

CONCEITOS BÁSICOS DO APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO E SUA APLICAÇÃO NO PROJETO AERODESIGN

João Carlos Correia Baptista Soares de Mello

Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, 24210-240, Niterói, RJ

Eliane Gonçalves Gomes

Programa de Engenharia de Produção – Universidade Federal do Rio de Janeiro
Caixa Postal 8183, 21032-970, Rio de Janeiro, RJ

Fabiana Rodrigues Leta

Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, 24210-240, Niterói, RJ

Raul Bernardo Vidal Pessolani

Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, 24210-240, Niterói, RJ

Resumo

O ensino de projeto mecânico concentra-se, principalmente, no dimensionamento de peças e componentes. A escolha de materiais, formas, modelos é muitas vezes deixada em segundo plano e atribuída a fatores como experiência ou bom senso. Neste trabalho pretende-se mostrar uma metodologia de auxílio a estas escolhas iniciais. Oriundo das chamadas “Ciências de Gestão”, o Auxílio Multicritério à Decisão pode ter um papel importante em projetos, ajudando a fazer as primeiras escolhas. Como estudo de caso escolheu-se a seleção da geometria de um trem de pouso de um avião miniaturizado usado em competição de alunos. Além do estudo de caso propriamente dito, é feita a apresentação dos conceitos básicos das metodologias multicritério e o referencial teórico do método usado (MACBETH).

Palavras-chave: Multicritério, Aerodesign, Projeto Mecânico, MACBETH.

Abstract

FAZER.

Keywords: Multicriteria, Aerodesign, Mechanical Project, MACBETH.

1. INTRODUÇÃO

Um projeto de engenharia pode ser definido como um conjunto de atividades que geram um produto, um sistema ou um processo. Nesse contexto,

um projeto do tipo aerodesign visa motivar alunos de graduação a agregarem conhecimentos de engenharia diante da necessidade de construir um aeromodelo apto a participar de uma competição

(Vidal-Pessolani et al., 2001). Diante de tal necessidade, os alunos são estimulados a estudar os conceitos técnicos envolvidos, conceber um modelo e estudar sua viabilidade, fabricar um protótipo e, por fim, talvez um dos aspectos mais interessantes deste tipo de projeto, habilitar-se a competir.

Tradicionalmente os projetos desse tipo podem ser classificados como projetos de ação tecnológica. Segundo Bazzo e Pereira (2000), a ação tecnológica consiste na solução de problemas práticos de engenharia que envolve o “conhecimento do estado da arte, que inclui o conhecimento científico e o conjunto de inventos, componentes, materiais e métodos de fabricação dominados, além das condições econômicas e mercadológicas”. Entretanto, este tipo de projeto pode ser explorado no âmbito da ação científica. A ação científica é iniciada com um conjunto de conhecimentos existentes que despertam a curiosidade, a formulação de hipóteses, a aplicação de hipóteses que são analisadas e experimentadas podendo gerar a prova.

Para exemplificar a possibilidade do projeto aerodesign não se ater apenas à metodologia convencional de ação tecnológica, apresenta-se o uso do Apoio Multicritério de Apoio à Decisão. Essa técnica permite realizar escolhas quando existem vários critérios, muitas vezes conflitantes.

No estudo de caso aqui apresentado, o objetivo é projetar um trem de pouso satisfatório. Verificou-se que os alunos eram capazes de dimensionar corretamente o trem de pouso desde que o seu modelo tivesse sido previamente escolhido. A grande dificuldade era exatamente a escolha deste modelo, feita de forma aleatória, ou por indicação direta do orientador. Esta dificuldade motivou o estudo das técnicas multicritério, em especial o método MACBETH (Bana e Costa & Vansnick, 1994) que, neste caso, se constitui em uma abordagem científica para os problemas das escolhas iniciais em projetos, antes de iniciar a fase de dimensionamento.

2. APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO

As Metodologias Multicritério de Apoio à Decisão (*Multicriteria Decision Aid* – MCDA) objetivam auxiliar analistas e decisores em situações nas quais há a necessidade de identificação de prioridades sob a ótica de múltiplos critérios, o que ocorre normalmente quando coexistem interesses em conflito (Gomes, 1999).

Os primeiros estudos formais nesse assunto apareceram após a Revolução Francesa com as publicações de Borda e Condorcet. Estes autores queriam resolver problemas em que várias pessoas opinavam, em especial, na situação da atribuição de penas a réus em um tribunal (Barba-Romero e Pomerol, 1997). Uma variação do método desenvolvido por Borda vem sendo exaustivamente usada em competições esportivas, sendo que os campeonatos de futebol usam uma pontuação conhecida por votação de Borda. A partir de 1970 começou a surgir uma maior formalização no Apoio Multicritério à Decisão que se firmou como área de Pesquisa Operacional.

Em um problema multicritério é necessário, em primeiro lugar, estabelecer claramente qual o objetivo da análise. Podem ser definidas quatro problemáticas multicritério: correta descrição do problema, ordenação, escolha e alocação em classes. Deve-se ainda definir as alternativas, os critérios, o método a ser usado e quem atua como decisor (aquele que emite juízos de valor sobre as alternativas e os critérios).

2.1. Conceitos Elementares

Em um problema multicritério vários agentes são atuantes. É preciso notar que sua definição é meramente didática, muitas vezes confundindo-se entre si.

Os componentes básicos de um problema de decisão multicritério são:

- **Decisores** – São os indivíduos que fazem escolhas e assumem preferências, como uma entidade

única, chamada de decisor, agente ou tomador de decisão.

- **Analista** – É a pessoa encarregada de interpretar e quantificar as opiniões dos decisores, estruturar o problema, elaborar o modelo matemático e apresentar os resultados para a decisão. Deve atuar em constante diálogo e interação com os decisores, em um processo de aprendizagem constante. Embora não seja recomendável, é comum que o analista seja um dos decisores.
- **Modelo** – É o conjunto de regras e operações matemáticas que permitem transformar as preferências e opiniões dos decisores em um resultado quantitativo
- **Alternativas** – Alternativas são ações globais, ou seja, ações que podem ser avaliadas isoladamente. Podem representar diferentes cursos de ação, diferentes hipóteses sobre a natureza de uma característica, diferentes conjuntos de características etc.
- **Crítérios** – Os critérios são as ferramentas que permitem a comparação das ações em relação a pontos de vista particulares (Roy, 1985). Bouyssou (1990) define um critério mais precisamente como uma função de valor real no conjunto A das alternativas, de modo que seja significativo comparar duas alternativas a e b de acordo com um particular ponto de vista, ou seja, é a expressão qualitativa ou quantitativa de um ponto de vista utilizado na avaliação das alternativas.

Cada alternativa possui um valor segundo cada critério. A cada critério estão associados um sentido de preferência (indica se o valor é tanto melhor quanto mais elevado – maximização – ou se o valor é tanto melhor quanto mais baixo – minimização); uma escala (por exemplo,

ótimo = 3; bom = 2; ruim = 1); uma estrutura de preferências.

Bouyssou (1993) propõe algumas normas para a construção de um critério.

- Os pontos de vista que formam a base das definições dos vários critérios devem ser compreendidos e aceitos por todos os atores do processo de decisão. Um critério que possua uma unidade física definida pode ser associado a um determinado ponto de vista, sendo um grande facilitador neste caso.
- Uma vez definido e aceito um ponto de vista, o método que permite avaliar os critérios para cada alternativa, também deve ser entendido e aceito por todos os atores do processo de decisão. Um modelo de avaliação simples e transparente deve ser a preocupação do analista.
- A escolha de um modo particular de construir um critério deve considerar a qualidade dos dados utilizados para sua construção. As comparações deduzidas dos critérios devem considerar elementos de determinação de incerteza, imprecisão e/ou inacurácia afetando os dados utilizados na construção.

2.2. Problemáticas de Apoio à Decisão

Roy e Bouyssou (1993) definem quatro problemáticas de apoio à decisão:

- **Problemática $P\delta$ (descrição ou cognição)** – Objetiva esclarecer a decisão por uma descrição em uma linguagem adequada;
- **Problemática $P\alpha$ (seleção)** – Tem como objetivo recomendar a escolha de uma alternativa;
- **Problemática $P\gamma$ (ordenação)** – O processo de decisão objetiva a recomendação de uma ordenação das alternativas;
- **Problemática $P\beta$ (alocação em classes)** – O objetivo do processo de seleção é recomendar a triagem das alternativas em categorias

(classes) preestabelecidas, podendo ser ordenadas ou não.

Em termos matemáticos, a problemática da ordenação significa estabelecer uma relação de pré-ordem no espaço \mathfrak{R}^n . Uma relação de pré-ordem é uma relação binária reflexiva, transitiva e total. No espaço unidimensional \mathfrak{R} , as relações “maior ou igual” e “menor ou igual” são relações de pré-ordem. Em \mathfrak{R}^n não existe uma infinidade de relações desse tipo, daí a necessidade conhecer preferências de um decisor para escolher uma das possíveis ordenações.

Já a problemática da divisão em classes corresponde a uma relação de equivalência, isto é, uma relação binária que seja reflexiva, simétrica e transitiva. A relação de igualdade é um exemplo de relação de equivalência no espaço unidimensional.

2.3. Estruturas de Preferências

As estruturas de preferência são definidas sobre o conjunto A das alternativas. São constituídas por um conjunto de relações binárias (H_1, \dots, H_N) sobre A , que satisfazem às exigências de exaustividade e exclusão mútua, isto é, dadas duas alternativas a e b de A , existe uma só relação H_i que se aplica ao par (Dias et al., 1996). As quatro relações fundamentais são indiferença (representada por I), preferência estrita (P), preferência fraca (Q) e incomparabilidade (R) (Roy e Bouyssou, 1993).

- **Indiferença** – $a I b$, significa que há razões que justificam a indiferença na escolha entre as duas alternativas.
- **Preferência estrita** – $a P b$, representa a existência de fatores que provam o favorecimento da alternativa a em relação à alternativa b .
- **Preferência fraca** – $a Q b$, demonstra a existência de dúvida entre $a I b$ e $a P b$.
- **Incomparabilidade** – $a R b$, representa a inexistência de situações que legitimem alguma das disposições anteriores.

2.4. Família de Critérios

Uma família de critérios é o conjunto de critérios utilizados em uma determinada situação de decisão, que deverá permitir modelar preferências em um nível global, multicritério (Dias et al., 1996). Roy e Bouyssou (1993) afirmam que três condições (“axiomas de Roy”) devem ser satisfeitas para a definição de uma família coerente de critérios: exaustividade, coerência entre preferências monocritério e multicritério ou condição de coesão, e não redundância.

- **Exaustividade** – Impõe a necessidade de descrever o problema levando em conta todos os aspectos relevantes. Segundo Roy e Bouyssou (1993), o axioma da exaustividade implica em considerar como indiferentes duas alternativas que apresentam desempenhos iguais em todos os critérios.
- **Coesão** – Obriga à correta análise de quais são os critérios de maximização e quais os de minimização. Supõe que se a alternativa a_1 apresenta desempenhos iguais aos da alternativa a_2 , excetuando-se o desempenho em um critério j em que a_1 é melhor que a_2 , então a_1 não poderá ser considerada pior que a alternativa a_2 , para todos os critérios.
- **Não Redundância** – Obriga a excluir critérios que estejam avaliando características já avaliadas por outro critério. Requer que não se possa retirar nenhum critério da família de critérios sem afetar as duas primeiras condições.

Bouyssou (1993) cita ainda duas importantes qualidades de uma família de critérios: *legibilidade*, isto é, uma família deve conter um número suficientemente pequeno de critérios de modo que o acesso a informações intercritérios seja facilitado na implementação de um procedimento de agregação; *operacionalidade*, isto é, a família deve ser considerada por todos os atores com

uma base para a continuidade do processo de apoio à decisão.

2.5. Matriz de Decisão

Quando estiverem definidos os critérios e as alternativas a considerar, pode-se construir uma matriz de decisão, considerada como a melhor organização para representar a relação entre critérios e alternativas. Esta matriz, definida para m alternativas (a_1, \dots, a_m) e n critérios (g_1, \dots, g_n), apresenta dimensão $m \times n$ e os seus elementos são os desempenhos, valores ou níveis de aceitabilidade de cada alternativa segundo cada critério.

Estes valores monocritério podem ter uma escala natural de medida (por exemplo, custos) ou uma escala subjetiva (por exemplo, conforto de um carro). Na matriz de decisão todos devem estar previamente quantificados e normalizados.

3. FASES DO PROCESSO DE APOIO À DECISÃO

Dias et al. (1996) identificam duas fases nos processos de apoio à decisão: a fase de estruturação e a fase de avaliação. Ainda pode ser identificada uma terceira etapa: a recomendação dos cursos de ação a serem seguidos.

3.1. Fase de Estruturação

Segundo Bana e Costa et al. (2000), a fase de estruturação representa cerca de 80% do total do problema.

Esta fase trata da formulação do problema e da identificação dos objetivos. Busca identificar, caracterizar e organizar os fatores considerados relevantes no processo de apoio à decisão. Envolve definir o(s) objetivo(s) do decisor, identificar as alternativas viáveis, estabelecer quais os critérios que vão intervir no processo de decisão, entre outras etapas que dependem de cada problema abordado. É uma etapa interativa e dinâmica, pois fornece uma linguagem comum aos decisores, o que possibilita a aprendizagem e o debate.

3.2. Fase de Avaliação

Esta fase pode ser dividida em uma fase de avaliação parcial das ações

(alternativas) segundo cada ponto de vista (critérios) e uma fase de avaliação global considerando as diversas avaliações parciais.

Para realizar a avaliação é necessário escolher um dos métodos disponíveis, tradicionalmente classificados em métodos para problemas multiatributo e multiobjetivo

Os problemas multiatributo lidam com alternativas discretas; os multiobjetivo consideram um espaço contínuo de alternativas.

Entre os problemas multiatributo é comum a classificação dos métodos usados em Escola Americana e Escola Francesa. A Escola Francesa, que tem como precursores os trabalhos de Condorcet, é baseada em relações de prevalência e nela se destacam os métodos das famílias ELECTRE (Roy, 1968, 1978; Roy e Shalka, 1984) e PROMETHEE (Brans et al., 1984).

Os métodos da Escola Americana, que têm base nos desenvolvimentos de Borda, reduzem os vários critérios a um critério síntese, na grande maioria das vezes através de uma soma ponderada. Devido à sua aparente simplicidade matemática gozam de grande popularidade. Nesta linha destacam-se os métodos AHP (Saaty, 1980), TODIM (Gomes, 1987), MACBETH (Bana e Costa & Vansnick, 1995, 1997) e UTA (Jacquet-Legreze e Siskos, 1982). Apesar da suposta simplicidade, estes métodos encontram alguma relutância por parte dos decisores, principalmente pela necessidade de atribuição de pesos. Um exemplo seria a atribuição de pesos aos critérios “custo de construção” e “probabilidade de acidentes fatais” no projeto de uma estrada. Atribuir esses pesos significaria especificar o preço de uma vida humana (Dias et al., 1996). Por outro lado, existe o problema oposto: uma vez dados os pesos, o decisor sente-se alijado do processo de decisão, sendo-lhe apresentado um resultado final do qual julga que não participou. Portanto, é necessária uma grande interatividade.

Já os problemas multiobjetivo são, via de regra, bem mais árduos do ponto de vista matemático, ainda que

exijam a presença constante do decisor. Se a preocupação do analista não for a complexidade matemática, mas a impossibilidade de o decisor fornecer informação coerente, deve-se procurar a interatividade dos problemas multiobjetivo, principalmente se aliados a um *software* de grande apelo visual, que permita ao decisor colocar implicitamente suas preferências e ir aprendendo ao longo do processo.

4. MÉTODOS MULTICRITÉRIO – ABORDAGEM MULTIATRIBUTO

Serão apresentados alguns métodos para solução de problemas multiatributo, em especial, métodos da chamada Escola Americana, com maior destaque ao método MACBETH.

4.1. Métodos de Eliminação Sequencial ou Métodos Elementares

4.1.1. Métodos Conjuntivos e Disjuntivos

São métodos de filtragem, que classificam as alternativas em dois grupos: aceitável ou inaceitável (Dias et al., 1996). Seja F_{max} o conjunto dos critérios a maximizar e F_{min} , o conjunto dos critérios a minimizar. Em uma primeira fase especificam-se os valores mínimos min_j para cada critério de F_{max} e valores máximos max_j para cada critério de F_{min} . A segunda fase é a de classificação das alternativas, onde se considera que uma alternativa a_i pertence à classe das aceitáveis se e somente se

$\forall j \in F_{max} \ g_j(a_i) \geq min_j$ e $\forall j \in F_{min} \ g_j(a_i) \leq max_j$, para o caso conjuntivo

$\forall j \in F_{max} \ g_j(a_i) \geq min_j$ ou $\forall j \in F_{min} \ g_j(a_i) \leq max_j$, para o caso disjuntivo

Estes métodos comparam uma alternativa com uma outra que pode ser considerada como padrão (max_j e min_j), para que o decisor verifique qual delas é a melhor.

Em alguns casos pode-se usar um sistema híbrido, exigindo que cada alternativa satisfaça pelo menos um determinado número de limiares.

4.1.2. Método de Dominância

Comparações sucessivas de pares de alternativas são realizadas com o objetivo de retirar do conjunto de alternativas todas as que forem dominadas, podendo ser extremamente útil na filtragem inicial de uma situação de escolha da melhor alternativa. Uma alternativa dominada nunca poderá ser considerada a melhor.

Uma alternativa a' é dominada por uma alternativa a'' se o desempenho de a'' for igual, ou melhor, que o de a' em todos os critérios, sendo estritamente melhor em pelo menos um critério.

O método de dominância leva ao conceito de Ótimo de Pareto, no qual busca-se o ótimo possível em contraponto ao ótimo absoluto da programação matemática. Uma alternativa é um ótimo de Pareto se for impossível passar desta alternativa para outra melhorando um critério sem piorar, pelo menos, um outro critério. Mostra-se que um ótimo de Pareto é uma alternativa não dominada.

4.1.3. Método Lexicográfico

Este método (pertencente à categoria dos métodos que comparam as alternativas para um único critério) parte do pressuposto que o decisor é capaz de ordenar os critérios por ordem de importância. Neste caso, uma alternativa é preferível a outra se seu desempenho for superior segundo o critério mais importante, independentemente dos outros critérios (Dias et al., 1996). No caso de desempenhos iguais neste critério mais importante, a comparação é feita para o segundo critério mais importante. Caso haja novo empate, recorre-se ao terceiro, e assim sucessivamente, conseguindo-se assim ordenar todas as alternativas.

Como exemplo pode-se citar o quadro de medalhas das Olimpíadas, no qual os países são ordenados segundo o 1º critério mais importante, o número de medalhas de ouro. No caso de empate, recorre-se ao 2º critério mais importante, o número de medalhas de prata; persistindo o empate, recorre-se ao

critério número de medalhas de bronze, 3º mais importante (Gomes et al., 2001).

4.2. Métodos de Ponderação

Os métodos mais utilizados são aqueles nos quais as preferências são agregadas de maneira aditiva e podem ser classificados como Métodos de Agregação por uma Função de Síntese. Utilizam uma função $V(a_i)$ que atribui a cada alternativa a_i de A um valor; quanto maior este valor, melhor é a alternativa (no caso maximização). Nestes métodos, considerando-se duas alternativas a' e a'' quaisquer:

$$a' P a'' \text{ se e somente se } V(a') > V(a'')$$

$$a' I a'' \text{ se e somente se } V(a') = V(a'')$$

O valor global de cada alternativa pode ser interpretado como um critério que sintetiza os desempenhos segundo todos os critérios. Este resultado caracteriza o conjunto de métodos chamados de Métodos da Escola Americana, dos quais o método da soma ponderada é um caso particular.

O modelo aditivo, considerado um dos mais simples desta categoria, apresenta algumas exigências em termos de independência entre critérios e informações necessárias (coeficientes de ponderação). Este modelo apresenta caráter compensatório, ou seja, o bom desempenho de uma alternativa em um dado critério pode ser compensado pelo seu mau desempenho em um outro critério, podendo gerar indiferença entre duas alternativas. Dentre os métodos que determinam os coeficientes de ponderação, adaptados ao caráter compensatório do modelo, destacam-se:

4.2.1. Método de *Tradeoffs*

Este método assume que o tomador de decisão é capaz de identificar e priorizar várias alternativas discretas para sua avaliação. O decisor é igualmente capaz de estruturar os critérios (responsáveis pela avaliação das alternativas) de uma maneira hierárquica (Keeney e Raiffa, 1976), determinando a importância atribuída a um critério em

relação a outro, a partir da construção de uma função matemática.

Se um determinado critério for pouco importante diante de outros critérios, este terá um peso atribuído menor, em comparação aos atribuídos aos demais critérios. Esta importância relativa de cada critério é representada pelo conceito de “taxa de substituição” ou *tradeoff*.

4.2.2. Método *AHP* (*Analytic Hierarchy Process*)

O método AHP (Saaty, 1980) é um dos métodos mais amplamente utilizados no apoio à tomada de decisão. O problema de decisão é decomposto em níveis organizados em uma hierarquia: os objetivos finais se localizam no topo da hierarquia, depois, os subobjetivos, a seguir, os objetivos dos decisores e, por fim, os possíveis resultados ou cenários.

A atribuição de pesos aos critérios é feita construindo-se uma matriz das importâncias de cada critério e usando-se a teoria algébrica dos autovalores. Uma modificação deste método permite também resolver o problema de quantificar opiniões subjetivas.

Apesar de sua popularidade, o método apresenta duas grandes desvantagens:

- Complexidade matemática, já que os algoritmos para determinação de autovalores são de complexidade não polinomial;
- Não verificação de coerência das opiniões do decisor, o que pode levar a resultados desprovidos de sentido.

4.2.3. Método *UTA* (*Utilité Additive*)

O método UTA, desenvolvido por Jacquet-Lagrange e Siskos (1982), avalia as funções de utilidade aditiva que agregam múltiplos critérios, utilizando uma ordenação subjetiva das ações e uma avaliação multicritério das ações. Uma análise de pós-otimização, utilizando programação linear, é utilizada para avaliar o conjunto de funções de utilidade.

O método considera as bases da MAUT, pois assume a existência de uma

função de utilidade aditiva. Ao mesmo tempo, considera algumas idéias da chamada Escola Francesa, por não considerar uma única função de utilidade, mas sim um conjunto de funções de utilidade, todas vistas como modelos consistentes das preferências *a priori* do tomador de decisão.

Ao iniciar o método, o tomador de decisão deve ordenar por ordem de preferência um pequeno subconjunto de alternativas, de forma global, sem as decompor critério a critério. Após a resolução de um problema de programação linear, o método determina o conjunto dos coeficientes de ponderação e a forma das funções g_j dos critérios, que melhor reconstitui a ordenação definida pelos decisores.

4.2.4. Método MACBETH

O método MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*), desenvolvido por Bana e Costa & Vansnick (1995, 1997) atende a duas questões essenciais: para cada critério, determinar uma escala de valores, ou seja, atribuir “notas” a cada alternativa. Em alguns casos existe uma forma natural de fazer essa atribuição, sendo o custo de uma mercadoria um exemplo clássico. Em outros casos a avaliação é qualitativa, sendo necessário transformá-la em quantitativa.

Tendo as notas de cada alternativa relativas a cada critério, é necessário agregá-las em uma nota única através de uma soma ponderada. O problema consiste na atribuição de pesos aos vários critérios, respeitando as opiniões dos decisores.

O *software* MACBETH, que implementa computacionalmente o método multicritério de mesmo nome, pode ser usado para resolver estas duas questões. Para a primeira delas é usado o módulo *SCORES* do programa MACBETH. Este módulo permite atribuir notas a cada alternativa através de uma comparação par a par. Dadas duas alternativas, o decisor deve dizer qual a mais atrativa (tem maior nota) e qual o grau desta atratividade em uma

escala semântica que tem correspondência com uma escala ordinal (0 = indiferente, 1 = muito fraca, 2 = fraca, 3 = moderada, 4 = forte, 5 = muito forte e 6 = extrema). O próprio programa faz a análise de coerência cardinal (transitividade) e semântica (relações entre as diferenças), sugerindo, em caso de incoerência, como resolvê-la. Por programação linear é sugerida uma escala de notas, e os intervalos em que elas podem variar sem tornar o problema inconsistente (PPL inviável). É ainda facultado ao decisor ajustar graficamente o valor das notas atribuídas, dentro dos intervalos permitidos. Segundo Bana e Costa & Vansnick (1997) somente após este ajuste, com a introdução dos conhecimentos dos especialistas, é que fica caracterizada a construção da escala cardinal de valores.

Para a segunda questão apontada (atribuição de pesos e construção da função que conduz ao critério síntese), é usado o módulo *WEIGHTS* do programa MACBETH, que atua de maneira semelhante ao módulo *SCORES*.

Ao contrário do método AHP que compara a importância dos critérios diretamente, o MACBETH faz a comparação de forma indireta, considerando alternativas fictícias que representam cada um dos critérios. A alternativa fictícia a_i representa o critério j quando apresenta a melhor nota em j e a pior em todos os outros critérios. É ainda introduzida uma outra alternativa, correspondente a um critério artificial, com a pior nota em todos os critérios, com a finalidade de evitar que um critério real tenha peso nulo. A eventual atribuição de peso zero a um critério relevante violaria o axioma da exaustão. Através da comparação da atratividade das alternativas são atribuídos os pesos aos critérios de forma análoga ao procedimento realizado no módulo *SCORES*.

A principal diferença entre os dois módulos é que, enquanto no *SCORES* há a restrição de as notas ocuparem todo o intervalo definido, no *WEIGHTS* o peso menor ocupa o valor mais baixo da escala, mas em vez de fixar o valor do

maior peso obriga a que a soma de todos os pesos seja igual à unidade.

A aplicação do método MACBETH a casos reais pode ser encontrada, por exemplo, em Soares de Mello et al. (2001), Bana e Costa et al. (2000), Bana e Costa & Nunes da Silva (1994), entre outros. A conceituação teórica e os problemas de programação linear usados pelo método são encontrados em Soares de Mello et al. (2002).

5. ESTUDO DE CASO

5.1. O Projeto Aerodesign

A competição Aerodesign é organizada anualmente desde 1999 pela SAE (*Society of Automotive Engineers*), e dirigida para estudantes universitários de graduação. A fim de competir, a Escola deve projetar, documentar, construir e voar um aeromodelo rádio controlado para elevar o máximo peso possível. O avião deverá alçar vôo em 61 metros, circular o campo pelo menos uma vez e aterrissar em 122 metros. Deverá ainda utilizar um motor padrão não alterado, utilizar o combustível fornecido na competição e ter menos de 7750 centímetros quadrados de área projetada e construída.

Este projeto tem-se mostrado como uma excelente fonte de motivação para os alunos do curso regular de Engenharia. Participam alunos de engenharia mecânica na sua maioria, mas também das áreas de Produção e Telecomunicações. No projeto há etapas relativamente simples, onde bastam os conhecimentos de física e matemática do ensino médio, e partes bastante mais complicadas, envolvendo as técnicas de Cálculo Estrutural por Elementos Finitos e análise dos materiais envolvidos. Por essa razão podem participar alunos do segundo ao décimo período.

Para conseguir o objetivo, a organização da competição aconselha seguir o seguinte roteiro: projeto preliminar, procura de patrocínio, cálculos, suporte experimental, detalhes de projeto, desenhos, construção,

preparação do relatório, apresentação oral, teste de vôo, e, competição.

No projeto desenvolvido pela UFF as fases foram agrupadas e ordenadas, segundo o que segue (Vidal Pessolani et al., 2001):

5.1.1. Projeto Preliminar

Numa primeira etapa, faz-se o projeto preliminar da aeronave. Esta etapa, apesar de introduzir conceitos novos ao aluno, não requer por outro lado conhecimentos muito avançados do curso de Engenharia, podendo ser usadas ferramentas trazidas do ensino médio.

A partir de parâmetros fixados, tais como potência do motor e estimativa do peso da aeronave, fixa-se em linhas gerais a distribuição das áreas da asa e da fuselagem, para um posterior detalhamento.

5.1.2. Projeto Aerodinâmico

O projeto aerodinâmico é dividido entre projeto da asa e da fuselagem.

No projeto da asa, a escolha do aerofólio utilizado é fundamental para as características desejadas do avião. Por meio de uma pesquisa bibliográfica chega-se à melhor relação sustentação arrasto. A seguir, escolhe-se a forma da asa mais apropriada. Podendo esta ser retangular, trapezoidal, mista ou elíptica. Com a forma e as medidas da asa definidas chega-se à estimativa do arrasto total e da sustentação e ao gráfico de carga alar, que relaciona a velocidade da aeronave, o ângulo de inclinação da asa com o peso carregado por área de asa. Este gráfico é fundamental para a determinação da velocidade de cruzeiro do avião, bem como o ângulo de instalação da asa no avião. Nesta etapa de projeto escolhem-se também o tipo de aileron que será instalado, e se será necessária a utilização de Flaps. Calcula-se também a velocidade e a distância de decolagem.

No projeto da fuselagem é estimada a posição do centro de gravidade, fundamental para a estabilidade da aeronave. Na fase do equilíbrio estático estimam-se os pesos dianteiro e traseiro, e avaliam-se as

dimensões da parte dianteira e traseira. A análise do equilíbrio dinâmico visa calcular a área e a seção do estabilizador horizontal (profundor) necessário para equilibrar o momento de nariz (*Pitching Moment*). Calcula-se também o estabilizador vertical e leme.

Por último faz-se também o projeto do trem de pouso em que considerações a respeito do centro de gravidade devem ser corretamente analisadas. Também é usual a colocação de molas e amortecedores.

5.1.3. Projeto Estrutural

O desafio do projeto consiste em fazer uma aeronave que seja ao mesmo tempo leve do ponto de vista estrutural e resistente. Para isso, procuram-se materiais com essas características. Os materiais mais utilizados são o alumínio, a madeira balsa, isopor, fibra de vidro, fibra carbono e materiais compósitos.

As matérias envolvidas nessa etapa são Mecânica Racional e Aplicada, Resistência dos Materiais, Elementos de Máquinas, Materiais Compósitos etc.

Em primeiro lugar faz-se uma pesquisa das propriedades desses materiais e das técnicas construtivas para avaliar a viabilidade de sua utilização.

São freqüentes também os ensaios visando avaliar a sua resistência. Deve-se também estudar as resinas e colas existentes no mercado, bem como sua relação de peso e resistência.

Uma vez escolhidos os materiais, parte-se para o projeto estrutural. Nesta etapa pode-se partir para hipóteses simplificadoras como o cálculo da asa pela teoria das vigas, ou mesmo a utilização de programas computacionais mais elaborados como a análise de casca com o Método dos Elementos Finitos. Devido aos conhecimentos mais aprofundados, os alunos envolvidos nessa etapa podem ser do quarto ou quinto ano.

Com os cálculos obtidos pode-se estimar o tamanho das seções das longarinas e a natureza do material.

5.1.4. Ensaaios

Ao longo do projeto é necessário fazer uma comparação entre os valores

teóricos e os reais, das características do aeromodelo.

A construção de um modelo para análise em túnel de vento verifica se os cálculos de sustentação estão sendo obtidos, e se o arrasto foi corretamente avaliado. É importante também o estudo do Fator de correlação modelo/avião real para a transformação dos valores obtidos.

A construção de uma bancada de teste de motores para verificação de empuxo máximo e escolha da hélice.

Também no referente ao trem de pouso, é necessário testar as diferentes alternativas e comparar com o calculado.

5.1.5. Construção

A etapa da construção costuma envolver o domínio de técnicas manuais, e para isso torna-se necessário recorrer à assessoria de um profissional da área.

Em primeiro lugar é necessário gerar um desenho global do projeto com as nervuras das asas e os detalhes de acabamento, o que pode fazer-se num programa de desenho como o AutoCad.

A seguir, analisam-se as alternativas de construção existentes. Em virtude da complexidade do projeto, deve-se fazer uma avaliação dos métodos construtivos. Por exemplo, a asa do avião possui um alto grau de complexidade, seja pela nervura, mas também pela inclinação, forma elíptica ou trapezoidal, sendo com freqüência até torcida no sentido longitudinal.

Nessa etapa costuma-se construir ao menos duas bancadas, ou gabaritos, onde será feita a montagem da asa e da fuselagem.

5.2. O Problema Multicritério no Projeto Aerodesign

No projeto preliminar, em geral, as escolhas são realizadas tomando como base a experiência de projetos anteriores ou o método de “tentativa e erro”. A abordagem científica de tomada de decisão é normalmente negligenciada, não apenas no projeto em estudo.

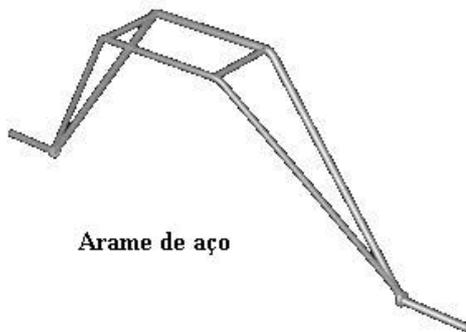
No projeto aerodesign, uma das escolhas iniciais em que pode ser abordada cientificamente consiste na

seleção do tipo de estrutura do trem de pouso.

5.2.1. Estruturação do Problema

Dentro das metodologias multicritério, o primeiro passo consiste na identificação das alternativas que são os quatro possíveis tipos de trem de pouso, a saber: trem de chapa arquitetura bicicleta, trem de chapa arquitetura triciclo, trem de arame arquitetura bicicleta e trem de arame arquitetura triciclo.

O trem de arame (Fig. (1)) constitui uma estrutura de arame de aço-carbono dobrado e soldada, enquanto que o trem de chapa (Fig. (2)) constitui chapa inteiriça de alumínio cortada e dobrada.



Arame de aço

Figura 1. Estrutura bicicleta com arame de aço.



Chapa de alumínio

Figura 2. Estrutura bicicleta com chapa de alumínio.

5.2.2. Critérios

O passo seguinte consiste na determinação do conjunto de critérios de avaliação. Para isto, foi necessário analisar as preocupações dos especialistas.

No caso do processo de escolha do trem de pouso do aeromodelo, as preocupações estão focadas basicamente no controle do vôo, na decolagem e

aterrissagem do avião, assim como a capacidade de levantamento de carga. Devia-se levar em conta também a resistência e a durabilidade do trem de pouso. Nesta fase do problema entra a figura do analista, que é um especialista técnico dotado de visão geral do projeto e da metodologia de AMD, responsável pela estruturação do problema e relacionamento entre projetistas e decisores (Roy e Bouyssou, 1993).

Tendo em conta as preocupações descritas, determinaram-se os seguintes critérios principais: dirigibilidade, vida útil do material do trem de pouso e custo.

Dirigibilidade do Aeromodelo

Este critério avalia de forma subjetiva o grau de dificuldade sentido pelo piloto no controle da movimentação e do impacto do aeromodelo, durante a decolagem e aterrissagem.

O primeiro subcritério gerado foi o espaço de solo necessário para a decolagem e aterrissagem do avião. Na análise efetuada, o decisor considerou que todas as alternativas eram equivalentes. Logo conclui-se que o espaço não constitui critério de avaliação, visto a impossibilidade de diferenciação das alternativas na utilização do mesmo. Houve a necessidade de reestruturação do problema e verificou-se com o decisor que o peso do material do trem era um critério relevante.

Foi criado então um novo subcritério para a avaliação da dirigibilidade: o peso de cada tipo de trem de pouso.

Conclui-se então que o critério dirigibilidade está relacionado aos seguintes subcritérios: Estabilidade, Arrasto e Peso. Esses subcritérios foram usados de forma qualitativa, isto é, fazendo-se uma comparação pareada das alternativas e usando-se o *software* MACBETH para atribuição de valores.

A Tab. (1) mostra as notas obtidas pelo método MACBETH (módulo *Scores*) em todos os subcritérios do critério Dirigibilidade. A Fig. (3) apresenta a tela do *software* MACBETH para o subcritério Peso. Na Tab. (1) e na

Fig. (3) c2 é trem de chapa biciclo, c3 trem de chapa triciclo, a2 trem de arame biciclo e a3 trem de arame triciclo.

Tabela 1. Notas das alternativas nos subcritérios de Dirigibilidade.

Alternativas	Subcritérios de Dirigibilidade		
	Estabilidade	Arrasto	Peso
c2	37,5	100,0	3,0
c3	100,0	70,0	0,0
a2	0,0	30,0	100,0
a3	75,0	0,0	80,0

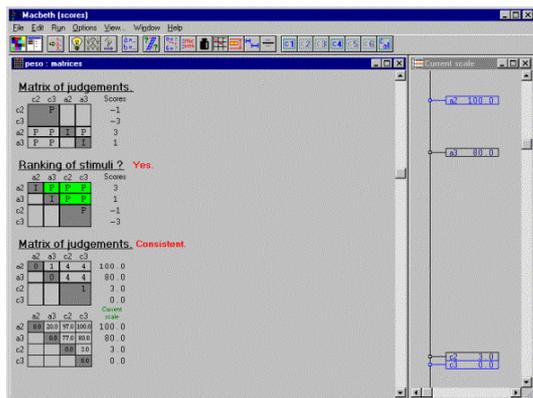


Figura 3. Tela do MACBETH com as notas das alternativas no subcritério Peso.

Vida Útil do Material

É uma análise qualitativa de resistência quanto à fadiga do material dos tipos de trem de pouso. Constitui uma preocupação com a qualidade e durabilidade do produto final.

A avaliação das alternativas foi feita de forma idêntica à usada nos subcritérios de dirigibilidade. A Tab. (2) mostra as notas das alternativas de trem de pouso para este critério.

Tabela 2. Notas das alternativas de trem de pouso para o critério Vida Útil.

Alternativas	Valoração
trem de chapa biciclo	100,0
trem de chapa triciclo	100,0
trem de arame biciclo	0,0
trem de arame triciclo	40,0

Custo de Material

O último critério avaliado foi o custo unitário de cada tipo de construção de trem de pouso, que constitui uma preocupação na produção em série do aeromodelo. Foi feita uma avaliação desagregada considerando o material e o tipo de construção. A Tab. (3) mostra as

notas calculadas pelo MACBETH para o critério Custo de Material.

Tabela 3. Valorações para o critério Custo de Material.

Alternativas	Valoração
trem de chapa biciclo	3,0
trem de chapa triciclo	0,0
trem de arame biciclo	100,0
trem de arame triciclo	80,0

5.2.3. Agregação dos Critérios

Para a avaliação final, que considera os julgamentos em todos os critérios, é construído um critério síntese que agrega as preferências. O critério é construído através de uma soma ponderada com pesos obtidos através do módulo *Weights* do MACBETH.

Como analisado anteriormente, um dos critérios (Dirigibilidade) é composto por subcritérios, o que obriga a agregá-los, usando-se igualmente uma soma ponderada, para obter a avaliação final das alternativas neste critério. O valor final (nota) de cada alternativa no critério Dirigibilidade é obtido segundo a Eq. (1), na qual K_j são os pesos de cada subcritério j (SC_j).

$$K_1SC_1 + K_2SC_2 + K_3SC_3 \quad (1)$$

A Fig. (4) traz a tela do software MACBETH (módulo *Weights*) com os pesos dos subcritérios do critério Dirigibilidade, na qual EST representa o subcritério Estabilidade, ARR Arrasto e PES Peso. A opção Art é o critério artificial mencionado anteriormente (item 2.1. Método MACBETH).

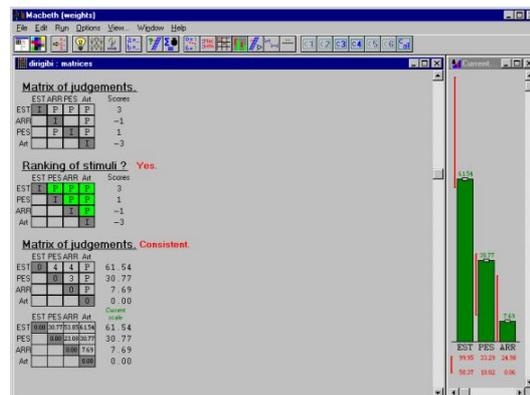


Figura 4. Pesos para os subcritérios de Dirigibilidade.

A Tab. (4) mostra a avaliação agregada das alternativas no critério Dirigibilidade.

Tabela 4. Valorações das alternativas no critério Dirigibilidade.

<i>Alternativas</i>	<i>Valoração</i>
trem de chapa biciclo	54,1
trem de chapa triciclo	83,1
trem de arame biciclo	16,9
trem de arame triciclo	52,3

A agregação final usa um método semelhante, que uma função de agregação aditiva, considerando os três critérios (Dirigibilidade, Vida útil e Custo). A Tab. (5) mostra os pesos dos critérios e a Tab. (6) apresenta a avaliação final das alternativas.

Tabela 5. Pesos dos critérios.

<i>Critério</i>	<i>Peso (%)</i>
Dirigibilidade	58,6
Vida Útil	8,1
Custo de Material	33,3

Tabela 6. Valorações finais das alternativas (avaliação global).

<i>Alternativas</i>	<i>Valoração final</i>
trem de chapa biciclo	40,8
trem de chapa triciclo	56,8
trem de arame biciclo	43,2
trem de arame triciclo	60,5

O uso do método indicou como alternativa preferida o trem de arame triciclo. Como alternativa menos preferida obteve-se o trem de chapa biciclo, que, curiosamente, era o usado no protótipo original.

6. CONCLUSÕES

Um dos maiores problemas defrontados no curso de engenharia é a falta de iniciativa e a passividade com que os alunos encaram os diferentes problemas. Alia-se a isto a falta de aplicabilidade imediata das matérias. A participação em trabalhos desta natureza é muito proveitosa, pois envolve conhecimentos de todo o curso de engenharia e requer dos alunos disposição ativa para enfrentar os problemas e resolvê-los.

Os alunos têm a oportunidade de aplicar os conhecimentos adquiridos nas matérias e todos ganham em sentido prático e em capacidade de organização, de relacionamento, e de espírito de iniciativa.

O fato de que o trem de pouso usado originalmente foi o que teve pior avaliação na análise multicritério pode explicar alguns dos problemas do protótipo. Ficou evidenciado que um bom projeto não depende apenas de dimensionamentos corretos. Além disso, foram mostradas as vantagens das metodologias de Auxílio Multicritério à Decisão em projetos mecânicos.

REFERÊNCIAS

- BANA E COSTA, C.; NUNES DA SILVA, F. Concepção de uma boa alternativa de ligação ferroviária ao Porto de Lisboa: uma aplicação da metodologia multicritério de apoio à decisão e à negociação. **Investigação Operacional**, v. 14, p. 115-131, 1994.
- BANA E COSTA, C.A.; FERREIRA, J. A.A.; CORREA, E.C. Metodologia multicritério de apoio à avaliação de propostas em concursos público. In: ANTUNES, C.H.; TAVARES, L.V. (Org.). **Casos de Aplicação da Investigação Operacional**. Amadora: McGraw Hill, 2000, p. 336-363.
- BANA e COSTA, C.A.; VANSNICK, J.C. MACBETH - an interactive path towards the construction of cardinal value functions. **International Transactions in Operational Research**, n. 1, p. 489-500, 1994.
- BANA e COSTA, C.A.; VANSNICK, J.C. Thoughts on a theoretical framework for measuring attractiveness by categorical based evaluation technique (MACBETH). In: Clímaco, J.C.N. (Org). **Multicriteria Analysis**. Berlin: Springer-Verlag, 1997.
- BANA e COSTA, C.A.; VANSNICK, J.C. Uma nova abordagem ao problema da construção de uma função de valor cardinal: MACBETH. **Investigação Operacional**, v. 15, p. 15-35, 1995.

- BARBA-ROMERO, S.; POMEROL, J.C. **Decisiones Multicriterio: Fundamentos Teóricos e Utilización Práctica**. Alcalá: Colección de Economía, 1997.
- BAZZO, W.A.; PEREIRA, L.T.V. **Introdução à Engenharia**. 6ª ed., Florianópolis: Editora da UFSC, 2000.
- BOUYSSOU, B. Building criteria: a prerequisite for MCDA. In: BANA E COSTA C.A. (Org.). **Readings in Multiple Criteria Decision Aid**, 1990, p. 58-80.
- BOUYSSOU, D. Décision multicritère ou aide multicritère? **Bulletin du Groupe de Travail Européen "Aide Multicritère à la Décision"**, Series 2, n. 2, 1993.
- BRANS, J.P.; MARESCHAL, B.; VINCKE, P.H. PROMETHEE: a new family of outranking methods in MCDM. **IFORS 84**, p. 477-490, 1984.
- DIAS, L.M.C.; ALMEIDA, L.M.A.T.; CLÍMACO, J. **Apoio Multicritério à Decisão**. Coimbra: Faculdade de Economia - Universidade de Coimbra, Coimbra, 1996.
- GOMES, E.G. **Integração entre Sistemas de Informação Geográfica e Métodos Multicritério no Apoio à Decisão Espacial**. 1999. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- GOMES, E.G.; SOARES DE MELLO, J.C.C.B.; LINS, M.P.E. Uso de Análise de Envoltória de Dados e Auxílio Multicritério à Decisão na análise de dados das Olimpíadas 2000. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 21., 2001.
- GOMES, L.F.A.M. **TODIM: A System for the Evaluation of Public Transportation Projects**. PUC/RJ: Rio de Janeiro, n. 24, 16 p., 1987.
- JACQUET-LEGREZE, E.; SISKOS, J. Assessing a set of Additive Utility Functions for Multicriteria Decision-Making, The UTA Method. **European Journal of Operational Research**, v. 10, p. 151-164, 1982.
- ROY, B. Classement et choix en presence de points de vue multiple: La methode ELECTRE. **R.I.R.O**, v. 8, p.57-75, 1968.
- ROY, B. ELECTRE III: Un algorithme de classements fonde sur une representation floue des preferences en presence de criteres multiples. **Cahier du CERO**, v. 20, n. 1, p. 3-24, 1978.
- ROY, B.; BOUYSSOU, D. **Aide Multicritère à la Décision: Méthods et Cas**. Economica: Paris, 1993.
- ROY, B. Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Economica, Paris, 1985.
- ROY, B.; SKALKA, J.M. ELECTRE IS: Aspects methologiques et guide d'utilisation. **Document du LAMSADE**, n. 30, 1984.
- SAATY, T.L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill, 1980.
- SOARES DE MELLO, J.C.C.B.; GOMES, E.G.; LINS, M.P.E. Análise Multicritério da presença da Universidade Federal Fluminense com o uso o Método Macbeth. **Revista Produção**, v. 11, n. 2, p. 53-67. 2002.
- SOARES DE MELLO, J.C.C.B.; GOMES, E.G.; LINS, M.P.E.; VIEIRA, L.A.M. Um caso de estudo da integração SIG-DEA-MCDA: a influência de uma instituição de ensino superior em vários municípios do Estado do Rio de Janeiro. **Investigação Operacional**, v. 21, n. 2, p. 171-190, 2001.
- VIDAL-PESSOLANI, R.B.; SOARES DE MELLO, J.C.C.B.; LETA, F.R.; GOMES, E.G.; PINTO, M.C. O Projeto Aerodesign como ferramenta de ensino multidisciplinar através de casos concretos. In: ENCONTRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, Petrópolis, 7., 2001.