-se possível atingir esses espaços, introduzindo novas características na população, conforme CAMP et al. (1998).

A mutação também garante que haja uma boa diversidade na população. Taxas muito altas de mutação não são desejáveis pois elas acabam prejudicando os indivíduos mais aptos.

A operação de mutação consiste simplesmente em alterar um gene aleatoriamente escolhido de um cromossomo com uma dada probabilidade, normalmente em torno de 3%. Taxas muito altas destroem os esquemas. Segue abaixo, na TABELA 4.4 um exemplo.

TABELA 4.4 – Operação de mutação.

Cromossomo	
Antes da mutação	00101100111010
Depois da mutação	00111100111010

4.2.7 Outros operadores

A abstração, análise e implementação de novos operadores avançados e técnicas, baseados nos fenômenos e operadores naturais, são ainda uma poderosa fonte para a melhoria do desempenho e robustez do AG. Existem muitos, mas alguns destes operadores, citados por GOLDBEG (1989), serão listados aqui a título de informação, sem que se entre em maiores detalhes:

- Dominação, diploididade e recessividade
- Inversão
- Duplicação intracromossômica
- Apagamento / Remoção
- Translocação
- Segregação
- Exploração de nichos e especiação através de operadores de níveis mais elevados, orientados às populações, como migração, restrição de casamento e funções de troca.

Outra operação que segundo McMAHON (1998) melhora o desempenho do algoritmo genético paralelo é a migração, onde partes de populações são transferidas às outras, quando o AG possui processamento paralelo.

4.2.8 Esquemas e padrões de similaridade

Ao observar os cromossomos de uma população percebe-se que existem certos padrões, trechos do cromossomo, que tendem a se repetir nos indivíduos de maior aptidão. Esse tipo de informação pode ajudar a guiar a busca.

Para dar um maior embasamento matemático ao que acontece nos algoritmos genéticos, HOLLAND (1992) introduziu o conceito de esquemas. Esquema em algoritmos genéticos significa um padrão de similaridade descrevendo um subconjunto de cromossomos com similaridades em certas posições.

Considerando um alfabeto binário, $\{0,1\}$, e introduzindo o símbolo “*” a esse alfabeto, sendo “*” um “curinga” que pode representar tanto “0” como “1”, podemos criar esquemas usando um alfabeto $\{0,1,*\}$. Para ilustrar, vemos na TABELA 4.5 dois esquemas e o conjunto de cromossomos por eles representados:

TABELA 4.5 – Exemplos de Esquemas.

Esquema	Cromossomos
1*110	11110
	10110
0*1*01	001001
	011001
	001101
	011101

Esquemas são uma ferramenta poderosa que simplifica a análise da similaridade existente entre os indivíduos de uma população. Para melhor estudá-los, define-se o comprimento de um esquema $\delta(H)$, que é a distância entre a primeira e a última posição especificada no cromossomo; e a sua ordem $o(H)$, que é o número de posições fixas no esquema. Na TABELA 4.6 estão apresentados dois exemplos:

TABELA 4.6 – Comprimento e ordem de um esquema.

Esquema	Comprimento $\delta(H)$	Ordem $o(H)$
**1*0*0	4	3
*0***	0	1

Cromossomos com um alto valor de aptidão provavelmente contêm trechos de cromossomos comuns com outros muito aptos. Assim, mesmo que operações de cruzamento dividam os cromossomos em duas partes, haverá boas chances de que esses trechos sejam transmitidos inalterados para a prole. Ou seja, esquemas de pequeno comprimento e baixa ordem tem menor probabilidade de serem rompidos pelo operador cruzamento e são por isso reproduzidos a uma taxa exponencial durante a operação de reprodução, segundo HOLLAND (1992). Esse conceito é tão importante para os algoritmos genéticos que recebe o nome de “Teorema Fundamental dos Algoritmos Genéticos”. Esses esquemas curtos, de alta aptidão, são chamados de *tijolos*. Tudo isso ocorre em paralelo sem nenhuma outra fonte de informação ou

memória em especial além da população de n cromossomos, ainda segundo HOLLAND (1992). De acordo com GOLDBERG (1989), aproximadamente n^3 esquemas são processados por geração numa população de n indivíduos. Dizendo de outra forma, isso mostra que apesar de o algoritmo genético processar apenas n estruturas a cada geração, n^3 esquemas, ou informações úteis, são processadas. Essa constatação é tão importante que recebe o nome de *paralelismo intrínseco*, ou *paralelismo implícito*, como é chamado mais modernamente.

Segundo GOLDBERG (1989), a força dos algoritmos genéticos está na sua habilidade de encontrar bons *tijolos* e propagá-los de geração para geração numa taxa próxima da taxa ótima. Isso é chamado de *Hipótese dos tijolos*.

Para um alfabeto de cardinalidade k , há $(k-1)^L$ esquemas numa *string* de comprimento L . GOLDBERG (1989) demonstra matematicamente como os esquemas com aptidão relativa acima da média da população, em especial os esquemas mais curtos e de baixa ordem, vão exponencialmente ganhando mais cópias a cada geração. O contrário acontece com esquemas com aptidão relativa abaixo da média.

Existem vários trabalhos que contestam e criticam o teorema dos esquemas e a hipótese dos tijolos, e em alguns casos o AG pode convergir para um ótimo local. YU (1999) lista uma série de trabalhos relacionados. Isso tem levado ao uso combinado de algoritmos genéticos com outros métodos de otimização. Não obstante, os esquemas ainda são uma ferramenta poderosa que permite uma melhor compreensão do processo que ocorre nos algoritmos genéticos.

4.3 Aplicações de algoritmos genéticos

Existe uma vasta gama de áreas nas quais os algoritmos genéticos são empregados. Segundo, LOURENÇO (2002) e CARVALHO (2002), algumas são:

- Reconhecimento de suspeitos de crimes
- Composição de músicas
- Sistemas dinâmicos não-lineares
- Trajetórias de robôs
- Funções para criação de imagens
- Problemas de planejamento (problema do caixeiro viajante)
- Jogos
- Dilema dos prisioneiros

- Detecção de epicentros de terremotos
- Otimização estrutural
- Otimização de funções
- Otimização de consultas a banco de dados
- Desenho de aeronaves
- Determinação das estruturas de proteínas
- Indução e otimização de bases de regras
- Encontrar novas topologias connexionistas
 - Engenharia de sistemas neurais artificiais
 - Modelagem de estruturas neurais biológicas
- Simulação de modelos biológicos
 - Comportamento
 - Evolução

Um outro exemplo de aplicação é o trabalho de GODINHO (2000), que utiliza um algoritmo genético GALOPPS (*Genetic ALgorithm Optimized for Portability and Parallelism System* ou Algoritmo Genético Otimizado para Sistema com Portabilidade e Paralelismo, MSU... (2004)), para resolver um problema inverso em ótica hidrológica. Ele consegue bons resultados associando o algoritmo genético a uma rotina de busca local do tipo convencional.

Às vezes os algoritmos genéticos são aplicados a problemas contínuos, mas nesses casos eles dificilmente são tão eficientes quanto os métodos contínuos de otimização, segundo VENTER e SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI (2004). Algoritmos que se utilizam de programação evolucionária são mais apropriados a problemas contínuos, de acordo com McMAHON (1998).

4.3.1 Otimização de estruturas de materiais compósitos com AG

Em materiais compósitos, principalmente em Compósitos Reforçados com Fibras (CRF), o esquema de combinação dos componentes tem grande influência sobre as propriedades mecânicas do compósito. Alterando-se os parâmetros dessas combinações pode-se otimizar suas propriedades.

O problema de otimização numérica de estruturas de materiais compósitos tem sido abordado utilizando-se técnicas contínuas, que utilizam derivadas e gradientes. Isso nem sempre traz os melhores resultados, por dois motivos, de acordo com McMAHON (1998).

O primeiro é que a otimização de estruturas compostas laminadas não envolve só a orientação de camadas e espessuras, mas também o número de camadas, seqüência, o tipo de tecido e material de cada uma e a sua espessura específica, todas estas variáveis discretas que precisam ser convertidas em contínuas. Depois de obtida a solução, ela deve ser re-convertida para uma solução discreta, o que às vezes não é possível, pois não existe na prática, ou não é uma solução ótima. Segundo, muitas vezes a função objetivo é descontínua e ruidosa, ou possui mais do que uma solução global.

As primeiras referências de algoritmos genéticos aplicados a otimização de estruturas de materiais compósitos são de CALLAHAN e WEEKS (1992), LE RICHE e HAFTKA (1993), HAJEÇA e ERISMAN (1993), NAGENDRA et al. (1993) e KOGISO et al. (1994), apud GÜRDAL (1999).

Conforme MARCELIN et al. (1995), McMAHON (1998) e GÜRDAL et al. (1994), algoritmos genéticos são ferramentas poderosas para a otimização de compósitos laminados, pois eles lidam melhor com variáveis discretas e espaços de soluções ruidosas do que outros métodos de otimização baseados em derivadas.

Muitos estudos têm sido feitos com o objetivo de melhorar a eficiência e confiabilidade dos AGs. GÜRDAL et al. (1994) realizaram um trabalho onde utilizam um algoritmo genético para o projeto e otimização de painéis de compósitos laminados com ênfase na seqüência de laminação. No algoritmo desenvolvido, não apenas a orientação do laminado é otimizada, mas o número de camadas do laminado. Para isso um *cromossomo* com zeros representando a ausência de uma camada é usado. Variando o número de zeros no *cromossomo* varia-se o número de camadas. Para evitar que haja vazios no interior do laminado, é usado um processo chamado empacotamento de *cromossomo*, para mover as camadas inexistentes do *cromossomo* em direção ao exterior. Assim, deve-se prover a população inicial com um número suficiente de camadas, que cubram o número ótimo provável de camadas.

Os operadores padrão cruzamento e mutação são adequados à otimização da orientação, mas para melhorar a otimização da seqüência de laminação, ele introduz um operador estocástico, a permutação, desenvolvida inicialmente por Le Riche e Haftka. A permutação inverte a ordem dos bits entre dois pontos. Isso é particularmente interessante para otimizar a ordem de laminação interna do compósito, sem influenciar as camadas externas. Elas têm um efeito dominante sobre a flambagem, e seu genes, que ficam nas extremidades da *string*, são pouco afetados por esse operador.

Também é proposto que por muitas configurações de laminação idênticas se repetirem durante o processo, o resultado dessas análises deva ser mantido, o que permite reduzir o tempo evitando cálculos redundantes.

Ainda no trabalho de GÜRDAL et al. (1994), foram encontradas, otimizando painéis compósitos sob cargas combinadas no plano, estruturas que eram 5.7% mais leves do que utilizando rotinas de otimização contínua. O trabalho também conclui que algoritmos genéticos conduzem a muitas possíveis soluções diferentes devido a suas características aleatórias.

MARCELIN et al. (1995) em seu trabalho introduzem uma função chamada inicialmente por Golberg e Richardson de "função compartilhamento" e um novo operador, chamado inversão. A inversão acelera a convergência do AG, invertendo a sequência de laminação de laminados simétricos. A função compartilhamento faz com que cromossomos muito parecidos não se repitam demasiadamente nas novas populações, favorecendo a busca de mínimos globais.

LE RICHE e HAFTKA (1994) estudaram o problema de minimização de peso de painéis de material compósito sujeitos a restrições de flambagem e resistência. Usando uma combinação de parâmetros de penalidade, a convergência a configurações aceitáveis foi garantida concomitantemente com o aumento da eficiência da busca genética. Com essas modificações, e a utilização de um operador permutação menos disruptivo, uma redução de 56% no tempo de busca foi obtida.

5. MODELAMENTO E ROTINA DE OTIMIZAÇÃO

O objetivo aqui não é desenvolver todo um projeto preliminar de um VANT, mas tão somente revisar os conceitos envolvidos em seu projeto e desenvolver uma rotina de otimização aplicável a ele, que seja eficiente e que ofereça a possibilidade de se obter um ganho de desempenho através de uma estrutura otimizada. Para tanto, baseado na revisão feita no capítulo 2, e considerando que o atual estado de desenvolvimento desse tipo de aeronaves no Brasil ainda é incipiente, toma-se como base o desenvolvimento de um VANT de média altitude, baixa velocidade, porém com uma capacidade de carga razoável. Faz-se assim nesse capítulo uma proposta de geometria de uma asa que atenda a essa premissa, e que represente, embora de forma simplificada e sem maiores estudos aerodinâmicos, uma típica asa de VANT de grande alongamento.

Na TABELA 5.1 são exibidos, apenas a título de informação, as condições estimadas de um voo em cruzeiro, na condição de espera (*loiter*), para uma missão a média altitude e um peso total de decolagem de pouco mais de 700 kgf, obtido de uma análise paramétrica da TABELA 2.4.

TABELA 5.1 - Parâmetros de voo em cruzeiro.

Parâmetro	Valor
ρ nível do mar (kg/m^3)	1,225
CL cruzeiro	1,1
$\text{Re} \cdot 10^6$	1,2
Altitude (m)	5000
EAS (m/s)	50
TAS (m/s)	64,50
Mach	0,2
Sustentação (kgf)	723,20
Nz	1

5.1 Geometria da asa

O modelo de asa proposto é dividido em três regiões ao longo da semi-envergadura, para aproximá-lo de uma forma elíptica: a central, retangular, a região intermediária e a externa, ambas trapezoidais. Ela é exibida na FIGURA 5.1. Essa divisão é feita considerando que a asa seja desmontável em cinco partes de igual envergadura - uma central, cuja fixação na fuselagem seja feita de forma a não transmitir momentos para a mesma, duas semi-asas médias e duas semi-asas externas. Por simplicidade, as fixações das semi-asas não são consideradas no modelo de EF. O enflechamento do bordo de ataque nas três diferentes semi-asas é tal que a longarina, posicionada no ponto de máxima espessura do perfil, não tenha enflechamento em nenhuma das

seções. O diedro é de dois graus, para a semi-asa média e para a semi-asa da ponta. A parte central não possui diedro, para que todas as seções de asa quando desmontadas sejam planas. A asa não possui torção geométrica e o perfil é constante ao longo da envergadura. Na TABELA 5.2 vê-se as coordenadas de alguns pontos de referência da asa em relação à origem. Na TABELA 5.3 mais adiante encontram-se alguns outros dados geométricos da asa.

FIGURA 5.1 - Vista em planta da semi-asa esquerda.

TABELA 5.2 – Coordenadas de alguns pontos de referência da asa.

	x (m)	y (m)
BA raiz semi-asa central	0	0
BA raiz semi-asa média	0	1,2
BA ponta semi-asa média	0,0126	3,6
BA ponta semi-asa externa	0,0441	6
BF ponta semi-asa externa	0,1791	6
BF ponta semi-asa externa	0,3726	3,6
BF raiz semi-asa média	0,45	1,2
BF raiz semi-asa central	0,45	0
BA raiz semi-asa central	0	0
Longarina, raiz semi-asa central	0,063	0
Longarina, ponta semi-asa central	0,063	1,2
Longarina, ponta semi-asa média	0,063	3,6
Longarina, ponta semi-asa externa	0,063	6

TABELA 5.3 – Resumo dos dados geométricos da asa.

Envergadura (m)	12
Corda raiz semi-asa central (m)	0,45
Corda ponta semi-asa média (m)	0,36
c.m.a. (m)	0,351
Corda ponta semi-asa externa (m)	0,135
Área semi-asa central (m ²)	0,54
Área semi-asa média (m ²)	0,972
Área semi-asa externa (m ²)	0,594

Área asa (m^2)	4,212
Enflechamento (graus)	0
Torção (graus)	0
x/c do ponto de máx esp	0,14
z/c do ponto de máx espessura	0,3
Razão de afilamento semi-asa média	0,8
Razão de afilamento semi-asa externa	0,3
Alongamento	34,19
Diedro (graus)	2

5.1.1 Perfil aerodinâmico da asa

Como um dos objetivos do desenvolvimento de um VANT de alta performance é minimizar o peso estrutural, é interessante considerar o uso de um tanque integrado à estrutura da asa. Evita-se assim estruturas redundantes e desnecessárias como as paredes do tanque. A própria casca da asa ou fuselagem pode servir para tal propósito. Para maior volume e rigidez é interessante usar um perfil de alta razão de espessura. GALI (1996) apresenta o resultado do desenvolvimento de um elemento estrutural de asa ou fuselagem laminada, de material compósito, aplicado ao VRP HERON (AALA), e que serve de tanque de combustível.

Outro requisito fundamental, como já foi dito antes, é o uso de um perfil de alto $Cl_{máx}$. Dois perfis foram aqui analisados. O perfil Selig 1223 e o perfil Wortmann FX74-CL6-140. Ambos são mostrados na FIGURA 5.2.

FIGURA 5.2 – Perfis Selig 1223 e Wortmann FX74-CL5-140.

Na TABELA 5.4 estão resumidos alguns dados dos perfis. Ambos tem um $Cl_{máx}$ de aproximadamente 2,3. O perfil Selig possui melhores características de estol. O perfil Wortmann por sua vez possui uma maior razão de espessura e volume para uma mesma corda. Isso é vantajoso estruturalmente, pois permite um melhor uso do espaço interno, como para o tanque de combustível, por exemplo, e também uma longarina com uma seção transversal com maior altura. Por essa razão, o perfil escolhido foi o Wortmann.

TABELA 5.4 - Comparativo dos perfis Selig 1223 e Wortmann FX-C6-140.

	Selig1223	Wortmann FX74-CL6-140
$Cl_{m\acute{a}x}$	~2,3	~2,3
Razão corda/Máx. Espessura	0,12	0,14
Posição da máxima espessura (x/c)	0,17	0,30
Característica de Estol	Suave	Brusco
Área seção (u.c. ²)	0,06491	0,08205

Vale lembrar que, num projeto mais detalhado, seria aconselhável usar um perfil modificado na ponta da asa, que tivesse melhores características de estol.

5.2 Modelo estrutural da asa em elementos finitos

Todos os elementos utilizados são do tipo *shell99*, já discutido na seção 3.5. O modelo em elementos finitos da asa foi dividido em três regiões ao longo da envergadura. A central, retangular, a região intermediária e a ponta, ambas com afilamento. Cada região foi subdividida em intra e extradorso. Essa divisão, além de considerar que a asa seja desmontável em três partes, tenta reproduzir aproximadamente o que acontece na prática: uma asa se divide em diferentes regiões com diferentes parâmetros de laminação. Dentro de cada região, os parâmetros são constantes. A delimitação de cada região depende de como são recortadas e colocadas as laminas (tecido de fibra). Normalmente o tecido é fornecido em forma de bobinas, com aproximadamente 1,5 m de largura. Uma otimização ideal só seria possível se a asa fosse fabricada por “bobinagem” ou processo similar, onde a orientação do filamento pode ser controlada praticamente em qualquer área do componente.

Na FIGURA 5.3 pode-se observar as diferentes regiões no extradorso, representadas em diferentes cores. Como durante a execução do AG são feitas centenas de análises, a asa foi modelada utilizando-se uma malha pouco refinada, para minimizar o tempo de processamento. Na FIGURA 5.4 vê-se o intradorso, com as quatro diferentes regiões, e na FIGURA 5.5 vê-se a longarina e as nervuras. Existe uma pequena região reforçada, no bordo de ataque da raiz. A longarina é modelada apenas como uma casca. Por simplicidade, as mesas da longarina foram modeladas como uma camada de tecido unidirecional. Normalmente elas são construídas como uma barra de fibra pultrudada, cuja espessura é a espessura da mesa. Definiu-se que as mesas seriam de compósito de fibra de carbono. A alma é análoga à casca, que é do tipo sanduíche, com camadas de fibra de vidro com uma camada de espuma no centro. A asa foi fechada nas pontas, onde foram colocadas nervuras. No total, são 13 regiões.

Todos os parâmetros de laminação dos elementos foram definidos parametricamente no modelo. São eles, as *variáveis de projeto* (VP), que serão modificados pelo AG até que sejam

encontrados seus valores ótimos. A relação entre esses parâmetros e os utilizados pelo AG serão detalhados no item 5.4.1.

FIGURA 5.3 - Modelo da asa em elementos finitos: Vista do extradorso.

FIGURA 5.4 - Modelo da asa em elementos finitos: Vista do intradorso.

FIGURA 5.5 - Modelo da asa em elementos finitos: Vista interna (longarina e nervuras).

5.2.1 Propriedades dos materiais do modelo

Na TABELA 5.5 estão listadas as propriedades mecânicas dos laminados utilizados no modelamento da asa, obtidas de PETERS (1998).

TABELA 5.5 - Propriedades dos laminados utilizados no modelamento da asa.

Propriedade	S2-glass / epóxi(60%) unidirecional	E-glass / epóxi(60%) bidirecional	Carbono / epóxi(62%) unidirecional	CONTICELL (espuma)
E_X (MPa)	51000	15900	172000	10,3
E_Y (MPa)	17000	15900	10000	10,3
E_Z (MPa)	17000	8700	10000	10,3
G_{XY} (MPa)	7000	4100	7000	4,1
G_{YZ} (MPa)	7000	2900	4000	4,1
G_{XZ} (MPa)	7000	2900	7000	4,1
ρ (kg/m ³)	1980,0	2100,0	1600,0	35
ν_{xy}	0,25	0,20	0,33	0,25
ν_{yz}	0,32	0,28	0,40	0,25
ν_{xz}	0,25	0,28	0,33	0,25
σ_{xt}^f (MPa)	1779	228	3241	0,250
σ_{xc}^f (MPa)	-641	-165	-1724	0,250
σ_{yt}^f (MPa)	58	228	69	0,250
σ_{yc}^f (MPa)	-186	-165	-159	0,250
σ_{zt}^f (MPa)	58	-	69	0,250
σ_{zc}^f (MPa)	-186	-	-159	0,250
σ_{xy}^f (MPa)	75	50	97	0,250

5.3 Carregamento aerodinâmico da asa

5.3.1 Condição de voo limite

Para fins de dimensionamento de um componente de uma aeronave é necessário que se determine o carregamento máximo a que o componente é submetido. Normalmente é necessário analisar uma enorme quantidade de casos de voo limites que acontecessem dentro do envelope de voo, baseados em dados experimentais e analíticos, em conformidade com procedimentos, métodos e requisitos definidos por normas. Além disso, o carregamento aerodinâmico é responsável por apenas parte dos esforços a que a estrutura é submetida. Uma análise completa deve levar em conta as cargas de inércia da estrutura em função da resposta da aeronave à manobra ou rajada de vento. Como uma análise desse tipo foge ao escopo deste trabalho, para simplificar será considerada apenas uma situação em que a asa atinja o seu CL máximo na velocidade de cruzeiro, o que poderia ocorrer devido a uma rajada de vento ou arfagem brusca. Nesse caso de carregamento limite, o fator de carga produzido é de $N_z = 2,0$, obtido pela equação abaixo. Os parâmetros do caso escolhido estão mostrados na TABELA 5.6.

$$N_z = \frac{CL \rho \cdot \frac{V^2}{2} \cdot A \cdot g}{massa} \quad (5.1)$$

TABELA 5.6 - Parâmetros de voo no caso limite.

Parâmetro	Valor
CL máximo	2,3
EAS(m/s)	50
Mach	0,2
Peso(kgf)	723,43
N_z	2,0

5.3.2 Distribuição do carregamento aerodinâmico

Para a determinação da distribuição de pressão ao longo da corda foi utilizado o software de CFD XFOIL 6.94. Ele considera que o escoamento seja subsônico, viscoso, bidimensional, e é baseado em métodos de painéis de ordem superior combinado com o código ISSES - ver DRELA (2001) - que é viscoso. Foram obtidas as distribuições para os dois perfis citados na seção 5.1.1, considerando para a simulação um número de Re de $5,0 \times 10^6$, e Mach de

0,3. Vários Cl 's, próximos do $Cl_{\text{máx}}$, foram simulados. Os resultados do perfil escolhido estão apresentados na FIGURA 5.6.

FIGURA 5.6 - Distribuição de C_p para vários Cl 's no perfil Wortmann.

FIGURA 5.7 - Aproximação da distribuição de C_p ao longo do extradorso por um polinômio para o perfil Wortmann $Cl = 2,33$ $\alpha = 11,5^\circ$.

A distribuição de C_p ao longo da corda, para o $Cl_{\text{máx}}$ ($\alpha = 11,5^\circ$, $Cl = 2,33$), foi então aproximada por um polinômio para o extradorso e por uma reta para o intradorso, conforme a FIGURA 5.7. As equações são:

$$C_{p_{extradorso}} = 90,068(x/c)^5 - 208,94(x/c)^4 + 148,8(x/c)^3 - 26,423(x/c)^2 - 0,4328(x/c) - 3,0739 \quad (5.2)$$

$$C_{p_{intradorso}} = -0,3(x/c) - 0,8 \quad (5.3)$$

Ao longo da envergadura, o carregamento aerodinâmico numa asa de grande alongamento é quase elíptico. Segundo STINTON (1983), um modo semi-empírico de determiná-lo é o método de aproximação de Schrenk. Considerando uma asa sem torção e sem enflechamento, a forma da distribuição ao longo da envergadura é dada pela média entre a distribuição elíptica e a distribuição da corda. Para uma asa trapezoidal, temos que a corda em função de y é dada por:

$$C(y) = Cr \left[1 - \frac{2 \cdot y}{b} (1 - \lambda) \right] \quad (5.4)$$

E a distribuição elíptica de Cl é dada por:

$$Cl_{elip}(y) = \frac{4 \cdot A}{\pi \cdot b} \sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot y}{b} \right)^2} \quad (5.5)$$

Onde A é a área em planta da asa, dada por:

$$A = \frac{b}{2} Cr (1 + \lambda) \quad (5.6)$$

E o afilamento da asa é dado por $\lambda = (C_p / C_R)$. Então:

$$Sck(y) = \frac{C(y) + Cl_{elip}(y)}{2} \quad (5.7)$$

Onde $Sck(y)$ é a distribuição de Schrenk ao longo da envergadura. Essa função representa apenas a forma da distribuição. Para se obter a distribuição de Cl ou C_n ao longo da envergadura para um dado CL , encontra-se a razão entre o CL e a integral da distribuição de Schrenk, que multiplicando a função de Schrenk dá a distribuição desejada. Segue a referida equação:

$$C_n(y) = \frac{CL \cdot Sck(y)}{\int_0^{b/2} Sck(y) dy} \quad (5.8)$$

A distribuição de pressão sobre os elementos do modelo de EF foi então gerada obedecendo às equações aproximadas da distribuição ao longo da corda e da envergadura, e

aplicadas no centro de cada elemento. O elemento usado assume que a pressão é constante sobre o mesmo. A distribuição de pressão resultante sobre a malha é mostrada na FIGURA 5.8.

FIGURA 5.8 - distribuição de pressão sobre a malha no extradorso da asa, em N/m^2 .

5.4 Implementação da rotina de otimização

A maioria dos AGs são variações do *Algoritmo Genético Simples* (AGS) proposto por GOLDBERG (1989), já mostrado na FIGURA 4.2. Ele será usado como base para o AG.

O AGS usa populações não sobrepostas de cromossomos, cruzamento, reprodução e mutação, e seleção por roda de roleta.

As principais modificações em relação ao AGS são a introdução do operador inversão e do operador elitismo, esse último tendo introduzido um grande aumento da eficiência do AG e da codificação de multiparâmetros. Também foi introduzido um operador que evita que cromossomos iguais se repitam na nova geração, semelhante ao compartilhamento citado na seção 4.3.1. Outra diferença é que a aptidão é calculada fora do AG, pelo Ansys®. Toda a interação entre o AG e o Ansys® foi automatizada, funcionando o AG como uma sub-rotina chamada por uma *macro* executada pelo Ansys®. Na FIGURA 5.11 vê-se o fluxograma completo do AG aqui implementado.

5.4.1 Variáveis de projeto e decodificação do cromossomo

No modelo da asa são definidos conjuntos de elementos, ou regiões como descrito no início do capítulo 5.2 (longarina, ponta da asa, etc), cada um com um determinado conjunto de características. As informações sobre as propriedades do modelo sendo executado pelo Ansys® que serão trocadas entre ele e o AG são: n° de camadas, espessura e orientação de cada camada de cada conjunto de elementos, além do volume total e do valor do máximo critério de falha que

ocorre no modelo. Todos esses dados são armazenados em cromossomos, descritos na seção 4.2.3.

Como também já descrito na seção 4.2.3, o ideal é utilizar um alfabeto que seja o menor possível que represente todas as possibilidades, e que não sobre combinações que não tenham significado. Isso facilita a identificação dos **tijolos**, padrões de similaridade entre os cromossomos, que por sua vez facilitam a convergência do algoritmo. Aqui se optou pelo alfabeto binário, que já é o utilizado no AGS e é o que permite o maior número de esquemas por bit de informação.

Alguns parâmetros, como espessura da mesa da longarina e a orientação, não são discretos. Eles precisam ser discretizados antes de serem decodificados.

A TABELA 5.7 mostra todos os tipos de variáveis de projeto do modelo, e quantos bits cada um ocupa em cada cromossomo.

TABELA 5.7 – Variáveis de projeto.

VP	nVP	Bits	Comprimento total de bits
Orientações (Θ)	28	3	84
Espessuras das camadas da casca	28	3	84
Θ da alma da longarina	1	3	3
Espessura da alma da longarina	1	3	3
Espessuras das mesas da longarina	2	5	10
Número de camadas	3	2	6
TOTAL	63		190

Para minimizar o número de variáveis de projeto e conseqüentemente o tempo de otimização, o modelo da asa já foi parametrizado levando-se em conta a distribuição de esforços presumível. Assim, na raiz o número de camadas mínimo e possível é maior do que na ponta da asa. Na TABELA 5.8 estão listados os números de camadas possíveis em cada região (*Set*), e na TABELA 5.9 e na TABELA 5.10 estão listadas as espessuras e orientações possíveis de todas as VP. As orientações das camadas foram discretizadas, sendo múltiplos de 15° , ou seja, (0/15/30/45/60/75/90). As espessuras são aquelas correspondentes aos tecidos disponíveis comercialmente.

TABELA 5.8 – Variáveis parametrizadas.

Região e Nome	N. de camadas (min, máx)
“Set 1” Extra_raiz	5, 11
“Set 2” Extra_meio	5, 11
“Set 3” Extra_ponta	5, 9
“Set 4” Intra_raiz	5, 11

Região e Nome	N. de camadas (min, máx)
“Set 5” Intra_meio	5, 11
“Set 6” Intra_ponta	5, 9
“Set 7” Mesa_sup	1
“Set 8” Alma	2
“Set 9” Mesa_inf	1
“Set 10” Mesa inf longarina raiz (reforço)	1
“Set 11” Bordo de ataque até longarina raiz (reforço)	5, 11
“Set 12” Bordo de ataque meio (reforço não otimizado)	1
“Set 13” Nervuras	2

TABELA 5.9 – Espessuras e orientação de cada região (VP’s de 1 a 58)

Binário	Decimal	Espessura (mm)	Binário	Decimal	θ
(pra VP’s de 1 a 58)					
000	0	0,20	000	0	0
001	1	0,25	001	1	80
010	2	0,30	010	2	22
011	3	0,35	011	3	34
100	4	0,40	100	4	45
101	5	0,45	101	5	60
110	6	0,50	110	6	75
111	7	0,55	111	7	90

O “Set 10” do modelo possui orientação fixa, e a sua espessura é uma função da espessura da mesa inferior da longarina, portanto, não é otimizada. O “Set 12” constitui-se num reforço introduzido depois das primeiras corridas de teste, numa região de concentração de tensão, e seus parâmetros não são otimizados, por ser ela uma região pequena, assim como o “Set 10”. A alma da longarina é constituída de um sanduíche com apenas uma camada de tecido bidirecional em cada lado da espuma. Todas as demais camadas do laminado são de tecido unidirecional.

TABELA 5.10 – Espessuras das mesas da longarina

Binário	Decimal	Espessura mesa superior	Espessura mesa inferior
00000	1	0,5	0,5
00001	2	1,0	1,0
00010	3	1,5	1,5

00011	4	2,0	2,0
00100	5	2,5	2,5
00101	6	3,0	3,0
00110	7	3,5	3,5
00111	8	4,0	4,0
01000	9	4,5	4,5
01001	10	5,0	5,0
01010	11	5,5	5,5
01011	12	6,0	6,0
01100	13	6,5	6,5
01101	14	7,0	7,0
01110	15	7,5	7,5
01111	16	5,0	5,0
10000	17	8,0	8,0
10001	18	9,0	9,0
10010	19	10,0	10,0
10011	20	12,0	12,0
10100	21	14,0	14,0
10101	22	16,0	16,0
10110	23	18,0	18,0
10111	24	20,0	20,0
11000	25	23,0	23,0
11001	26	26,0	26,0
11010	27	29,0	29,0
11011	28	32,0	32,0
11100	29	35,0	35,0
11110	30	38,0	38,0
11111	31	41,0	41,0

Na TABELA 5.11 vê-se a codificação do número de camadas de cada uma das três regiões em que a semi-asa foi dividida.

TABELA 5.11 – Codificação do número de camadas

Binário	Decimal	Número de camadas
00	0	5
01	1	7
10	2	9
11	3	11

Na seção 5.4.5 é exibido um cromossomo completo e na TABELA 5.12 sua descrição através de um exemplo.

5.4.2 Aptidão do modelo da asa

A função que queremos minimizar é a massa da asa. Como é muito mais simples obter o volume do modelo do que a massa no Ansys®, e a massa nesse caso é diretamente proporcional ao volume, utilizaremos o volume como função objetivo. Assim, a aptidão A (ver 4.2.2) será definida como um volume máximo de referência $f(x_{\max})$ na eq. (5.9), menos o volume do indivíduo ($f(x)$), o que leva a uma aptidão tanto maior quanto menor o volume e, portanto a massa. Existe entretanto uma restrição à diminuição da massa, ou seja, da espessura do laminado, que deve ser o suficiente para resistir às solicitações estruturais. Essa restrição é avaliada pelo critério de falha (CF), no caso o critério de Tsai-Wu, cuja formulação já foi abordada na seção 3.2. O critério de falha é assim subtraído da aptidão, segundo as fórmulas abaixo.

Se $CF < 0,9$ então:

$$A = f(x_{\max}) - f(x) + \frac{CF}{\beta} \quad (5.9)$$

Onde na eq. acima, β é um fator usado apenas para ajustar a variação da aptidão A em relação ao CF à uma razão apropriada. A rigor não é estritamente necessário que haja variação, mas é benéfico manter uma pequena variação para que o AG favoreça indivíduos cujo volume seja muito próximo, mas tenha diferentes CF. Essa razão não pode ser muito grande para não induzir o AG a superdimensionar a asa, ou seja, a derivada da **Aptidão** em relação ao CF deve ser menor do que a derivada da **Aptidão** em relação à $f(x)$ (volume).

Por outro lado, se o CF estiver acima da margem de segurança estabelecida (10%), ele não nos serve. Mas como já discutido na seção 4.2.2.1, é apropriado estabelecer uma penalidade a esses indivíduos ao invés de simplesmente descartá-los. Assim a eq. (5.9) assume a forma abaixo:

Se $CF > 0,9$ então:

$$A = 0,85 \cdot f(x_{\max}) - f(x) + \frac{CF - 0,9}{\gamma} \quad (5.10)$$

O fator γ usado nesse caso é diferente do β , produzindo uma derivada maior, para reforçar o efeito de penalidade.

Finalmente, por restrição do AG, não podemos ter aptidão negativa. Assim toda aptidão negativa encontrada é transformada para Aptidão = 0,0.

Na FIGURA 5.9 vê-se a variação da Aptidão em função do CF para três diferentes volumes.

FIGURA 5.9 – Variação da aptidão com o critério de falha para vários valores da função objetivo ($\beta=1000$, $\gamma=40$, $f(x_{maz})=0,7$).

5.4.2.1 Escalonamento da aptidão

Com já discutido na seção 4.2.2.2, é interessante escalonar a aptidão para se obter uma melhor distribuição da mesma entre os indivíduos da população. Ela previne a dominância de poucos indivíduos cuja aptidão seja muito acima da média no início da evolução, e quando a evolução do AG já está mais madura, com um número razoável de gerações, propicia uma competição mais saudável entre indivíduos muito parecidos. Isso pode ser feito de várias formas. Uma bem simples é o escalonamento linear. Isso é feito estabelecendo-se a seguinte relação entre a aptidão e a aptidão escalada:

$$A'(x) = C.A(x) + D \quad (5.11)$$

onde A' é a aptidão escalada segundo a distribuição máxima e mínima da aptidão dentro de uma população. C e D são coeficientes determinados segundo as eq. exibidas adiante. O escalonamento é feito de tal forma que $A_{med} = A'_{med}$, para que quando da subsequente seleção dos indivíduos, o indivíduo com aptidão média continue com a mesma probabilidade de descendentes na nova geração. Caso todos indivíduos tenham aptidão positiva, o que é verificado por:

$$A_{min} > \frac{K.A_{med} - A_{max}}{K - 1} \quad (5.12)$$

então:

$$\Delta = A_{\max} - A_{\text{med}} \quad (5.13)$$

$$C = (K - 1) \cdot \frac{A_{\text{med}}}{\Delta} \quad (5.14)$$

$$D = A_{\text{med}} \cdot \frac{A_{\max} - K \cdot A_{\text{med}}}{\Delta} \quad (5.15)$$

Caso algum ou mais indivíduos tenham aptidão negativa, se escala a aptidão tanto quanto possível, usando as seguintes constantes A e B:

$$\Delta = A_{\text{med}} - A_{\min} \quad (5.16)$$

$$C = \frac{A_{\text{med}}}{\Delta} \quad (5.17)$$

$$D = \frac{-A_{\min} \cdot A_{\text{med}}}{\Delta} \quad (5.18)$$

Caso $\Delta = 0$, faz-se $C=1$ e $D=1$.

“**K**” é um fator múltiplo da aptidão, que determina qual o peso da descendência dos melhores indivíduos na nova geração. Quanto maior esse valor, maior tenderá a ser a aptidão escalada dos indivíduos melhores em relação aos piores, e portanto eles terão maior probabilidade de serem escolhidos para reprodução e cruzamento. Normalmente utiliza-se um valor para **K** entre 1,2 e 2 para populações de 50 a 100 indivíduos, segundo GOLDBERG (1989). Um fator **K** muito alto pode levar a uma convergência prematura a um mínimo local, pois descarta prematuramente indivíduos com aptidão menor.

Na FIGURA 5.10 vê-se uma comparação entre a distribuição de aptidão antes e depois de ser escalada, obtida de uma geração qualquer com uma população de 8 indivíduos. Pode-se observar na figura que a aptidão do sexto indivíduo foi escalada para zero.

FIGURA 5.10 – Comparação entre a distribuição de aptidão antes e depois de ser escalada.

5.4.3 Tamanho da População

O tamanho da população afeta o desempenho global e a eficiência dos algoritmos genéticos, mas populações numerosas não são necessariamente melhores, isto é, não melhoram a velocidade de convergência de uma solução.

Com uma população pequena corre-se o risco de ter uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Uma grande população geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais ao invés de globais. No entanto, para se trabalhar com populações maiores, são necessários maiores recursos computacionais, ou que o algoritmo trabalhe por um período de tempo maior. Por outro lado, uma população menor permite um número maior de gerações para um mesmo tempo computacional. Aqui foram feitos testes com populações variando de 6 a 16 indivíduos. O uso de populações maiores se mostrou inviável pelo tempo de processamento necessário para o cálculo do modelo de EF. Em 5.5.1 são mostrados os efeitos de sua variação.

5.4.4 Critérios de parada

O critério de parada estabelecido foi o número de laços a serem rodados pelo AG. Ou seja, o número de execuções do Ansys®. Esse número é o produto do número de gerações do AG pelo tamanho da população, e assim estabeleceu-se um tempo de processamento praticamente idêntico entre as várias otimizações realizadas com diferentes parâmetros.

5.4.5 Integração com o Ansys®

Como já descrito brevemente no início da seção 5.4, o AG funciona como um programa externo chamado por uma *macro* do Ansys®, antes e depois de cada cálculo do CF e volume ($f(x)$) de cada indivíduo. A troca de dados entre ambos se dá através de um arquivo texto “AGPAR.txt”, lido tanto pelo AG quanto pelo Ansys®. Nesse arquivo, os parâmetros estão dispostos conforme abaixo:

$$[\theta_{11}, \delta_{11}, \theta_{12}, \delta_{12}, \theta_{13}, \delta_{13}, \dots, \theta_{21}, \delta_{21}, \theta_{22}, \delta_{22}, \theta_{23}, \delta_{23}, \theta_{24}, \delta_{24}, \dots, nc_1, nc_2, nc_3, CF, f(x)]$$

Onde θ é a orientação do tecido, δ é a espessura da camada, “nc” o número de camadas e os índices ij são componente e camada, respectivamente. Nele o AG salva os parâmetros do indivíduo decodificados, e depois de feita a análise do mesmo pelo Ansys®, lê a $f(x)$ e o CF do indivíduo e os guarda em outros arquivos auxiliares, onde ficam guardados os dados de todos os indivíduos da população.

A seguir, na TABELA 5.12 vê-se através de um exemplo a descrição detalhada dos cromossomos.

TABELA 5.12 – Descrição do cromossomo (exemplo).

VP	Descrição	Binário	Decodificado	VP	Descrição	Binário	Decodificado
1	θ_{11}	001	80	34	δ_{43}	001	0,25
2	δ_{11}	010	0,30	35	θ_{44}	001	80
3	θ_{12}	101	60	36	δ_{44}	011	0,35
4	δ_{12}	001	0,25	37	θ_{45}	100	45
5	θ_{13}	111	90	38	δ_{45}	100	0,40
6	δ_{13}	100	0,40	39	θ_{51}	101	60
7	θ_{14}	001	80	40	δ_{51}	100	0,40
8	δ_{14}	000	0,20	41	θ_{52}	111	90
9	θ_{15}	000	0	42	δ_{52}	110	0,50
10	δ_{15}	110	0,50	43	θ_{53}	010	22
11	θ_{21}	110	75	44	δ_{53}	011	0,35
12	δ_{21}	101	0,45	45	θ_{54}	111	90
13	θ_{22}	101	60	46	δ_{54}	001	0,25
14	δ_{22}	011	0,35	47	θ_{55}	011	34
15	θ_{23}	000	0	48	δ_{55}	001	0,25
16	δ_{23}	001	0,25	49	θ_{61}	000	0
17	θ_{24}	111	90	50	δ_{61}	100	0,40
18	δ_{24}	011	0,35	51	θ_{62}	101	60
19	θ_{25}	100	45	52	δ_{62}	110	0,50
20	δ_{25}	001	0,25	53	θ_{63}	110	75
21	θ_{31}	110	75	54	δ_{63}	011	0,35
22	δ_{31}	001	0,25	55	θ_{64}	100	45
23	θ_{32}	010	22	56	δ_{64}	100	0,40

VP	Descrição	Binário	Decodificado	VP	Descrição	Binário	Decodificado
24	δ_{32}	110	0,50	57	θ_{mesa}	100	45
25	θ_{33}	111	90	58	δ_{al}	011	0,35
26	δ_{33}	100	0,40	59	δ_{msup}	00110	1,5
27	θ_{34}	101	60	60	δ_{minf}	00111	4,0
28	δ_{34}	011	0,35	61	N_{cam_1}	01	7
29	θ_{41}	110	75	62	N_{cam_2}	10	9
30	δ_{41}	001	0,25	63	N_{cam_3}	01	7
31	θ_{42}	110	75	VE	CFmax	-	-
32	δ_{42}	100	0,40	$f(x)$	volume	-	-
33	θ_{43}	000	0				

A FIGURA 5.11 mostra o fluxograma detalhado de todos os passos do AG implementado.

5.4.5.1 Macro do Ansys®

Passos:

- No Ansys®, em *File>Read input from*: “melo-asafinal-entrada-270403.txt”. Esse arquivo contém o modelo parametrizado, com o carregamento;
- Rodar “iniciapar.exe”, para inicializar os parâmetros dos arquivos auxiliares;
- Salvar no diretório de trabalho o AG executável, compilado com os devidos parâmetros de mutação, cruzamento, etc;
- Editar o arquivo contendo a macro de otimização do Ansys®, ajustando o nome do diretório de trabalho e o número de *loops*;
- No Ansys®, em *File>Read input from*: ler a macro “macro-OPT-modelo-final.txt” editada conforme acima. Isso iniciará os *loops*.

FIGURA 5.11 – Fluxograma completo do AG implementado.

5.5 Resultados

Em seu trabalho ORTIZ et al. (2004) afirmam que determinar os operadores e parâmetros apropriados é fundamental para o bom desempenho da otimização com AG. As escolhas apropriadas são específicas de cada problema. Um problema que é altamente não linear e altamente restringido pode beneficiar-se de uma configuração de parâmetros que promovam uma maior exploração e menor convergência. Isso pode melhorar a probabilidade de encontrar uma solução aceitável e minimizar as chances de convergência a um mínimo local. Por outro lado, um problema que não seja tão complexo deve utilizar parâmetros ajustados de forma a promover uma convergência mais rápida e permitir ao AG chegar rapidamente à melhor solução.

Seguindo o objetivo a que se propôs este trabalho, foram analisados os efeitos da variação de diversos parâmetros no desempenho do AG. Como são muitas as variáveis a serem estudadas, foram feitas poucas variações de cada variável. Mesmo assim já é possível extrair dessas análises uma indicação das tendências que elas produzem nos resultados. Em cada comparação feita, todos os outros parâmetros são mantidos constantes.

São exibidos sempre dois gráficos, um com o respectivo parâmetro versus o número da corrida do Ansys®, mostrando todos os indivíduos, e o outro gráfico mostrando apenas o melhor indivíduo de cada geração, salvo onde indicado de outra forma. Por corrida entenda-se análise de um indivíduo pelo Ansys®. Essa maneira permite comparar a evolução da otimização ao longo do tempo de otimizações com diferentes tamanhos de população. A geração num dado ponto é igual ao número da corrida dividida pelo tamanho da população.

O gráfico de maior interesse sempre será o que exibe apenas os melhores indivíduos de cada geração. Também foram inseridos em alguns desses gráficos curvas logarítmicas de tendência, para uma melhor comparação entre os diferentes valores dos parâmetros.

O que se pode perceber em relação a todos os parâmetros é que o AG já logo nas primeiras gerações produz indivíduos com aptidão próxima da ótima. E que depois de um certo número de gerações ele praticamente estabiliza. Isso pode indicar em alguns casos uma convergência prematura a um mínimo local. Uma análise mais profunda desse comportamento provavelmente poderia sugerir que seria interessante a variação de alguns parâmetros durante a evolução do AG.

A maioria das análises foi feita num computador Pentium 166 MHz, com 128 Mb de memória RAM. Para cada análise, cujo limite de corridas definido foi de 320, o tempo médio de processamento foi de 14 horas.

5.5.1 Efeito do tamanho da população

Para o estudo da influência do tamanho da população no desempenho do AG, experimentou-se populações de 6, 8 e 16 indivíduos. Na FIGURA 5.12 vê-se que um tamanho de população de 16 indivíduos leva a uma convergência da aptidão média muito mais lenta do que as populações de 6 e 8 indivíduos. Isso se deve a maior dispersão entre cada geração e ao fato de que foram produzidas menos gerações para um mesmo número de corridas.

FIGURA 5.12 – Efeito do tamanho da população.

Na FIGURA 5.13 vê-se que uma população de 8 indivíduos converge mais rapidamente para um valor ótimo do que as outras duas, embora no início tenha apresentado uma razão de convergência mais lenta.

FIGURA 5.13 – Efeito do tamanho da população considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração.

5.5.2 Efeito da equação de aptidão

Aqui será analisada a sensibilidade da aptidão, discutida na seção 0, em relação à variação de seus parâmetros e da definição de fator de penalidade.

5.5.2.1 Efeito do $f(x_{max})$

Como o parâmetro $f(x_{max})$ afeta a aptidão, não é possível comparar-se o efeito da variação do mesmo analisando a aptidão. Assim, no gráfico exibido na FIGURA 5.14 é exibida a $f(x)$ versus n , da corrida para duas definições de $f(x_{max})$, 0,7 e 0,9 respectivamente. Apenas os indivíduos que satisfazem o CF_{max} são exibidos. Pode-se ver que com uma $f(x_{max})$ de 0,7 a convergência é muito mais rápida do que para 0,9. Isso é esperado pela maneira como é definida a aptidão. Quanto mais próximo o valor do parâmetro $f(x_{max})$ for do efetivo máximo valor que a $f(x)$ pode atingir, melhor será o comportamento da aptidão.

FIGURA 5.14 – Efeito da $f(x_{max})$ na $f(x)$.

5.5.2.2 Efeito do β da penalidade

O β da penalidade define a derivada da aptidão em relação ao CF, quando o CF é menor do que o $CF_{m\acute{a}x}$. Quanto maior o β , menor a influência do CF na aptidão. Foram testados fatores β de 100 e 1000. Nos gráficos exibidos nas FIGURA 5.15 e FIGURA 5.16, vê-se que um fator β de 1000 melhora a convergência do AG em relação ao uso de um β de 100, o que está de acordo com o já exposto na seção 0.

FIGURA 5.15 – Efeito do β da penalidade. FIGURA 5.16 – Efeito do β considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração.

5.5.2.3 Efeito do γ da penalidade

O γ da penalidade define a derivada da aptidão em relação ao CF, quando o CF é maior do que o $CF_{\max}$. Quanto maior o γ , menor a influência do CF na aptidão. Foram testados fatores

β de 30 e 40. No gráfico exibido na FIGURA 5.17 vê-se que um fator de 40 leva vantagem sobre o de 30, considerando a aptidão média. Já observando o gráfico exibido na FIGURA 5.18, vê-se que o γ tem pequena influência sobre a convergência do AG, considerando os melhores indivíduos de cada geração. De qualquer modo, voltando a FIGURA 5.17, também é possível observar que um fator maior favorece uma maior dispersão dos indivíduos, pois mais indivíduos que violam o $CF_{\max}$ tendem a sobreviver ao longo das gerações.

FIGURA 5.17 – Efeito do γ da penalidade.

FIGURA 5.18 – Efeito do γ considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração.

5.5.3 Efeito da probabilidade de cruzamento

Foram experimentadas três diferentes probabilidades de cruzamento, 50%, 70% e 90%. No gráfico exibido na FIGURA 5.19 é possível observar que uma probabilidade de cruzamento de 70% é a que leva a uma convergência mais rápida à aptidão ótima, considerando a aptidão média da população. Uma probabilidade de 50% é a que apresenta uma convergência mais lenta. Esse efeito se repete no gráfico exibido na FIGURA 5.20, com a diferença de que considerando apenas os melhores indivíduos de cada geração, uma probabilidade de cruzamento de 90% conduz a uma convergência um pouco mais rápida do que a de 70%, mas a de 50% continua sendo a de convergência mais lenta. Isso está de acordo com os fundamentos teóricos do AG, que prediz que o cruzamento é o operador mais importante para os Algoritmos Genéticos.

FIGURA 5.19 – Efeito da probabilidade de cruzamento.

FIGURA 5.20 – Efeito da probabilidade de cruzamento considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração.

5.5.4 Efeito da probabilidade de mutação

Foram testados os valores de 1%, 3,33% e 6,66% para a probabilidade de mutação. No gráfico exibido na FIGURA 5.21, onde aparecem todos os indivíduos, é interessante notar que a aptidão média parece convergir mais rapidamente para um ótimo quando a probabilidade de mutação é mais baixa. Isso provavelmente se deve ao fato de a mutação introduzir uma grande dispersão e variabilidade na população. Como pode ser visto no gráfico exibido na FIGURA 5.22, o valor ótimo da probabilidade de mutação é em torno de 3%, entre os valores testados, o que está de acordo com o sugerido por GOLDEBERG (1989). Um valor maior traz uma dispersão excessiva da população, desacelerando a convergência ao ótimo, provavelmente porque destrói os esquemas.

O valor para os quais a aptidão converge nos gráficos abaixo é diferente do valor dos gráficos anteriores, pois nesses casos a fórmula da aptidão utilizada possuía parâmetros diferentes.

FIGURA 5.21 – Efeito da probabilidade de mutação.

FIGURA 5.22 – Efeito da probabilidade de mutação considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração

5.5.5 Efeito do Operador inversão

O operador inversão aqui utilizado, inverte o cromossomo. Foram testadas probabilidades de inversão de 0%, 5% e 10%. Analisando o gráfico exibido na FIGURA 5.24 nota-se que esse operador possui pouco efeito sobre a convergência da aptidão. Na FIGURA 5.23 o caso em que a probabilidade de inversão é de 5,0 %, a aptidão média é bem menor do que nos casos com probabilidade de inversão de 0,0% e de 10%. Provavelmente, esse operador tem um efeito parecido ao da mutação sobre a população, em que uma pequena probabilidade de variação amplia o espaço de busca, mas uma probabilidade excessiva destrói esquemas importantes. De qualquer forma, ele não parece ser relevante no caso aqui estudado.

FIGURA 5.23 – Efeito da probabilidade de inversão.

FIGURA 5.24 – Efeito da probabilidade de inversão considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração.

5.5.6 Efeito do Elitismo

Como discutido na seção 4.2.4.4, o elitismo garante que sempre haja uma ou n cópias dos melhores indivíduos de uma geração na seguinte. No AG aqui desenvolvido, devido ao pequeno tamanho das populações utilizadas, foi definido que apenas uma cópia do melhor indivíduo fosse garantida nas novas gerações.

FIGURA 5.25 – Efeito do elitismo.

No gráfico exibido na FIGURA 5.25 observa-se que a introdução do elitismo faz cair a aptidão média, provavelmente porque ele diminui a dispersão das características dos indivíduos, pois numa população de 8 indivíduos, por exemplo, um indivíduo a menos sujeito às operações de cruzamento e mutação representa 12,5% a menos de possibilidades de novos indivíduos. Isso pode ser melhor verificado no gráfico exibido na FIGURA 5.27, onde são exibidas as aptidões médias, além das máximas. Ali também, assim como no gráfico exibido na FIGURA 5.26, pode-se notar que com o elitismo o AG converge mais rapidamente para um ótimo. Para ressaltar a importância do efeito elitismo, é exibido na FIGURA 5.28 a evolução da $f(x)$ versus o número da corrida. Com elitismo, na 21ª geração, na 163ª corrida, o AG já convergiu para um valor de $f(x) = 0,030$. Sem elitismo, nessa mesma geração, a $f(x)$ é de 0,0382, o que dá uma diferença de 27% em relação à 0,030. As curvas exibidas na FIGURA 5.28 mostram apenas as gerações com indivíduos cuja CF é menor do que 0,9, o que ocorre apenas a partir da 11ª geração. Assim, para um melhor entendimento das tendências iniciais dos indivíduos, foram acrescentados ao gráfico todos os indivíduos, como pontos, sem restrição de CF, até a 10ª geração.

FIGURA 5.26 – Efeito do elitismo considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração.

FIGURA 5.27 – Efeito do elitismo na Aptidão, comparação das médias e máximos de cada geração.

FIGURA 5.28 – Efeito do elitismo na $f(x)$, considerando apenas o melhor indivíduo de cada geração.

5.5.7 Efeito do compartilhamento

O compartilhamento introduzido no AG aqui desenvolvido objetiva evitar que mais de uma cópia idêntica de um indivíduo passe para a geração seguinte. Um indivíduo repetido ocupa espaço e tempo de processamento desnecessário, portanto desperdiça oportunidades de busca, sobretudo com o pequeno tamanho das populações aqui utilizadas.

Entretanto, foi observado que mesmo quando a função compartilhamento não é ativada, são raras as gerações onde existam indivíduos repetidos. Não obstante, AGs com compartilhamento convergem para valores da $f(x)$ bem melhores do que sem compartilhamento, como pode ser visto no gráfico exibido na FIGURA 5.29 e FIGURA 5.30. Na FIGURA 5.29 observa-se que sem compartilhamento, o AG tende a convergir mais prematuramente a um mínimo local. Também, para fins de comparação, é mostrada uma curva de um AG sem escalonamento, pois o compartilhamento pode causar um efeito razoável nas populações com aptidão escaladas. Como o escalonamento aumenta a variância da aptidão, e faz com que os melhores indivíduos tendam a dominar, sem o compartilhamento eles poderiam tender excessivamente a sofrer cópias indesejáveis. Na FIGURA 5.30, Assim como na FIGURA 5.28, não são mostrados os pontos que não cumprem o $CF_{\text{máx}}$, motivo pelo qual a última curva parece ter os primeiros pontos faltando.

FIGURA 5.29 – Efeito do compartilhamento na aptidão ao longo da evolução.

FIGURA 5.30 – Efeito do compartilhamento na $f(x)$.

5.5.8 Efeito do Escalonamento

Como discutido no item 5.4.2.1, o escalonamento visa re-distribuir a aptidão dos indivíduos. Foram testados fatores K de dois e de quatro, e um AG sem escalonamento.

No gráfico exibido na FIGURA 5.31, observa-se que o AG com $K = 4$ tende a convergir prematuramente, principalmente se não estiver ativo o operador compartilhamento. Na FIGURA 5.30 exibida anteriormente, ao contrário do esperado, vê-se que, embora a sua convergência seja bastante lenta, o AG sem escalonamento acaba sendo mais eficiente na minimização da $f(x)$.

FIGURA 5.31 – Efeito do escalonamento na aptidão.

Para compreender melhor o efeito do escalonamento, são exibidas a seguir as distribuições da aptidão para a 1ª e para a 35ª geração do AG, considerando duas configurações de parâmetros: $K = 2$ e $K = 4$, ambas com compartilhamento.

FIGURA 5.32 – Distribuição da aptidão na 1ª geração, $K = 4$.

FIGURA 5.33 – Distribuição da aptidão na 35ª geração, $K = 4$.

O que se pode observar claramente na FIGURA 5.32 e FIGURA 5.33, é que o escalonamento no início da evolução da população re-distribui a aptidão, que tinha valores muito próximos, de forma bastante razoável. Já nas gerações mais avançadas, o escalonamento praticamente isola dois indivíduos atribuindo-lhes uma alta aptidão, e torna os demais irrelevantes. Já com $K = 2$, isso ocorre em escala bem menor (FIGURA 5.34 e FIGURA 5.35). nesse caso, apenas dois indivíduos são depreciados.

FIGURA 5.34 – Distribuição da aptidão na 1ª geração, $K = 2$.

FIGURA 5.35 – Distribuição da aptidão na 35ª geração, K = 2.

5.5.9 Parâmetros finais mínimos da otimização com AG

No gráfico exibido na FIGURA 5.36 é mostrada a evolução da $f(x)$ de todos os AGs testados, com seus diferentes parâmetros. Da TABELA 5.13 até a TABELA 5.16 são exibidos parâmetros, estatísticas e resultados de cada um desses AGs. A FIGURA 5.37 exibe a evolução da aptidão de todas os AGs testados. Vale lembrar que nesse gráfico a função aptidão é diferente em alguns casos, assim nem todas as curvas são diretamente comparáveis.

TABELA 5.13 – Índice da tabela de parâmetros e legendas dos gráficos dos AGs testados.

n. AG	TÍTULO (legendas dos gráficos)
1	TAM. POPU = 8; PROB. CRUZ = 0,7; PROB. INVER. = 0,1
2	PROB. CRUZ = 0,9
3	PROB. CRUZ = 0,5
4	TAM. POPU = 6
5	TAM. POPU = 16
6	PROB. INVER. = 0,0
7	PROB. INVER. = 0,05
8	$\alpha = 100$, $\beta = 30$
9	$\alpha = 100$, $\beta = 40$
10	COM ELIT.; COM COMP.; K = 4; $\alpha = 1000$; $\beta = 40$; PROB. MUT. = 0,033
11	PROB. MUT. = 0,066
12	PROB. MUT. = 0,01
13	SEM ELIT., K = 4
14	SEM COMP., K = 4
15	SEM ELIT., K = 2
16	$f(x_{max}) = 0,9$
17	COM COMP.; SEM ESCAL.; COM ELIT.
18	SEM COMP., K = 2

FIGURA 5.36 – Evolução da $f(x)$ de todos os AGs testados.

FIGURA 5.37 – Evolução da aptidão de todos os AGs testados.

TABELA 5.14 – Lista de Parâmetros dos AGs testados.

n. AG	Probab. de cruz.	Probab. de mutação	Probab. de inversão	Tamanho da população	$f(x_{max})$	β	γ	K
1	0,7	0,033	0,1	8	0,65	60	10	4
2	0,9	0,033	0,1	8	0,65	60	10	4
3	0,5	0,033	0,1	8	0,65	60	10	4
4	0,7	0,033	0,1	6	0,65	60	10	4
5	0,7	0,033	0,1	16	0,65	60	10	4
6	0,7	0,033	0	8	0,65	60	10	4
7	0,7	0,033	0,05	8	0,65	60	10	4
8	0,7	0,033	0,1	8	0,7	100	30	4
9	0,65	0,033	0,1	10	0,7	100	40	4
10	0,7	0,033	0,1	8	0,7	1000	40	4
11	0,7	0,066	0,1	8	0,7	1000	40	4
12	0,7	0,01	0,1	8	0,7	1000	40	4
13	0,7	0,033	0,1	8	0,7	1000	40	4
14	0,7	0,033	0,1	8	0,7	1000	40	4
15	0,7	0,033	0,1	8	0,7	1000	40	2
16	0,7	0,033	0,1	8	0,9	1000	40	4
17	0,7	0,033	0,1	8	0,7	1000	40	-
18	0,7	0,033	0,1	8	0,7	1000	40	2

TABELA 5.15 – Estatísticas dos AGs testados.

n. AG	Aptidão máx. inicial	Aptidão média inicial	Soma da aptidão inicial
1	0,4774	0,406	3,251
2	0,4543	0,369	2,948
3	0,4625	0,293	2,344
4	0,4139	0,333	1,997
5	0,4794	0,369	5,907
6	0,467	0,303	2,427
7	0,4646	0,357	2,856
8	0,5164	0,435	3,478
9	0,5535	0,527	5,270
10	0,5444	0,517	4,132
11	0,5551	0,506	4,050
12	0,5469	0,517	4,136
13	0,555	0,516	4,126

n. AG	Aptidão máx. inicial	Aptidão média inicial	Soma da aptidão inicial
14	0,5602	0,522	4,177
15	0,5495	0,515	4,121
16	0,7137	0,684	5,473
17	0,5545	0,530	4,242
18	0,5487	0,516	4,125

TABELA 5.16 – Resultados dos AGs testados.

n. AG	$f(x)$ min. após 160 corridas	$f(x)$ mín. após 320 corridas	Geração em que atingiu o mínimo	CF
1	0,035	0,032	38	0,730
2	0,035	0,034	15	0,844
3	0,034	0,033	29	0,862
4	0,033	0,033	25	0,871
5	0,033	0,030	20	0,917
6	0,034	0,031	35	0,765
7	0,031	0,031	16	0,854
8	0,034	0,031	35	0,890
9	0,033	0,031	27	0,897
10	0,030	0,030	20	0,817
11	0,033	0,032	39	0,874
12	0,056	0,041	38	0,866
13	0,040	0,033	35	0,803
14	0,032	0,031	35	0,881
15	0,000	0,032	21	0,892
16	0,034	0,031	38	0,888
17	0,000	0,028	22	0,895
18	0,031	0,031	39	0,849

Na FIGURA 5.38 é exibido um gráfico de barras, comparando a melhor $f(x)$ obtida em cada um dos AGs testados, depois de 160 corridas. A barra amarela é referente à corrida que alcançou a $f(x)$ mínima (AG n. 10), ou seja, a asa com menor peso, e que não viola o $CF_{\text{máx.}}$. Seus parâmetros estão em negrito na TABELA 5.13. Ainda no gráfico exibido na FIGURA 5.38, pode-se observar que a corrida denominada “SEM ELIT.; K = 2”, assim como a “COM COMP.; SEM ESCAL.(MIN)” possuem uma $f(x) = 0$. A razão é que nessa corrida nenhum indivíduo alcançou um CF satisfatório, pelo menos até a 160ª corrida. Mas no caso dessa última

(AG n. 17), o AG convergiu para um mínimo ainda melhor ($f(x) = 0,0284$) na 182ª corrida (22ª geração).

FIGURA 5.38 – $f(x)$ min. obtida após 160 corridas com os diferentes parâmetros do AG.

Na FIGURA 5.39 são exibidos os mesmos resultados após 320 corridas. Na TABELA 5.17 são listados os parâmetros usados nos AGs que convergiram para as $f(x)$ s mínimas.

TABELA 5.17 – Lista de Parâmetros dos AGs ótimos.

AG n.	$f(x)$ min. após 160 corridas	CF após 160 corridas	$f(x)$ min. após 320 corridas	CF após 320 corridas	Corrida em que atingiu o min.
10	0,0302	0,8305	0,0300	0,8171	163
17	0,0340	>0,9	0,0284	0,8947	182

FIGURA 5.39 – $f(x)$ min. obtida após 320 corridas com diferentes parâmetros do AG.

5.5.10 Distribuição do critério de falha na asa otimizada

A seguir são exibidas algumas figuras com as distribuições do CF de Tsai-Wu na asa resultantes das duas otimizações realizadas que levaram aos menores mínimos da $f(x)$. A primeira é a otimização resultante do AG n. 10, e a segunda a otimização referente ao AG n. 17 (ver TABELA 5.13).

FIGURA 5.40 - Tsai-Wu no extradorso, AG n. 10.

FIGURA 5.41 - Tsai-Wu no intradorso, AG n. 10.

FIGURA 5.42 - Tsai-Wu na longarina e nervuras, AG n. 10.

FIGURA 5.43 - Tsai-Wu no extradorso modelo, AG n. 17.

FIGURA 5.44 - Tsai-Wu no intradorso, AG n. 17.

FIGURA 5.45 - Tsai-Wu na longarina e nervuras, AG n. 17.

Na FIGURA 5.46 é exibida a sequência de laminação num elemento do extradorso da raiz do modelo de EF. No sistema de referência usado, $\theta = 90$ graus significa alinhamento com o sentido da envergadura.

FIGURA 5.46 – Representação da sequência de laminação no extradorso da raiz da asa, AG n. 17.

Analisando as distribuições do CF na asa, pode-se observar que ainda existe uma grande margem para redução de peso na região mais próxima da ponta da asa. Como a otimização resultou em uma asa com o número mínimo de camadas na ponta, e todas as espessuras possíveis foram utilizadas, se fosse disponibilizado ao AG a possibilidade de escolher entre um maior número de tecidos, com diferentes espessuras (mais finas), possivelmente se obteria uma asa ainda mais leve.

5.5.11 Comparação com métodos de otimização do Ansys®

Na FIGURA 5.47 é exibido um gráfico de barras contendo os resultados obtidos para o volume e o critério de falha de Tsai-Wu com os diferentes métodos de otimização disponíveis no Ansys®, descritos no item 3.5.1, em comparação com os melhores resultados obtidos através do AG. O número de camadas não foi possível otimizar com os métodos do Ansys®. Assim, foram utilizados os valores ótimos de camadas encontrados pelo AG n. 10.

Os métodos estão em ordem crescente da $f(x)$. O método gradiente aparece por último, pois embora não tenha convergido para a pior $f(x)$, não foi capaz de encontrar nenhum resultado que atendesse a restrição do critério de falha máximo (CF_{MAX}). Ainda a respeito do mesmo gráfico, a $f(x)$ está multiplicada por um fator de 20, para facilitar a visualização.

Na FIGURA 5.48 aparecem os mesmos dados anteriores mais o tempo de processamento, só que normalizados pelo AG n. 17.

Os critérios de convergência utilizados para cada um dos métodos do Ansys® foram os padrões pelo programa.

FIGURA 5.47 – Comparação do AG com métodos de otimização do Ansys®.

FIGURA 5.48 – Mesma comparação anterior, normalizada pelo AG n. 17.

Na TABELA 5.18 estão listadas todas as VP resultantes das otimizações realizadas. Entre as duas soluções via AG, a média das diferenças de θ entre o AG n. 10 e o AG n. 17 foi de 12 graus, e das espessuras foi de 0,037 mm.

TABELA 5.18 – Lista das VP ótimas de todos métodos de otimização.

VP	AG n.17	AG n.10	Sub-problema	Primeira ordem	Gradiente
Θ_{11}	75,00	75,00	83,34	66,57	81,67
δ_{11}	0,20	0,35	0,42	0,42	0,55
Θ_{12}	45,00	80,00	58,59	0,21	15,67
δ_{12}	0,55	0,20	0,23	0,39	0,31
Θ_{15}	80,00	75,00	82,16	90,00	12,57
δ_{15}	0,55	0,30	0,33	0,25	0,30
Θ_{21}	34,00	75,00	15,81	68,66	9,48
δ_{21}	0,25	0,20	0,43	0,42	0,29
Θ_{22}	90,00	60,00	0,72	26,25	68,99
δ_{22}	0,25	0,25	0,20	0,39	0,26
Θ_{23}	75,00	22,00	8,59	85,47	0,95
δ_{23}	0,35	0,50	0,21	0,29	0,44
Θ_{24}	-	80,00	24,94	0,36	79,23
δ_{24}	-	0,35	0,44	0,36	0,24
Θ_{31}	80,00	60,00	67,43	17,69	49,16
δ_{31}	0,25	0,55	0,35	0,21	0,47
Θ_{32}	60,00	34,00	36,35	39,84	7,47
δ_{32}	0,30	0,40	0,48	0,47	0,49
Θ_{41}	60,00	80,00	55,45	74,90	25,07
δ_{41}	0,30	0,55	0,53	0,43	0,39
Θ_{42}	80,00	45,00	74,55	19,04	42,67
δ_{42}	0,35	0,30	0,22	0,41	0,29
Θ_{45}	60,00	60,00	47,25	44,12	49,65
δ_{45}	0,20	0,55	0,35	0,21	0,51
Θ_{51}	45,00	0,00	19,95	75,14	56,63
δ_{51}	0,25	0,35	0,47	0,35	0,39
Θ_{52}	60,00	80,00	28,46	6,03	53,54
δ_{52}	0,25	0,35	0,33	0,46	0,26
Θ_{53}	45,00	45,00	5,57	39,66	69,72
δ_{53}	0,25	0,30	0,40	0,26	0,41
Θ_{54}	-	0,00	53,79	30,77	89,79
δ_{54}	-	0,20	0,46	0,33	0,31
Θ_{61}	80,00	0,00	56,91	56,57	12,56
δ_{61}	0,30	0,25	0,20	0,51	0,55
Θ_{62}	80,00	0,00	18,34	73,47	45,32
δ_{62}	0,35	0,30	0,36	0,41	0,33
Θ_{MESA}	22,00	22,00	59,00	75,88	14,62
δ_{ALMA}	0,50	0,45	0,27	0,47	0,42
$\delta_{\text{MESA_SUP}}$	14,00	29,00	33,83	41,72	16,46
$\delta_{\text{MESA_INF}}$	41,00	32,00	42,20	44,00	39,83
Ncam_1	7	7	7	7	7
Ncam_2	7	9	9	9	9
Ncam_3	5	5	5	5	5
FCMAX	0,89	0,821	0,87	0,81	1,4
$f(x)$	0,0284	0,030	0,0317	0,0325	0,0309

6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

6.1 Sobre os VANTs

A primeira parte deste trabalho teve como objetivo a realização de uma revisão bibliográfica das aplicações e conceitos de projetos de aeronaves não tripuladas. Foram analisados os conceitos gerais e típicos na concepção dessas aeronaves nos principais quesitos, pesquisados os modelos mais relevantes e analisadas as suas características. Foram também analisadas as suas aplicações bem como os potenciais campos de aplicação ainda pouco explorados.

Devido à sua principal característica, considerando a sua aplicação mais típica, a de vôos de longa duração a grandes altitudes, esses VANTs possuem asas de alongamento muito grande, a fim de minimizar o arrasto induzido e conseqüentemente aumentar a autonomia e teto operacional. Foi assim estudada a influência desse parâmetro no arrasto induzido, e foi proposta uma configuração de asa para posterior otimização.

6.2 Sobre a otimização de estruturas de material compósito com AG

Finalmente, após a verificação da necessidade de asas de grande alongamento e das considerações sobre os materiais compósitos, que formaram o preâmbulo para o objetivo final deste trabalho, desenvolveu-se uma rotina de otimização para estruturas de material compósito com o uso de algoritmos genéticos. Primeiramente foram revisados os conceitos e a teoria sobre os AGs e as aplicações de AGs a compósitos. Após, foi desenvolvido um AG em Fortran, que pudesse trabalhar em conjunto com um software de elementos finitos (Ansys®), que serviu para a avaliação estrutural. Esse AG foi testado em um modelo de asa com as características típicas de asas de VANTs, e o seu desempenho foi comparado com o desempenho de outros métodos de otimização existentes dentro do Ansys®.

Foram analisados os efeitos da variação de diversos parâmetros do AG, e foi verificado que dentre os diversos operadores genéticos estudados, o operador elitismo é o que melhora mais significativamente o desempenho do AG. Também o escalonamento da aptidão produz um efeito significativo sobre o desempenho do AG, o que mostra ser importante a escolha adequada dos parâmetros.

Os resultados mostraram que no estudo de caso realizado, o AG aqui desenvolvido foi capaz de encontrar um mínimo para a $f(x)$ menor do que os outros métodos de otimização disponíveis no Ansys®, sem violar a restrição imposta. No entanto, ele necessita de um tempo de processamento maior, e avaliar se ele é vantajoso em relação aos outros métodos testados, depende de uma relação de compromisso entre o tempo de processamento e a minimização da

$f(x)$. Uma vantagem qualitativa do AG em relação ao demais métodos, é a sua capacidade de otimizar o número de camadas do laminado e considerar as espessuras reais de tecidos disponíveis.

Adicionalmente, vale salientar que a aplicação do processo de otimização aqui desenvolvido não se restringe a VANTs ou mesmo a asas. Ele pode, com poucas modificações (o modelo de entrada do Ansys® e mais algumas poucas modificações na macro e no código do AG, no que tange à leitura e codificação de diferentes VP), ser aplicado a qualquer estrutura de material compósito modelável no Ansys®.

6.3 Sugestões para pesquisas futuras

O AG aqui desenvolvido, embora tenha levado a resultados satisfatórios, pode ser melhorado sob muitos aspectos, alguns dos quais são enumerados a seguir.

- Eliminação de análises redundantes. Durante a execução do AG, eventualmente são gerados indivíduos que já foram analisados antes, ou seja, alguns indivíduos podem se repetir. Implementar na rotina algum tipo de verificação que identifique esses indivíduos redundantes e resgate os respectivos resultados já obtidos permite que o tempo de análise e, portanto, de convergência ao ótimo, seja reduzido, pois não se faz necessário repetir a análise por elementos finitos, já que ela é bastante demorada.
- Teste e implementação de novos operadores genéticos, critérios de seleção e uso de populações sobrepostas, pode melhorar o desempenho do AG.
- Implementação de cruzamento multi-ponto. Devido ao comprimento do cromossomo aqui usado, isso deve melhorar o desempenho do AG.
- Otimização utilizando teoria clássica da laminação e balizamento por elementos finitos. O uso da teoria clássica da laminação para a análise pode acelerar sensivelmente o AG, pois através da teoria clássica da laminação é possível rapidamente analisar o laminado. O MEF, cuja análise é muito mais lenta, é então usado apenas em alguns pontos do espaço de busca, para com sua maior precisão balizar os resultados obtidos usando a teoria clássica da laminação.
- Uso de uma malha de EF mais refinada, aproveitando recursos computacionais com maior poder de processamento.
- Estudo mais aprofundado dos efeitos da variação de cada parâmetro, como probabilidades de cruzamento, mutação, tamanho da população, escalonamento e outros, bem como do efeito da variação de múltiplos parâmetros simultaneamente, ou seja, da interdependência entre os parâmetros, permitirá uma utilização mais eficaz do AG.

- Implementação de novas variáveis de projeto. A forma em planta da asa, a envergadura, as cordas na raiz, quebra e ponta poderiam ser facilmente implementados como VP no AG. Poderia-se então utilizar algum método aproximado para o cálculo do carregamento aerodinâmico e do arrasto induzido, ou acoplar ao AG algum método numérico, com método dos painéis ou o método Vortex Lattice, por exemplo.
- Associar ao AG algum método derivativo para guiar e refinar a busca pelo ponto ótimo.
- Implementação de parâmetros dinâmicos no AG, que variem na medida em que o AG avança nas gerações.
- Aplicação do AG num modelo de placa laminada com geometria simples, de solução conhecida, para validação do algoritmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLOUCHE, M. (2005). UAV Systems - Airworthiness & Airspace Integration - Recent European Rule-Making Initiatives. In: UAV-NET Meeting, 13., 2005, Eilat. Disponível em: <http://www.uavnet.com/DL/Document_Library/Eilat_2005_Meeting/Airworthiness_Allouche.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2005.
- ANASTASIADIS, P.T.; MORRIS, A.J. (1996). The influence on optimal structural designs of the modeling processes and design concepts. *The Aeronautical Journal*, p. 165-175, May.
- ANSYS User's Manual (1995a). Volume IV, Theory. Swanson Analysis Systems Inc.
- ANSYS User's Manual (1995b). Volume I, Procedures. Swanson Analysis Systems Inc.
- BISHOP, J.A.; EASTEO, F.E.; STRIZ, A.G.; VENKAYYA, V.B. (1998). Influence of model complexity and aeroelastic constraints on multidisciplinary optimization of wings. *Journal of Aircraft*, v. 35, n. 5, p. 784-790, Sept.-Oct.
- BOEING 7E7 Structure Will Be Made of Composite Materials (2003a). *BOEING – News Release*. Disponível em: http://www.boeing.com/news/releases/2003/q2/nr_030612g.html>. Acesso em: 12 jun. 2003.
- BOEING Announces Partners for Fuel Cell Demonstrator Airplane Project Chicago. (2003b). *BOEING – News Release*. Disponível em: <http://www.boeing.com/news/releases/2003/q3/nr_030711p.html>. Acesso em: 11 jul. 2003.
- BRASIL (2004a). Portaria Normativa nº 606/MD, de 11 de junho de 2004. *Diário Oficial[da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF. Ano CXLI, n. 193.
- BRASIL (2004b). Portaria nº 955/MD, de 5 de outubro de 2004. *Boletim do Exército*. Ministério da Defesa, Exército Brasileiro, Secretaria-Geral Do Exército, Brasília, DF. 8 de out. n. 41/2004.
- CALLAHAN, J.K., WEEKS G.E. (1992). Optimum design of composite laminates using genetic algorithms. *Composite Engineering*, v. 2, n. 3, p. 149-160, Apr.
- CAMP, C.; PEZESHK, S.; CAO, G. (1998). Optimized design of two-dimensional structures using a genetic algorithm. *Journal of structural engineering*, v. 124, n. 5, p. 551-559, May.
- CARVALHO, A.P.L.F. (2002). Disponível em: < <http://www.icmsc.sc.usp.br/~andre/>>. Acesso em: 24 nov.
- CELESTINO, V. (2005). *The EADS company and Defence and Communications Systems (DCS)*. Apresentado ao Seminário Internacional de VANT, 1., São José dos Campos, 22 jun, 2005.
- COMMUNICATION from the commission to the European parliament and the council (2004). *COMMISSION of the European communities*. Brussels, 6 Oct. 2004. Disponível em:

- <http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/documents/doc/com_2004_636_en.pdf>. Acessado em nov. 2004.
- CURTIS[A40], H. (1977). *Biologia*. 2. ed. Editora Guanabara Koogan S.A.
- DALEN, F.; BIL, C.; ROTHWELL, A.; ARENDSSEN, P. (1994). Finite-element based preliminary design procedures for wing structures, ICAS CONGRESS 1994, paper 9.6.2, p. 2233-2246.
- DeGARMO, M.T. (2004). *Issues Concerning Integration of Unmanned Aerial Vehicles in Civil Airspace*. McLean, Virginia: Center for Advanced Aviation System Development, MITRE Corporation.
- DRELA, M. (2001). XFOIL Manual.
- ESDU (1998). *Aerodynamic principles of Winglet*. n. 98013.
- FABRICATION of composites (1983). *Handbook of composites*. 1.ed. North-Holland. v.4.
- FARMER, S. (2005). *Filling a niche: A next-generation medium-sized VTOL UAV*. Apresentado ao Seminário Internacional de VANT, 1., São José dos Campos, 22 jun, 2005.
- FERREIRA, S. (2005). *UAV Military & Civilian Certification in South Africa*. Apresentado ao Seminário Internacional de VANT, 1., São José dos Campos, 22 jun, 2005.
- FUTUYMA, D.J. (2002). *Biologia Evolutiva*. 2.ed. Funpec/RP Editora.
- GALI, S.; GHILAI, G.; PELED, D.; DAVID, A.; SELA, N.; DERWISH, Y. (1996). Development of a structural RPV section serving as an integral fuel tank made of sandwich CFRP, ICAS CONGRESS 1996, paper 5.1.4, p. 183-190.
- GARDNER, E.J.; SNUSTAD, D.P.; SIMMONS, M.J. (1991). *Principles of Genetics*. - 8 th ed. Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- GLONASS Summary (2004). *SPACEANDTECH*. Disponível em: <http://www.spaceandtech.com/spacedata/constellations/glonass_consum.shtml>. Acesso em nov. 2004.
- GODINHO, M.G. (2000). *Reconstrução de perfis de fontes de bioluminescência usando algoritmo genético*. Dissertação (Mestrado) - CTA/ITA. São José dos Campos. 2000.
- GOLDBERG, D. E. (1989) *Genetic Algorithms in search, optimization, and machine learning*, Addison Wesley Longman, Inc., Reading, Massachusetts.
- GUGLIERI, G.; QUAGLIOTTI, F. (1996). Preliminary design of a solar powered tailless motorglider, ICAS CONGRESS 1996, paper 2.5.2, p. 1065-1073.
- GÜRDAL, Z.; HAFTKA, R.T.; HAJELA, P. (1999). *Design and optimization of laminated composite materials*, New York, John Wiley & Sons, Inc.
- GÜRDAL, Z.; HAFTKA, R.T.; NAGENDRA, S. (1994). Genetic algorithms for the design of laminated composite panels, *SAMPE Journal*, v. 30, n.3, p.29-35, May/June.
- HAFTKA, R. T.; GÜRDAL, Z. (1991). *Elements of Structural Optimization*. Kluwer academic publishers, Dordrecht/Boston/London.

- HALLBERG, E.; KAMINER, I.; PASCOAL, A. (1999). Development of a flight test system for unmanned air vehicles, *IEEE Control Systems*, p.55-65, Feb.
- HOLLAND, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and intelligence*. MIT Press/ Bradford Books edition, Cambridge, Massachusetts, London. 1th ed. 1992.
- III CONFERÊNCIA Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (2005). *Programas Mobilizadores - CGEE (Centro de Gestão e estudos estratégicos) - Seminário Preparatório*. Brasília. 23 mar. p.26.
- JACOB, K.A.; PRABHAKARAN, V.; SARAVANAN, P. M. (1998). Probabilistic approach for design of a composite RPV wing, ICAS CONGRESS 1998, paper R,4,7(A98-31605), Sept.
- JANSSON, G. (2001). *VI "Vergeltungs Waffen" (Retaliation Weapons) data base*. Disponível em: <http://www.zenza.se/vw/v_main.html>. Acesso em: 7 out. 2001.
- JAXA-MALACHOWSKI, R. (1996). Designing process of unmanned aerial vehicles, ICAS CONGRESS 1996, paper 4.2.3, p 391-397.
- JONES, R. M. (1975). *Mechanics of composite materials*. Washington, D.C., Scripta Book Company.
- JORGE, L.A.C. (2005). *Utilização de VANT na AGRICULTURA*. Apresentado ao Seminário Internacional de VANT, 1., São José dos Campos, 21 jun, 2005.
- KAM, T. Y.; LAI, F.M.; LIAO, S.C.(1996); Minimum weight design of laminated composite plates subject to strength constrain, *AIAA Journal*, v. 34, n. 8, p. 1699-1708, Aug.
- KING, R.C. (1974). *A dictionary of genetics*. 2th ed. revised. Oxford University Press, Inc. New York.
- KOFFLER, Y.K. (2005). *Latest Generation Data Link Systems for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)*. Apresentado ao Seminário Internacional de VANT, 1., São José dos Campos, 21 jun, 2005.
- KÜKE, R. (2002). UISCO - UAV Safety Issues for Civil Operations. Disponível em: <http://www.ft.bs.dlr.de/~kuhahn/FA5_02.pdf>. Acesso em: 28 jun., 2005.
- LE RICHE, R., HAFTKA, R. T. (1994). Improved Genetic Algorithm for Minimum Thickness Composite Laminate Design, Proceeding of the International Conference on Composite Engineering, New Orleans, LA, Aug. 28-31, 1994.
- LE RICHE, R.; HAFTKA, R.T. (1993). Optimization of laminate stacking sequence for buckling load maximization by genetic algorithm, *AIAA Journal*, v. 31(5), 951-956.
- LILLICO, M.; BUTLER, R.; GUO, S.; BANERJEE, J. R. (1997). Aeroelastic optimization of composite wings using the dynamic stiffness method. *The Aeronautical Journal*, p. 77-86, Feb.

- LOEGERING, G. (2002). Global Hawk – A new tool for airborne remote sensing. AIAA 2002-3458. 1st UAV Conference, Portsmouth, Virginia, May 20-23, 2002.
- LOURENÇO, C.E.B. (2002). *Curso de Ciências da Computação*. Disponível em: <<http://black.rc.unesp.br/ccomp/algoritmo/>>. Acesso em: 14 dez.
- MARCELIN, J. L.; TROMPETTE, P.; DORNBERGER, R. (1995). Optimization of composite beam structures using a genetic algorithm, *Structural Optimization*, v.9, p. 236-244.
- MASAK, P.C.(1991). *Performance Enhancement of modern sailplanes*. Booklet. Houston, Texas, Sept. 1991.
- MATWEB Material Property data (2003). Disponível em: <<http://www.matweb.com/>>. Acesso em: 26 jan.
- McCORMICK, B. W. (1995). *Aerodynamics, aeronautics, and flight mechanics*. 2th ed. New York. John Wiley & Sons, Inc.
- McMAHON, M. T. (1998). *A distributed genetic algorithm with migration for the design of composite laminate structures*. 93p. Dissertação (Mestrado) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. Aug. 1998.
- MSU Garage Software (2004). GALOPPS 3.2.4 - The Genetic ALgorithm Optimized for Portability and Parallelism System. Disponível em:<<http://garage.cps.msu.edu/software/galopps/galopps.for.PC.users.html>>. Acesso em: 28 jul. 2004.
- MUNARETTO, L.A.C. (2005) *VANT - Perspectiva Governamental*. Apresentado ao Seminário Internacional de VANT, 1., São José dos Campos, 21 jun, 2005.
- NERIS, L.O. (2001). *Um piloto automatico para as aeronaves do projeto ARARA*. 102p. Dissertação (Mestrado) – ICMSC – USP, São Carlos. Out. 2001.
- NIU, M.C.Y. (1996). *Composite airframe structures*. Hong Kong, Hong Kong Conmilt Press ltd.
- OKOMURA, T.; YOKOYAMA, A.; NAGAI, K; MAEKAWA, Z. (1995) Optimum design of weaving structure of 3-D woven fabric composites by using genetic algorithms, *Composite Structures*, n. 32, p. 417-426.
- OLIVEIRA, F.A. (2005). *CTA e o Projeto VANT*. Apresentado ao Seminário Internacional de VANT, 1., São José dos Campos, 21 jun., 2005.
- ORTIZ, F. JR.; SIMPSON, J.R; PIGNATIELLO JR, J.J.; HEREDIA-LANGNER, A. (2004). A Genetic Algorithm Approach to Multiple-Response Optimization. *Journal of Quality Technology*, v. 36, n. 4, Oct. 2004.
- PARSOPOULOS, K.E.; VRAHATIS, M.N. (2002). Recent approaches to global optimization problems through Particle Swarm Optimization. *Natural Computing*, v.1, p. 235–306. 2002.

- PATHFINDER – Project Description (2003). Disponível em: <<http://geo.arc.nasa.gov/ERAST/pathfinder/ERAST.htm>>. Acesso em: 20 set.
- PETERS, S.T.; (1998). *Hanbook of Composites*. London, Chapman & Hall.
- PRADO, J.R.; SARAMAGO, S.F.P. (2005) Otimização por colônia de partículas. *FAMAT em revista*, n. 4, abr. 2005.
- PROPOSTA de regra RBHA 100 - de Veículos Aéreos Não Tripulados (2004). Disponível em: <<http://www.dac.gov.br/RBHA/novorbha.asp>>.
- RAMOS, J.G. (2005). *Projeto AURORA*. Apresentado ao Seminário Internacional de VANT, 1., São José dos Campos, 21 jun., 2005.
- RAYMER, D.P.(1989). *Aircraft Design: A conceptual approach*. Washington, D.C., AIAA Education Series.
- REINHART, T.J.; CLEMENTS, L.L. (1987). *Engineered materials handbook*. v. 1, *Composites*. Ohio, ASM International.
- SANTOS, F.R. (2002). Neo-darwinismo. Disponível em: <<http://www.icb.ufmg.br/~lbem/aulas/grad/evol/neo-darwinismo.htm>>. Acesso em: 16 Set.
- SCOTT, M.L.; CHEUNG, A.K.H.; NEWMAN, P.D. (1996). Design, analysis and testing of a postbuckling co-cured composite control surface. ICAS CONGRESS 1996, paper 5.5.1, p. 1137-1147.
- SHAMMAI, S. (2005). Emerging Markets for Civil & Commercial UAVs. In: UAV-NET Meeting, 13., 2005. Disponível em: <http://www.uavnet.com/DL/Document_Library/Eilat_2005_Meeting/UAV_Markets_Shammai.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2005.
- SKUDRA, A.M.;SIH, G.C. (1986). *Failure mechanics of composites*. Amsterdam, North-Holland.
- SMITH, M. J.; KOMERATH, N.; AMES, R.; WONG, O.; PEARSON, J. (2001). Performance analysis of a wing with multiple winglets. AIAA-2001-2407.
- SOREMEKUN, G.A.E. (1997). *Genetic algorithms for composite laminate design and optimization*. 157p. Dissertação (Mestrado) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. Feb. 1997.
- SOUZA, E.N. (2001). *Otimização do dimensionamento de seções transversais de concreto armado com a utilização de algoritmo genético*. Trabalho de graduação (Bacharelado). CTA/ITA, São José dos Campos. 2001.
- STANSFIELD, W.D. (1974). *Genética*. Ed. MacGraw – Hill do Brasil, Ltda.
- STINTON, D. (1983). *The design of the aeroplane*. Cambridge, Blackwell Science.
- STRICKBERGER, M.W. (1993). *Evolución*. Barcelona, Ediciones Omega, S.A.
- SUSPENDED animation - Unmanned craft loitering in the stratosphere may soon supplant satellites (2003). *ECONOMIST – Science & Technology - Unmanned aerial vehicles*. 3

- July. Disponível em:
http://www.economist.com/science/displayStory.cfm?story_id=1893097>. Acesso em: 21 ago. 2003.
- THOMAS, F. (1979). *Grundlagen für den Entwurf von Segelflugzeugen*. Motorbuch Verlag, Stuttgart.
- THOMPSON, L.A.; BIL, C. (1994). The design and flight trials of a multi-purpose autonomous flight vehicle system, ICAS CONGRESS 1994, paper 6.3.3, p 890-899.
- TORENBEECK, E. (1992). Development and application of a comprehensive, design-sensitive weight prediction method for wing structures of transport category aircraft, *Report LR-693*, Delf University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Sept. 1992.
- TSACH, S.; YANIV, A.; AVNI, H.; PENN, D. (1996). High altitude long endurance (HALE) UAV for intelligence missions, ICAS CONGRESS 1996, paper 4.2.1, p 368-379.
- TSAI, S.W.; HAHN, H.T. (1980). *Introduction to composite materials*. Westport, Technomic Publishing Company.
- ULLER, M. (1999). *Biomimética aplicada à engenharia aeronáutica*. 151p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos. Fev. 1999.
- VANDERPLAATS, G.N. (1999). *Numerical optimization techniques for engineering design*. Vanderplaats Research & Development, Inc., Colorado Springs, CO.
- VENTER, G.; SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI, J. (2004). Multidisciplinary optimization of a transport aircraft wing using particle swarm optimization. *Struct Multidisc Optim*, n. 8, p. 121-131.
- VITALI, J.; TSACH, S.; AVNI, H.; GALI, S.; WEISSBERG, V. (1996). Development approach of the Heron medium altitude long endurance U.A.V, ICAS CONGRESS 1996, paper 4.2.2, p. 380-390.
- WALLACE, J. (2002). *Boeing's unmanned fighter makes first successful flight*. Disponível em:
http://seattlepi.nwsourc.com/business/71421_unmanned22.shtml>. Acesso em: 12 dez. 2002.
- WEST, M.; MINER, K. R.; SANCAKTAR, E. (1996). Composite design methodology: Design of composite trails for the U.S. Army's M198 Howitzer, A case study, *Journal of Mechanical design, Transaction of the ASME*, v. 118, p. 286-293, June.
- WIDMAIER, K.; CATALANO, F. M. (2000). Conceptual design and optimization of a high aspect ratio U.A.V. wing made of composite material, ICAS CONGRESS 2000, paper 742.1.
- YOUNGBLOOD, J.W.; TALAY, T.A.; PEGG, R.J. (1984). Design of long-endurance unmanned airplanes incorporating solar and fuel cell propulsion, AIAA 84-1430, AIAA/SAE/ASME 20th Joint Propulsion Conference, June 11-13, Cincinnati, Ohio.

- YU, G.T.(1999). *An Analysis of the Impact of Functional Programming Techniques on Genetic Programming*. Tese (Doutorado) - University of London, Department of Computer Science. London, 1999.
- YURKOVICH, R. (1994). The use of taguchi techniques with the ASTROS code for optimum wing structural design, AIAA Proceedings of the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 35th Structures, Structural Dynamics, and Materials conference, AIAA.Washington, DC p. 1334-1342.

APÊNDICE A – Fonte do AG em Fortran

Segue a transcrição do código fonte do AG, em Fortran 90.

```

module parametros
  implicit none
  save
  real,parameter ::          pcruza = 0.7,  pmutacao =
0.033, pinv=0.1 !.015
  integer,parameter :: tam_popu=8 !npartes=1
,ncamadas=7 !pop tem que ser par
  integer, parameter :: nvp= 63 !(npartes * 2 *
ncamadas) ! +4
  integer, parameter :: com_cromo= 190
                                !28  $\theta$ s
      3 bits          84
                                !28 espessuras
      3 bits          84
                                !1  $\theta$  alma          3
bits          3          OBS.: Não usado no ansys
                                !1 espessura alma
      3 bits          3
                                !2 espessuras mesas 5
bits          10
                                !3 ncamadas          2
bits          6
                                !nDV
                                !Total 63
                                190
  integer ninv,j
end module parametros

!#####
module populdef
  use parametros
  implicit none
  save
  integer nmutacao
  logical, external :: moeda
  ! real, external :: penalidade
  integer, external :: seleciona
  real,parameter ::  $f(x_{max})$  = 0.7 !Max possível da
função objetivo --> ajustar !!%*##IMPORTANTE##**%
  type individuo
    logical cromo(com_cromo)          !Genótipo,
contém os alelos (DV's em forma binária)
    real x(nvp)
  !fenótipo
    real aptidao
  !valor função objetivo          Peso mais penalidade

```

```

integer pai1,pai2,xcort                !pais e ponto de
!ross
      end type  individuo
      !      declaração da variavel população, tipo derivada
      type populacao
         type (individuo) :: populacao(tam_popu)
      end type  populacao
      type (populacao) :: pop,velh_pop,nova_pop      !
      { Two non-overlapping populations }
      end module populdef
!#####
      program AG
      use populdef
      implicit none
      integer geracao                                !
      { Integer global variables }
      integer j1,parceiro1,parceiro2,jcruza,i,trocar
      integer ponteiro
      integer ncruza                                !
      { Integer statistics }
      integer melhor
      real soma_apti                                !
      { Real global variables }
      real CF_tsai_wu,objetivo
      real media,max,min                            !
      { Real statistics }
      real aptid, maxloc
      real, external :: calc_aptid
      logical cromo(com_cromo)
      !      character individuo*(com_cromo+(nvp+1)*8+15)
      character dia*24,hora*8

      open (2,file='AG-dados_complet.txt',ACCESS='APPEND')
      open (3,file='AG-estat_geracao.txt',ACCESS='APPEND')
      !Arquivo de troca de dados com o ANSYS
      open (4,file='AGPAR.txt')
      open (60,file='AG-AGPAR-resumo.txt',ACCESS='APPEND')
      !arquivo de controle
      open
      (5,file='controle.txt',ACCESS='DIRECT',RECL=15,ACTION='READWRITE'
      ',FORM='FORMATTED')    !,ERR=1000,
      open
      (7,file='nova_pop.txt',ACCESS='DIRECT',RECL=(com_cromo+(nvp+1)*8
      +15),ACTION='READWRITE',FORM='FORMATTED')
      open
      (8,file='velh_pop.txt',ACCESS='DIRECT',RECL=(com_cromo+(nvp+1)*8
      +15),ACTION='READWRITE',FORM='FORMATTED')
      open
      (9,file='aptidao.txt',ACCESS='DIRECT',RECL=20,ACTION='READWRITE'
      ',FORM='FORMATTED')
      open (25,file='AG-estat_popula.txt',ACCESS='APPEND')
      open (26,file='pop_binária.txt',ACCESS='APPEND')
      open (27,file='AG-pop_em_colunas.txt',ACCESS='APPEND')
      open (50,file='AG-escalonamento.txt',ACCESS='APPEND')

```



```

!      Inicializa o arquivo de controle "controle.txt" (Os
parâmetros são inicializados pela execução de iniciaPAR.exe)
      read(5,'(I8)',REC=2)ponteiro      !Lê no arquivo de
controle o valor do ponteiro
!
      call fdate(dia)
      call random_seed()                !alimenta o
gerador de n. aleatórios
      if (ponteiro.eq.0) then            !Teste do
ponteiro para rodada inicial
      write (5,'(I8)',REC=4) 0          !Registra "Geração:
0" no arquivo de controle
      !      INITIALIZE
      !      INITDATA inicia dados e entra com
eles*****
      write (6,'("***** Parâmetros do AG
*****")')
      write (6,'("Tamanho população:      ",I8)')
tam_popu
      write (6,'("Comprimento do cromossomo:  ",I8)')
com_cromo
      write (6,'("N. de DV's:      ",I8)') nvp
      write (6,'("Probabilidade de cruzamento: ",F8.4)')
pcruza
      write (6,'("Probabilidade mutacao:      ",F8.4)')
pmutacao
      write (6,'("Probabilidade de inversão:  ",F8.4)')
pinv

      write (25,'("Data:",A24)')dia
      write (25,'("Mesmos valores que no arq.
""aptidao.txt"", descontados os npop primeiros")') !salva AG-
estat_popula.txt
      write (25,'("      geração    j CF_tsai_wu objetivo
aptid_n_escal")') !salva AG-estat_popula.txt

!      iniciar gerador aleatório de numeros
!      randomize {entrada para gerar n aleatório no pascal}
!      inicia contadores
      nmutacao=0
      ncruza=0
      ponteiro = 1
      write (5,'(I8)', REC=2) ponteiro      !Registra no
arquivo de controle o valor do ponteiro (iniciap pop)

endif

!
INITPOP*****
!Loop de "tam_popu" execuções
if (ponteiro.eq.1) then
      read (5,'(I8)',REC=6) j              !Lê no arquivo
de controle o n. do indivíduo corrente
      if (j.gt.0) then

```

```

        read (4,230)CF_tsai_wu,objetivo !lê a aptidão em
'AGPAR.txt, onde o ansys salva'
        ! formato de salvamento da macro do Ansys:
        !      *VWRITE,01,esp1,02, esp2, fcmx,volu
        !      (6F8.4)
        aptid=calc_aptid(CF_tsai_wu,objetivo) !Calcula a
aptidão
        write (9,220,REC=j) aptid !salva aptidão em
'aptidao.txt'
        write (25,'(2I8,3F10.4)')geracao,
j,CF_tsai_wu,objetivo,aptid !salva 'AG-estat_popula.txt' com
aptidão não escalada

        endif
        j=j+1 !Avança o
contador da população
        write (5, '(I8)', REC=6)j
        if (j.eq.tam_popu+1) then
            !Registra no arquivo de controle o valor do
ponteiro (geração da pop inicial terminada) e encerra
            ponteiro = 2
            write (5, '(I8)', REC=2) ponteiro
            write (5, '(I8)', REC=6) 0 !Zera população
            stop
        endif
        do j1=1,com_cromo !gera
cada gene do individuo j aleatoriamente
            velh_pop%populacao(j)%cromo(j1)=moeda(0.5)
            !moeda = {jogar cara ou coroa}
        enddo
        call decodifica(velh_pop%populacao(j)%cromo,
velh_pop%populacao(j)%x)
        !inicializa variaveis de saida
        velh_pop%populacao(j)%pai1=0;
velh_pop%populacao(j)%pai2=0; velh_pop%populacao(j)%xcort=0
        write (8,210, REC=j) velh_pop%populacao(j)
!'velh_pop.txt'
        rewind (4) !AGPAR.txt
        write (4,260) velh_pop%populacao(j)%x ! salva as
DV's para a próxima execução do Ansys em AGPAR.txt
        write (60,260) velh_pop%populacao(j)%x ! salva as
DV's para histórico
        !para teste apenas(repete linha mais embaixo)
        write
(4,'(2F8.4)')SUM(velh_pop%populacao(j)%x)/200,SUM(velh_pop%popul
acao(j)%x)/10000 !CF_tsai_wu,objetivo
        !call teste
        stop
    endif
    ! FIM INICIA
POPULAÇÃO*****
    ! Executa sempre. "Carrega" a população e a aptidão
    do j = 1,tam_popu !Lê população antiga
        read (8, 210, REC=j) velh_pop%populacao(j) !
'velh_pop.txt'

```

```

        read (9, 220, REC=j) velh_pop%populacao(j)%aptidao
! 'aptidao.txt'
        enddo
!      INITREPORT
*****
**
        if (ponteiro.eq.2) then
            call statistics(max,media,min,soma_apti,velh_pop)
            !calcula min, max , aptidão, etc
            call scalepop (max,media,min,soma_apti,velh_pop)
            !entra dentro da string velh_pop%populacao(j)%aptidao e à
modifica
            write (50, '("Data:",A24)') dia
            write (27, '("Data execução:",A24)') dia
            write
(3, '(/, "*****ESTATÍSTICAS*****
*****")')
            write (3, '("Data:",A24)') dia
            write (3, '(/, "
GERAÇÃO", 9X, "MÉDIA", 9X, "MÁX", 5X, "SOMA APTIDÃO", "    HORA")')
            write (2, '(/, "***** Parametros
Algorimo Genetico *****")')
            write (2, '(" ***** Data:",A24, "
*****")') dia
            write (2, '("-----
-----")')
            write (2, '(" Tamanho população =
",I8)') tam_popu
            write (2, '(" Comprimento cromossomo =
",I8)') com_cromo
            write (2, '(" Probabilidade de cruzamento =
",F8.4)') pcruza
            write (2, '(" Probabilidade mutação =
",F8.4)') pmutacao
            write (2, '(" Probabilidade inversão =
",F8.4)') pinv
            write (2, '(4/)')
            write (2, '("***Geração de estatísticas inicial**")')
            write (2, '("-----
-----")')
            write (2, '(" Aptidão max inicial da população =
",F12.6)') max
            write (2, '(" Aptidão média inicial da população =
",F12.6)') media
            write (2, '(" Soma da Aptidão inicial da população =
",F12.6)') soma_apti
            write (5, 240, REC=8) soma_apti
            ponteiro = 3
            write (5, '(I8)', REC=2) ponteiro !Registra no
arquivo de controle o valor do ponteiro (manda inicializar o
loop)
        endif
!      FIM
INITREPORT*****
*****

```

```

!      INICIA O LOOP
#####
      read (5,'(I8)',REC=4) geracao
5      write (5,'(I8)',REC=4)geracao
      print *, "##--->> Geracao: " , geracao
      read (5,240, REC=8)soma_apti
!
      GENERATION*****
*****
      if (ponteiro.eq.3) then
! **ELITISMO** loop para aptidao max escolhe o melhor%%%%%%%%
      maxloc=0.0
      do j=1,tam_popu
          if (velh_pop%populacao(j)%aptidao.ge.maxloc)
then
              maxloc=velh_pop%populacao(j)%aptidao !novo
max; aqui a aptidao já está escalada
              melhor=j
          endif
!          if (velh_pop%populacao(j)%aptidao.lt.minloc)
then
!              minloc=velh_pop%populacao(j)%aptidao !novo
min
!              pior=j
!          endif
      enddo
!      Cruzamento e mutação
%%%%%%%%%%%%%%%%
!      print *, "Gerando..."
      do j = 1,tam_popu,2
          ! { seleciona, crossover, and mutation until
newpop is filled }
6          parceiro1=seleciona(soma_apti,velh_pop)
          parceiro2=seleciona(soma_apti,velh_pop)

          !      Cruzamento e mutação - mutação incluída no
cruzamento
              call
crossover(velh_pop%populacao(parceiro1)%cromo,velh_pop%populacao
(parceiro2)%cromo,&

              nova_pop%populacao(j)%cromo,nova_pop%populacao(j+1)%cromo,n
cruza,nmutacao,jcruza)
!              **ELITISMO**
!              Coloca uma copia do melhor da população velha na
nova, sem mutar nem cruzar
!              futuramente colocar o melhor em espera e só
substituir depois de calculada aptidao nova;
!              a aptidao muda devido ao escalonamento
              if (j.eq.tam_popu-1) then

                  nova_pop%populacao(j+1)%cromo=velh_pop%populacao(melhor)%cr
omo
              endif

```

```

!
      %%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
!               decodifica string e grava dados dos pais nas
duas crianças
!               print *, "decodificando strings e gravando dados
dos pais nas duas crianças..."
               call decodifica(nova_pop%populacao(j)%cromo,
nova_pop%populacao(j)%x)
               nova_pop%populacao(j)%pai1=parceiro1           !nome
dos pais
               nova_pop%populacao(j)%pai2=parceiro2
               nova_pop%populacao(j)%xcort=jcruza
               !posição de cruzamento

               call decodifica(nova_pop%populacao(j+1)%cromo,
nova_pop%populacao(j+1)%x)
               nova_pop%populacao(j+1)%pai1=parceiro1
               nova_pop%populacao(j+1)%pai2=parceiro2
               nova_pop%populacao(j+1)%xcort=jcruza

!               Testa se já existe um
igual%%%%%%%%%
compartilhamento
               if (j.lt.tam_popu-1) then
                   do i=1,j
                       trocar=1
                       do j1=1,com_cromo
                           !gera cada indivíduo da população aleatoriamente
                           if
(nova_pop%populacao(j+1)%cromo(j1).ne.nova_pop%populacao(i)%crom
o(j1)) trocar=0
                           enddo
                       if (trocar.eq.1) goto 6
                   enddo
               endif
!               SALVA NOVA
POPULAÇÃO%%%%%%%%%
%
               enddo !j,tam_popu
               do j=1,tam_popu
                   WRITE (7,210, REC=j) nova_pop%populacao(j)
               enddo
!
               ponteiro = 4
               write (5, '(I8)', REC=2) ponteiro
               end if
!%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
               !Calcula a aptidão da nova
população*****
               if (ponteiro.eq.4) then           !Salva as DV para o ANSYS ler e
                   read (5, '(I8)', REC=6) j           !Lê no arquivo de
controle o n. do indivíduo corrente
                   if (j.gt.0) then

```

```

        read (4,230)CF_tsai_wu,objetivo !
nova_pop%populacao(j)%aptidao !lê a parametros de aptidao em
'AGPAR.txt'
        aptid=calc_aptid(CF_tsai_wu,objetivo)
        write (9,220,REC=j+tam_popu) aptid !salva
aptidão em 'aptidao.txt'
        write (25,'(2I8,3F10.4)')geracao+1,
j,CF_tsai_wu,objetivo,aptid !salva 'AG-estat_popula.txt' com
aptidão não escalada
    endif
    j=j+1
    write (5, '(I8)', REC=6)j
    if (j.eq.tam_popu+1) then
        write (5, '(I8)', REC=6) 0 !Zera o n.
do indivíduo corrente
        goto 20
    endif
    REWIND (4)
    read (7, 210, REC=j)nova_pop%populacao(j) !
indivíduo
    write (4,260) nova_pop%populacao(j)%x ! salva as
DV's para o próximo loop em AGPAR.txt
    write (60,*) 'Geração: ',geracao+1,' Indivíduo: '
,j
    write (60,260) nova_pop%populacao(j)%x ! salva as
DV's para histórico
    !para teste, repete linha mais em cima
    write
(4,'(2F8.4)')SUM(nova_pop%populacao(j)%x)/200,SUM(nova_pop%popul
acao(j)%x)/10000
    !call teste
    print *,'##---->> Indivíduo n:' ,j
    stop
endif

! FIM
GENERATION*****
*****
20 write (50,"(I4)")geracao+1
    write (50, "(" ")\")
    do j=1,tam_popu
        read (7, 210, REC=j) nova_pop%populacao(j)
        read (9,220,REC=j+tam_popu)
nova_pop%populacao(j)%aptidao !'aptidao.txt'
        write (50,"(I8\)" ) j
    enddo

    call statistics(max,media,min,soma_apti,nova_pop)
    write (50,'(/,"antes de escalar
",<tam_popu>F8.4\,/)' )nova_pop%populacao(:)%aptidao

    call scalepop (max,media,min,soma_apti,nova_pop)

    write (50,'("depois de escalar
",<tam_popu>F8.4\,/)' )nova_pop%populacao(:)%aptidao
    write (5, 240, REC=8)soma_apti

```

```

read (5, '(I12)', REC=12) nmutacao
read (5, '(I12)', REC=10) ncruza
read (5, '(I12)', REC=14) ninv

!   REPORTA escreve relatorio
populacao*****
!   print *, "populacao Report" (2, file='sumario-
AG.txt', ACCESS='APPEND')
write (2, '(4/)')
write (2, '(220("_"))')
write (2, '(T30, "Relatório da População")')
write (2, '(T10, "Geração: ", I8, <11*nvp/2+5>X, "Geração
seguinte: ", I8)') geracao, geracao+1
write (2, *)
!   <11*nvp/4-1>X, "DV", <11*nvp/4-1+3>X, " aptidão")')
write (2, '(" # ,", <54>X, "DV", <54>X, "aptidão", " ,", " pais
xcort", &
<54>X, "DV", <54>X, " aptidão")')
write (2, '(220("_"))')

do j=1, tam_popu
write (2, '(I3,") ", \)') j !N do indivíduo
! string velha
call writecromo (velh_pop%populacao(j)%cromo)
!Converte população bin para real e salva em 'pop_binária'
write (2, '(",", <nvp/2>(F4.0, F5.2), F9.4, "
|", \)') velh_pop%populacao(j)%x, &
velh_pop%populacao(j)%aptidao
! string nova
write (2, '(I3, " ", I3, I6, " ", \&

)') nova_pop%populacao(j)%pai1, nova_pop%populacao(j)%pai2, &
nova_pop%populacao(j)%xcort
call writecromo (nova_pop%populacao(j)%cromo)
!Converte população
write
(2, '(<nvp/2>(F4.0, F5.2), F9.4)') nova_pop%populacao(j)%x, nova_pop%
populacao(j)%aptidao
enddo
write (2, '(100("_"))')
write (2, '("Nota: Geração", I4, " & estatísticas
acumuladas:", " max=", F9.4, \)') geracao, max
write (2, '(", min=", F9.4, " , media=", F9.4, " , sum=",
F12.4, " , nmutacao=", I8, " , ninv=", I8\)' ) &
min, media, soma_apti, nmutacao, ninv
write (2, '(" , ncruza= ", I8)') ncruza
CALL time(hora)
write
(3, '(I8, 3F14.4, 4X, A8)') geracao, media, max, soma_apti, hora
!Saída para graficar no excel

!Saída em colunas
write (27, '(/, "Geração (Velha): ", I8, 81X, "Geração
(Nova): ", I8)') geracao, geracao+1
write (27, '(" " \)')
write (27, '(<tam_popu>I7\)' ) (j, j=1, tam_popu)

```

```

write (27, '(' | "\)')
write (27, '(<tam_popu>I7)') (j, j=1, tam_popu)
do i=1, nvp
  write (27, '(I7\)' ) i
  write
(27, '(F7.2\)' ) (velh_pop%populacao(j)%x(i), j=1, tam_popu)
  write (27, '(' | "\)')
  write
(27, '(<tam_popu>F7.2)') (nova_pop%populacao(j)%x(i), j=1, tam_popu)
enddo
write (27, '("Aptidão\)' )
write (27, '(<tam_popu>F7.3, " |
", <tam_popu>F7.3)') (velh_pop%populacao(j)%aptidao, j=1,
tam_popu), &
(nova_pop%populacao(j)%aptidao, j=1, tam_popu)
write (27, '("Pai1", T<tam_popu*8>, <tam_popu>I7)')
(nova_pop%populacao(j)%pai1, j=1, tam_popu)
write (27, '("Pai2", T<tam_popu*8>, <tam_popu>I7)')
(nova_pop%populacao(j)%pai2, j=1, tam_popu)
write (27, '("Pto cruz", T<tam_popu*8>, <tam_popu>I7)')
(nova_pop%populacao(j)%xcort, j=1, tam_popu)
write (27, '(150("-"))')
write (27, '("Estat: Apt max=", F8.4, ", Apt min=", F8.4, ",
med=", F8.4, ", soma=", F11.4, ", nmuta=", I7, ", ninv=", I7\)' ) &
max, min, media, soma_apti, nmutacao, ninv
write (27, '( " , ncruza= ", I7)') ncruza
write (27, '(150("="))')
!fim saida colunas
! FIM
REPORT*****
*****

velh_pop=nova_pop !avança a geração
do j=1, tam_popu
  write (8, 210, REC=j) velh_pop%populacao(j)
! 'velh_pop.txt'
  write (9, 220, REC=j) velh_pop%populacao(j)%aptidao
! aptidao.TXT
enddo
! if (geracao.ge.maxgen) goto 110
geracao = geracao+1
ponteiro = 3
write (5, '(I8)', REC=2) ponteiro
goto 5
! FIM MAIN
PROGRAM*****
****

!100 stop 'Erro!'
!110 pause 'FIM!'
!para salvar *pop%populacao(j) em velh_pop.txt e nova_pop.txt
" cromossomo, DV's, aptidão, pais1 e 2, ponto de cruzamento
210 format (<com_cromo>L1, <nvp>F8.4, F8.4, 3I4)
220 format (F10.4) !salva aptidão em 'aptidao.txt'
!muda de acordo com a macro do ansys !lê a aptidão em
'AGPAR.txt, onde o ansys salva' !230 format (<nvp*8>X, 2F8.4)

```



```

230  format (10X/,10X/,10X/,10X/,10X/,10X/,10X/,8X/,2F8.4)
240 format (F15.5)      !salva soma_apti em 'controle.txt'
!  salva as DV's para o próximo loop em AGPAR.txt !muda de acordo
com a macro do ansys !velh_pop%populacao(j)%x
260 format (10F8.4/, 10F8.4/, 8F8.4/, 10F8.4/, 10F8.4/, 8F8.4/,
4F8.4/, 3F8.4)
!250 format (<com_cromo>X,A<(nvp+1)*8+12>) !100+41*8+12 =
<com_cromo+(nvp+1)*8+15>

      end program AG
!      #####
!      SUBROUTINE WRITEcromo
*****
!      { Write a chromosome as a string of 1's (true's) and 0's
(false's) }

      subroutine writecromo (cromo) !,com_cromo)
      use parametros
      logical cromos(com_cromo)
      integer i

      do i=com_cromo,1,-1
        if (cromo(j)) then
          write (26, '("1",\)' )
        else
          write (26, '("0",\)' )
        endif
      enddo
      return
      end  subroutine writecromo

!      SUBROUTINE
STATISTICS*****
**
      subroutine statistics (max,media,min,soma_apti,pop)
      use parametros
      implicit none
      logical cromos
      type individuo
      logical cromos(com_cromo)
      real x(nvp)                !fenótipo
      real aptidao                !valor função
objetivo
      integer pai1,pai2,xcort     !pais e ponto de cross
      end type  individuo

      type populacao
      type (individuo) :: populacao(tam_popu)
      end type  populacao

      integer i
      type (populacao) :: pop,velh_pop
      real max, media,min,aptidao,soma_apti

!      individuo 1 da população, índice aptidao
      soma_apti=pop%populacao(1)%aptidao

```

```

min=pop%populacao(1)%aptidao
max=pop%populacao(1)%aptidao

!      loop para aptidao max e min
do i=2,tam_popu
    soma_apti=soma_apti+pop%populacao(i)%aptidao
    !acumula soma de aptidao; pop(j,1)=aptidao
    if (pop%populacao(i)%aptidao.gt.max)
max=pop%populacao(i)%aptidao      !novo max
    if (pop%populacao(i)%aptidao.lt.min)
min=pop%populacao(i)%aptidao      !novo min
    enddo
    media=soma_apti/tam_popu

    return
end subroutine

!      function seleciona
*****
!      Seleciona um indivíduo "String" via roda de roleta
integer function seleciona(soma_apti,pop)
USE DFLIB
use parametros

implicit none
TYPE individuo
    logical cromosoma(com_cromo)                !Genótipo
    real x(nvp)
    !fenótipo
    real aptidao                                !valor função
objetivo
    integer pai1,pai2,xcort                      !pais e ponto de
cross
END TYPE  individuo

type populacao
type (individuo) :: populacao(tam_popu)
END TYPE  populacao

integer i, duplic,critparada
real partsum, n_ran, rnd ,soma_apti, maxloc
type (populacao) :: pop

!      Seleciona
obrigatoriamente o 1 individuo como o melhor
!      maxloc=0.0
!loop para aptidao max
!      if (duplic.eq.1) then
!          do j=1,tam_popu
!              if
(pop%populacao(j)%aptidao.gt.maxloc) then
!
maxloc=pop%populacao(j)%aptidao !novo max
!
seleciona=j
!
endif
!      enddo

```

```

!           !           return
!           !           endif

!
!   roleta!*****
*****
      partsum=0.0;i=0;critparada=tam_popu
      CALL RANDOM_NUMBER(N_RAN)
      rnd = n_ran*soma_apti
10     i=i+1
      !índice da população
      partsum=partsum+pop%populacao(i)%aptidao      !Acha posição da
roda
      if (partsum.GE.rnd) goto 30
      if (i.EQ.critparada) goto 30
      goto 10
30     seleciona=i
      !Seleciona o n do indivíduo
      return
      end function

!   SUBROUTINE
crossover*****
**
!   Cruza 2 strings "pais" e substitui por 2 filhos
      subroutine crossover (pail, pai2, child1, child2, & !-->
cromossomos
               ncruza, nmutacao, jcruza)
      use parametros
      USE DFLIB
      implicit none
      logical pail(com_cromo),pai2(com_cromo),child1(com_cromo)
      logical child2(com_cromo),aux(com_cromo)
      logical moeda,mutation
      integer i ,jcruza , ncruza , nmutacao
      real n_ran

!   print *, "Cruzando..."
      if (moeda(pcruza)) then                                !Cruza com
prabilidade pcruza
40         CALL RANDOM_NUMBER(N_RAN)
            jcruza=nint(n_ran*(com_cromo-1))!chuta um ponto de
cruzamento entre 1 e com_cromo - 1
            if (jcruza.eq.0) goto 40
            read (5, '(I12)',REC=10)ncruza
            ncruza = ncruza+1
            write (5, '(I12)',REC=10)ncruza
      else
            jcruza = com_cromo
      endif

!   CRUZA OS INDIVÍDUOS E EVENTUALMENTE MUTA
!   primeira mudança, 1 para 1 e 2 para 2
      do i=1,jcruza
            child1(i)=mutation(pail(i),nmutacao)
            child2(i)=mutation(pai2(i),nmutacao)

```

```

        enddo

!      segunda mudança, 1 para 2 e 2 para 1
      if (jcruza.ne.com_cromo) then
        do i=jcruza+1,com_cromo              !gene j do
cromossomo
          child1(i)=mutation(pai2(i),nmutacao)
          child2(i)=mutation(pai1(i),nmutacao)
        enddo
      endif

!      Inverte o cromossomo                    30/10/02_____
      if (moeda(pinv)) then
        aux=child1
        do i=1,com_cromo
          child1(i)=child1(com_cromo)
        enddo
        ninv = ninv+1
      endif
      write (5, '(I12)',REC=14) ninv
!      _____

      return
      end subroutine !crossover

!      function MUTATION
*****
!      Muta um gene (alelo) com prababilidade "p" e conta o n de
mutações
      logical function mutation(alleleval,nmutacao)
      use parametros
      implicit none
      logical mutate, moeda, alleleval
      integer nmutacao

      mutation = alleleval
      mutate = moeda(pmutacao)
      if (mutate) then
        nmutacao = nmutacao+1
        write (5, '(I12)',REC=12)nmutacao
        if (alleleval) then
          mutation = .false.
        else
          mutation = .true.
        endif
      endif
      return
      end function

!      function moeda (joga
moeda)*****
      function moeda(p)
      USE DFLIB
      logical :: moeda
      real, intent(in) :: p
      real n_ran

```

```

        moeda=.false.
        CALL RANDOM_NUMBER(N_RAN)
        if (n_ran.le.p) moeda=.true.
        return
    end function

! Subrotina decodifica
ASA*****
subroutine decodifica (cromo,modelo)
use parametros
implicit none
integer k, accum,locus,m,n,cam,i,powerof2
real modelo(nvp)
logical cromocom_cromo)

n=0
m=0
! do cam = 1, 1 !se extra e intra = 2
! do i=1,ncamadas !n de camadas
! do locus = 1,nvp-5 ,2 !cada locus é uma variável de
projeto (as 56 DV's da casca +2 da alma: 63-5)
accum=1.0
powerof2=1
do k=1,3 !k=1 até o n. de bits que definem
cada  $\theta$ 
m=m+1 !posição no cromossomo
if (cromo(m)) accum=accum+powerof2
!converte de binário para deca
powerof2=powerof2*2
end do
n=n+1
 $\theta$ tec: select CASE (accum)
CASE (1)
modelo(n)=0 ! $\theta$ 
CASE (2)
modelo(n)=80
CASE (3)
modelo(n)=22
CASE (4)
modelo(n)=34
CASE (5)
modelo(n)=45
CASE (6)
modelo(n)=60
CASE (7)
modelo(n)=75
CASE (8)
modelo(n)=90
CASE DEFAULT
stop "Erro na decodificação  $\theta$ !"
END select  $\theta$ tec

accum=1.0
powerof2=1

```

```

do k=4,6 !bits que definem a espessura de cada
lamina da casca
    m=m+1
    if (cromo(m)) accum=accum+powerof2
!converte de binário para deca
    powerof2=powerof2*2
end do !
n=n+1
espessura: select CASE (accum) !em milímetros
CASE (1)
modelo(n) = 0.20 !espessura
CASE (2)
modelo(n) = 0.25 !espessura
CASE (3)
modelo(n) = 0.30 !espessura
CASE (4)
modelo(n) = 0.35 !espessura
CASE (5)
modelo(n) = 0.40
CASE (6)
modelo(n) = 0.45
CASE (7)
modelo(n) = 0.5
CASE (8)
modelo(n) = 0.55
CASE DEFAULT
stop "Erro na decodificação esp!"
END select espessura
enddo !locus

do locus = 1,2 !DV's da espessura das mesas sup e
inf da longarina
    accum=1.0
    powerof2=1
do k=1,5 !bits que definem a espessura da
longarina
    m=m+1
    if (cromo(m)) accum=accum+powerof2
!converte de binário para deca
    powerof2=powerof2*2
end do !n de componentes
n=n+1
espessuralong: select CASE (accum)
CASE (1)
modelo(n)= 0.5 !espessura em
milímetros
CASE (2)
modelo(n) = 1.0 !espessura
CASE (3)
modelo(n) = 1.5 !espessura
CASE (4)
modelo(n) = 2.0 !espessura
CASE (5)
modelo(n) = 2.5 !espessura
CASE (6)
modelo(n) = 3.0 !espessura

```

```

CASE (7)
modelo(n) =      3.5 !espessura
CASE (8)
modelo(n) =      4.0 !espessura
CASE (9)
modelo(n) =     04.5 !espessura
CASE (10)
modelo(n) =      5.0 !espessura
CASE (11)
modelo(n) =      5.5 !espessura
CASE (12)
modelo(n) =      6.  !espessura
CASE (13)
modelo(n) =      6.5 !espessura
CASE (14)
modelo(n) =      7.  !espessura
CASE (15)
modelo(n)=      7.5 !espessura
CASE (16)
modelo(n) =      8.  !espessura
CASE (17)
modelo(n) =      9.  !espessura
CASE (18)
modelo(n) =     10.  !espessura
CASE (19)
modelo(n) =     12.  !espessura
CASE (20)
modelo(n) =     14.  !espessura
CASE (21)
modelo(n) =     16.  !espessura
CASE (22)
modelo(n) =     18.  !espessura
CASE (23)
modelo(n) =     20.  !espessura
CASE (24)
modelo(n) =     23.  !espessura
CASE (25)
modelo(n)=     26.  !espessura
CASE (26)
modelo(n) =     29.  !espessura
CASE (27)
modelo(n) =     32.  !espessura
CASE (28)
modelo(n) =     35.  !espessura
CASE (29)
modelo(n) =     38.  !espessura
CASE (30)
modelo(n) =     41.  !espessura
CASE (31)
modelo(n) =     44.  !espessura
CASE DEFAULT
modelo(n) =     05.5 !espessura
!      stop "Erro na decodificação esp!"
END select espessuralong

      enddo
! Número de camadas

```

```

do locus = 1,3 !DV's da espessura das mesas sup e
inf da longarina
    accum=1.0
    powerof2=1
    do k=1,2 !bits que definem a espessura da
longarina
        m=m+1
        if (cromo(m)) accum=accum+powerof2
!converte de binário para deca
        powerof2=powerof2*2
    end do !n de componentes
    n=n+1
    ncamadas: select CASE (accum)
        CASE (1)
            modelo(n)= 5 !n camadas
        CASE (2)
            modelo(n) = 7
        CASE (3)
            modelo(n) = 9
        CASE (4)
            modelo(n) = 11
        CASE DEFAULT
            modelo(n) = 7
    !
    stop "Erro na decodificação
ncamadas!"
END select ncamadas

    enddo
!
    enddo !i
!
    enddo !cam extra e intra
    !do j=1,5
    espessura da longarina
    return
end subroutine
!
function calc_aptid
*****
!O AG maximiza essa função
real function calc_aptid(tsai,obj)
use populdef
real tsai,obj
real coef,n
!PARA TESTE, SAI A SOMA DAS DV'S EM OBJ
!
Se tsai>1 então falha
!Para ansys%%%%%%%%%%%%%%

    if (obj.eq.0.0) then
        print *, 'ERRO!! Volume igual a ZERO'
        obj =0.00001
    endif
!aumentar o peso, sensibilidade de obj na aptidao
! Penalidade
    if (tsai.le.0.9) calc_aptid =  $f(x_{max})$  - (obj+(tsai)/1000)

    if (tsai.gt.0.9) calc_aptid = 0.85* $f(x_{max})$  - (obj+(tsai-
0.9)/40)

    if (calc_aptid.gt.999) calc_aptid = 999
    if (calc_aptid.lt.0) calc_aptid = 0

```



```

        return
    end function
#####
#####

subroutine scalepop (max,media,min,soma_apti,pop)

use parametros
implicit none
integer i
real a,b
logical cromosoma
type individuo
    logical cromosoma(com_cromosoma)
    real x(nvp) !fenótipo
    real aptidao !valor função
objetivo
    integer pai1,pai2,xcort !pais e ponto de cross
end type individuo

type populacao
    type (individuo) :: populacao(tam_popu)
end type populacao

type (populacao) :: pop
real max, media,min,aptidao,soma_apti

call prescale(max, media, min, a,b) !Calcula derivada e
intersecção para a função

soma_apti = 0.0
do i =1, tam_popu
    pop%populacao(i)%aptidao = a *
pop%populacao(i)%aptidao + b !escala(objective,a,b)
    soma_apti = soma_apti + pop%populacao(i)%aptidao
ENDDO
end subroutine

#####
#####
subroutine prescale(umax,umedia,umin,a,b)
! {Calcula coeficientes de escalonamento para
escalonamento linear (a,b)}
real, parameter :: fmultiple = 4.0 ! multiplo da
aptidão é 2.
real delta !Divisor
Real umax, umin, umedia ,a ,b

if (umin.gt.(fmultiple*umedia - umax) / (fmultiple - 1.0))
then !Teste não negativo
    !Escalonamento normal
    delta = umax -umedia
    if (delta.eq.0) delta = 0.000001
    a = (fmultiple - 1.0) *umedia / delta
    b = umedia * (umax - fmultiple * umedia) / delta

```



```

*VREAD,proj_va(1),          AGPAR,txt,C:\AG-Ansys\ansysopt\mod-
final\,,10,,,0 !NSKIP - Reads data and produces an array parameter
vector
(10F8.4)
01_1  =  proj_va(1)
01_2  =  proj_va(3)
01_3  =  proj_va(5)
01_4  =  proj_va(7)
01_5  =  proj_va(9)
esp1_1      =  proj_va(2)/1000  !Transformar os parâmetros de
milímetros em metros
esp1_2      =  proj_va(4)/1000
esp1_3      =  proj_va(6)/1000
esp1_4      =  proj_va(8)/1000
esp1_5      =  proj_va(10)/1000
*VREAD,proj_va(1),          AGPAR,txt,C:\AG-Ansys\ansysopt\mod-
final\,,10,,,1 !NSKIP - Reads data and produces an array parameter
vector
(10F8.4)
02_1  =  proj_va(1)          !Transformar os parâmetros
de milímetros em metros
02_2  =  proj_va(3)
02_3  =  proj_va(5)
02_4  =  proj_va(7)
02_5  =  proj_va(9)
esp2_1      =  proj_va(2)/1000
esp2_2      =  proj_va(4)/1000
esp2_3      =  proj_va(6)/1000
esp2_4      =  proj_va(8)/1000
esp2_5      =  proj_va(10)/1000
*VREAD,proj_va(1),          AGPAR,txt,C:\AG-Ansys\ansysopt\mod-final\,,8,,2
!NSKIP - Reads data and produces an array parameter vector
(8F8.4)
03_1  =  proj_va(1)          !Transformar os parâmetros
de milímetros em metros
03_2  =  proj_va(3)
03_3  =  proj_va(5)
03_4  =  proj_va(7)
esp3_1      =  proj_va(2)/1000
esp3_2      =  proj_va(4)/1000
esp3_3      =  proj_va(6)/1000
esp3_4      =  proj_va(8)/1000

*VREAD,proj_va(1),          AGPAR,txt,C:\AG-Ansys\ansysopt\mod-
final\,,10,,,3 !NSKIP - Reads data and produces an array parameter
vector
(10F8.4)
04_1  =  proj_va(1)
04_2  =  proj_va(3)
04_3  =  proj_va(5)
04_4  =  proj_va(7)
04_5  =  proj_va(9)
esp4_1      =  proj_va(2)/1000  !Transformar os parâmetros de
milímetros em metros
esp4_2      =  proj_va(4)/1000
esp4_3      =  proj_va(6)/1000
esp4_4      =  proj_va(8)/1000
esp4_5      =  proj_va(10)/1000
*VREAD,proj_va(1),          AGPAR,txt,C:\AG-Ansys\ansysopt\mod-
final\,,10,,,4 !NSKIP - Reads data and produces an array parameter
vector

```

```

(10F8.4)
05_1 = proj_va(1)                                !Transformar os parâmetros
de milímetros em metros
05_2 = proj_va(3)
05_3 = proj_va(5)
05_4 = proj_va(7)
05_5 = proj_va(9)
esp5_1 = proj_va(2)/1000
esp5_2 = proj_va(4)/1000
esp5_3 = proj_va(6)/1000
esp5_4 = proj_va(8)/1000
esp5_5 = proj_va(10)/1000
*VREAD,proj_va(1), AGPAR,txt,C:\AG-Ansys\ansysopt\mod-final\,,8,,5
!NSKIP - Reads data and produces an array parameter vector
(8F8.4)
06_1 = proj_va(1)                                !Transformar os parâmetros
de milímetros em metros
06_2 = proj_va(3)
06_3 = proj_va(5)
06_4 = proj_va(7)
esp6_1 = proj_va(2)/1000
esp6_2 = proj_va(4)/1000
esp6_3 = proj_va(6)/1000
esp6_4 = proj_va(8)/1000

*VREAD,proj_va(1), AGPAR,txt,C:\AG-Ansys\ansysopt\mod-final\,,4,,6
!ESSE ÚLTIMO 2 É O N DE LINHAS A PULAR!!!!!!
(4F8.4)
0mesa = proj_va(1)
espal = proj_va(2)/1000
espmsup = proj_va(3)/1000
espminf = proj_va(4)/1000

*VREAD,proj_va(1), AGPAR,txt,C:\AG-Ansys\ansysopt\mod-final\,,3,,7
!ESSE ÚLTIMO 2 É O N DE LINHAS A PULAR!!!!!!
(3F8.4)
ncam_1= proj_va(1)
ncam_2= proj_va(2)
ncam_3= proj_va(3)

/PREP7

!keyopt 2=0 --> 12+(3*NL) ctes:
!
!
NL,LSYM,
LP1,LP2,ElasFundStif,,,,,,,,,,,,MAT,0,ESP CAMADA 1,MAT,...CAMADA
2 ..

!Set 1 Extra_raiz-----
- R,R5.0, 1,LOC, 1, ncam_1+2 ,1 , 0 ,0
!Nlayers, LP1(saídas para essa camada em especial (LP2 tb))
!LP2,EFS,...
R,R5.0, 1,LOC, 13, 1 , 01_1 , esp1_1
!Extra
R,R5.0, 1,LOC, 16, 1 , 01_5 , esp1_5
R,R5.0, 1,LOC, 19, 1 , 0.0 , 0.0
!Zera os parâmetros para depois redefinir
R,R5.0, 1,LOC, 22, 1 , 0.0 , 0.0
R,R5.0, 1,LOC, 25, 1 , 0.0 , 0.0
R,R5.0, 1,LOC, 28, 1 , 0.0 , 0.0
*IF,ncam_1,ge,5, THEN

```

```

        R,R5.0,      1,LOC,      19,  1  ,  θ1_2      , esp1_2
*endif
*IF,ncam_1,ge,7, THEN
        R,R5.0,      1,LOC,      22,  1  ,  θ1_3      , esp1_3
*endif
*IF,ncam_1,ge,9, THEN
        R,R5.0,      1,LOC,      25,  1  ,  θ1_4      , esp1_4
*endif
*IF,ncam_1,ge,11, THEN
        R,R5.0,      1,LOC,      28,  1  ,  θ1_5      , esp1_5
*endif
        R,R5.0,      1,LOC,16+3*(ncam_1+2-3)/2,  3  ,  0  ,  0.006
        !Espuma

!Set  2  Extra_meio-----
-
        R,R5.0,      2,LOC,      1,  ncam_2  ,  1  ,  0
        R,R5.0,      2,LOC,      13,  1  ,  θ2_1      , esp2_1
        R,R5.0,      2,LOC,      16,  1  ,  0.0      , 0.0
        R,R5.0,      2,LOC,      19,  1  ,  0.0      , 0.0
        !Zera os parâmetros para depois redefinir
        R,R5.0,      2,LOC,      22,  1  ,  0.0      , 0.0
        R,R5.0,      2,LOC,      25,  1  ,  0.0      , 0.0
*IF,ncam_2,ge,5, THEN
        R,R5.0,      2,LOC,      16,  1  ,  θ2_2      , esp2_2
*endif
*IF,ncam_2,ge,7, THEN
        R,R5.0,      2,LOC,      19,  1  ,  θ2_3      , esp2_3
*endif
*IF,ncam_2,ge,9, THEN
        R,R5.0,      2,LOC,      22,  1  ,  θ2_4      , esp2_4
*endif
*IF,ncam_2,ge,11, THEN
        R,R5.0,      2,LOC,      25,  1  ,  θ2_5      , esp2_5
*endif
        R,R5.0,      2,LOC,      16+3*(ncam_2-3)/2,  3  ,  0  ,  0.006
        !Espuma

!Set  3  Extra_ponta-----
-
        R,R5.0,      3,LOC,      1,  ncam_3  ,  1  ,  0
        R,R5.0,      3,LOC,      13,  1  ,  θ3_1      , esp3_1
        R,R5.0,      3,LOC,      16,  1  ,  0.0      , 0.0
        !Zera os parâmetros para depois redefinir
        R,R5.0,      3,LOC,      19,  1  ,  0.0      , 0.0
        R,R5.0,      3,LOC,      22,  1  ,  0.0      , 0.0
*IF,ncam_3,ge,5, THEN
        R,R5.0,      3,LOC,      16,  1  ,  θ3_2      , esp3_2
*endif
*IF,ncam_3,ge,7, THEN
        R,R5.0,      3,LOC,      19,  1  ,  θ3_3      , esp3_3
*endif
*IF,ncam_3,ge,9, THEN
        R,R5.0,      3,LOC,      22,  1  ,  θ3_4      , esp3_4
*endif
        R,R5.0,      3,LOC, 16+3*(ncam_2-3)/2,  3  ,  0  ,  0.006
        !Espuma

!Set  4  Intra_raiz-----
-
        R,R5.0,      4,LOC,      1,  ncam_1+2  ,  1  ,  0
        !Nlayers, LP1(saídas para essa camada em especial (LP2 tb))

```

```

!LP2,EFS,...
R,R5.0,      4,LOC,      13,  1  ,  θ4_1      , esp4_1
R,R5.0,      4,LOC,      16,  1  ,  θ4_5      , esp4_5
R,R5.0,      4,LOC,      19,  1  ,  0.0        , 0.0
!Zera os parâmetros para depois redefinir
R,R5.0,      4,LOC,      22,  1  ,  0.0        , 0.0
R,R5.0,      4,LOC,      25,  1  ,  0.0        , 0.0
R,R5.0,      4,LOC,      28,  1  ,  0.0        , 0.0
*IF,ncam_1,ge,5, THEN
R,R5.0,      4,LOC,      19,  1  ,  θ4_2      , esp4_2
*endif
*IF,ncam_1,ge,7, THEN
R,R5.0,      4,LOC,      22,  1  ,  θ4_3      , esp4_3
*endif
*IF,ncam_1,ge,9, THEN
R,R5.0,      4,LOC,      25,  1  ,  θ4_4      , esp4_4
*endif
*IF,ncam_1,ge,11,THEN
R,R5.0,      4,LOC,      28,  1  ,  θ4_5      , esp4_5
*endif
R,R5.0,      4,LOC,16+3*(ncam_1+2-3)/2,  3  ,  0  , 0.006
!Espuma
!Set  5  Intra_meio-----
-      R,R5.0,      5,LOC,      1,  ncam_2  ,  1  , 0
R,R5.0,      5,LOC,      13,  1  ,  θ5_1      , esp5_1
R,R5.0,      5,LOC,      16,  1  ,  0.0        , 0.0
!Zera os parâmetros para depois redefinir
R,R5.0,      5,LOC,      19,  1  ,  0.0        , 0.0
R,R5.0,      5,LOC,      22,  1  ,  0.0        , 0.0
R,R5.0,      5,LOC,      25,  1  ,  0.0        , 0.0
*IF,ncam_2,ge,5, THEN
R,R5.0,      5,LOC,      16,  1  ,  θ5_2      , esp5_2
*endif
*IF,ncam_2,ge,7, THEN
R,R5.0,      5,LOC,      19,  1  ,  θ5_3      , esp5_3
*endif
*IF,ncam_2,ge,9, THEN
R,R5.0,      5,LOC,      22,  1  ,  θ5_4      , esp5_4
*endif
*IF,ncam_2,ge,11,THEN
R,R5.0,      5,LOC,      25,  1  ,  θ5_5      , esp5_5
*endif
R,R5.0,      5,LOC,      16+3*(ncam_2-3)/2,  3  ,  0  , 0.006
!Espuma
!Set  6  Intra_ponta-----
-      R,R5.0,      6,LOC,      1,  ncam_3  ,  1  , 0
R,R5.0,      6,LOC,      13,  1  ,  θ6_1      , esp6_1
R,R5.0,      6,LOC,      16,  1  ,  0.0        , 0.0
!Zera os parâmetros para depois redefinir
R,R5.0,      6,LOC,      19,  1  ,  0.0        , 0.0
R,R5.0,      6,LOC,      22,  1  ,  0.0        , 0.0
*IF,ncam_3,ge,5, THEN
R,R5.0,      6,LOC,      16,  1  ,  θ6_2      , esp6_2
*endif
*IF,ncam_3,ge,7, THEN
R,R5.0,      6,LOC,      19,  1  ,  θ6_3      , esp6_3
*endif
*IF,ncam_3,ge,9, THEN
R,R5.0,      6,LOC,      22,  1  ,  θ6_4      , esp6_4
*endif

```

```

R,R5.0,          6,LOC, 16+3*(ncam_2-3)/2, 3, 0 , 0.006
!Espuma
!Set 7 Mesa_sup-----
-
R,R5.0,          7,LOC, 1, 1 , 0 , 0
R,R5.0,          7,LOC, 13, 2 , 90 , espmsup
!Set 8 Alma-----
-
R,R5.0,          8,LOC, 1, 5 , 1 , 0
R,R5.0,          8,LOC, 13, 1 , 45 , espal
R,R5.0,          8,LOC, 16, 1 , -45 , espal
R,R5.0,          8,LOC, 19, 3 , 0 , 0.006
!Espuma
!Set 9 Mesa_inf-----
-
R,R5.0,          9,LOC, 1, 1 , 0 , 0
R,R5.0,          9,LOC, 13, 2 , 90 , espminf
!Set 10 Mesa inf longarina raiz (reforço)-----
-
R,R5.0,         10,LOC, 1, 1 , 0 , 0
R,R5.0,         10,LOC, 13, 2 , 90 , espminf*1.4
!Reforço
!Set 11 Bordo de ataque até long raiz (reforço)-----
-
! É = ao set1, mais uma camada
R,R5.0,         11,LOC, 1, ncam_1+2 ,1 , 0 ,0 !NLayers,
LP1(saídas para essa camada em especial (LP2 tb))
R,R5.0,         11,LOC, 13, 1 , 01_1 , esp1_1
R,R5.0,         11,LOC, 16, 1 , 01_5 , esp1_5
R,R5.0,         11,LOC, 19, 1 , 01_4 , esp1_4
!Camada extra
R,R5.0,         11,LOC, 22, 1 , 0.0 , 0.0
R,R5.0,         11,LOC, 25, 1 , 0.0 , 0.0
R,R5.0,         11,LOC, 28, 1 , 0.0 , 0.0
R,R5.0,         11,LOC, 31, 1 , 0.0 , 0.0
*IF,ncam_1,ge,5, THEN
R,R5.0,         11,LOC, 22, 1 , 01_2 , esp1_2
*endif
*IF,ncam_1,ge,7, THEN
R,R5.0,         11,LOC, 25, 1 , 01_3 , esp1_3
*endif
*IF,ncam_1,ge,9, THEN
R,R5.0,         11,LOC, 28, 1 , 01_4 , esp1_4
*endif
*IF,ncam_1,ge,11,THEN
R,R5.0,         11,LOC, 31, 1 , 01_5 , esp1_5
*endif
R,R5.0,         11,LOC,16+3*(ncam_1+2-3)/2, 3 , 0 , 0.006
!Espuma
!-----
-
!Set 12 Bordo de ataque meio (reforço) elementos não modif-----
-R,R5.0,        12,LOC, 1, 1.00000000 , 0.00000000 ,
0.00000000
R,R5.0,        12,LOC, 4, 0.00000000 , 0.00000000 ,
0.00000000
!Set 13 Nervuras-----
-
-R,R5.0,        13,LOC, 1, 5 , 1 , 0
R,R5.0,        13,LOC, 13, 1 , 45 , espal
R,R5.0,        13,LOC, 16, 1 , -45 , espal

```

```

R,R5.0,          13,LOC,          19,   3   ,   0          , 0.006
!Espuma

finish

/solu
antype,static
solve
finish

/post1
*STATUS
set,last
/COM, Etable,nome,nmisc,2 cria uma tabela chamada <nome> com o
valor max do criterio de
/COM, falha para cada elemento
etable,MAXFC,nmisc,2

/COM, Etable,nome,nmisc,3 cria uma tabela chamada <nome> com o
layer onde o max criterio de
/COM, falha ocorre para cada elemento

etable,layFC,nmisc,3
ETABLE,VOLU,VOLU          !Cria tabela chamada VOLU com os volumes
dos elementos
SSUM          !Soma as colunas das tabelas
*get,VOLUME,ssum,,item,VOLU
esort,etab,MAXFC,,0
*GET,FCMAX,SORT,,MAX
FINISH

*CFOPEN,  AGPAR,txt,C:\AG-Ansys\ansysopt\mod-final\  !Fname,  Ext,
Dir, Loc - Opens a "command" file. !!!!!!!!!!!!!!!
*VWRITE,01_1,esp1_1,01_2,
esp1_2,01_3,esp1_3,01_4,esp1_4,01_5,esp1_5
(10F8.4)
*VWRITE,02_1,esp2_1,02_2,
esp2_2,02_3,esp2_3,02_4,esp2_4,02_5,esp2_5
(10F8.4)
*VWRITE,03_1,esp3_1,03_2, esp3_2,03_3,esp3_3,03_4,esp3_4
(8F8.4)
*VWRITE,04_1,esp4_1,04_2,
esp4_2,04_3,esp4_3,04_4,esp4_4,04_5,esp4_5
(10F8.4)
*VWRITE,05_1,esp5_1,05_2,
esp5_2,05_3,esp5_3,05_4,esp5_4,05_5,esp5_5
(10F8.4)
*VWRITE,06_1,esp6_1,06_2, esp6_2,06_3,esp6_3,06_4,esp6_4
(8F8.4)
*VWRITE,0mesa,espal,espmsup,espminf
(4F8.4)
*VWRITE,ncam_1,ncam_2,ncam_3
(3F8.4)
*VWRITE,fcmax,volume
(2F8.4)
*CFCLOSE  ! Closes the "command" file
/output,ANSYS-resumo_par,txt,C:\AG-Ansys\ansysopt\mod-final\,APPEND
rlist
*status,loop
*status
/output

```


*enddo

GLOSSÁRIO

Anisotrópico	Material que exhibe diferentes propriedades ao longo de eixos em diferentes direções.
Autoclave	Vaso de pressão e calor usado para compactar e curar a resina de laminados.
Cura	Mudança irreversível das propriedades da resina por reação química. Após a cura, a resina passa a ter comportamento de termofixo. Normalmente é obtida pela adição de um catalisador que dá início ao processo. A ativação desse catalisador pode ser feita por ação de calor ou pela adição de um acelerador.
Efeméride	Posição de um corpo no espaço tabulada no tempo.
Epistasia	Interação entre dois ou mais locus gênicos que geram fenótipos diferentes aos esperados se cada locus atuasse de forma independente. Ou seja, a epistasia envolve supressão gênica inter-alélica, isto é, o efeito que um locus gênico tem de encobrir sobre a expressão de outro locus gênico.
FLIR	sistema imageador infravermelho termal é um dispositivo capaz de coletar, detectar e discriminar a radiação infravermelha termal emitida pelos alvos, sob a plataforma na qual está instalado e gerar uma imagem correspondente.
Flutter	Tipo de vibração de origem aeroelástica, auto-excitada, que ocorre quando existe acoplamento entre o carregamento aerodinâmico, dependente da deformação, e os modos de vibrar da estrutura.
Goniômetro	Instrumento para medir ângulos, de muitos tipos; empregado em artilharia, cristalografia, navegação e topografia.
Magnêto metro	Agulha magnética que gira levemente sobre um pivô e se emprega para medir um campo ou momento magnéticos.
Omnidirecional	Antena ou onda aptas a emitir ou a captar em, ou de qualquer direção.
Radiotelemétrico	Relativo ao método de avaliação de distâncias por meio de ondas eletromagnéticas emitidas e recebidas por eco sobre determinado objeto; uma das aplicações do radar para estabelecer o ponto eletrônico no mar.
SAR	Radar de abertura sintética. Radar de uma plataforma móvel que realiza uma soma coerente dos ecos recebidos enquanto ilumina o alvo de diferentes posições ao longo do seu trajeto (linha base “SAR”) para atingir uma resolução angular equivalente àquela provida por uma antena

tendo um comprimento igual à linha base. É requerido um “focamento” SAR para compensar a mudança de fase devido à variação de intervalo de alvo durante a medida: SAR não focalizado (ou sistemas “DBS”) são limitados a linhas base menores com correspondentes resoluções degradadas.

Taxonomia Refere-se à classificação das coisas, e aos princípios subjacentes da classificação. A taxonomia é o sistema estabelecido pelos biólogos para separar todos os seres vivos em categorias, com espécies na base até chegar ao reino no topo.

XFOIL Um programa de CFD bidimensional para perfis.