



## **USO DE METODOLOGIAS MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO EM PROJETOS MECÂNICOS: UM ESTUDO DE CASO**

### **João Carlos Correia Baptista Soares de Mello**

Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal Fluminense  
Rua Passo da Pátria, 156, 24240-240, Niterói, RJ – jcsmello@bol.com.br

### **Eliane Gonçalves Gomes**

Programa de Engenharia de Produção – Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Caixa Postal: 68543, 21945-970, Rio de Janeiro, RJ – eggomes@pep.ufrj.br

### **Raul Bernardo Vidal Pessolani**

Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal Fluminense  
Rua Passo da Pátria, 156, 24240-240, Niterói, RJ – raul@mec.uff.br

### **Fabiana Rodrigues Leta**

Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal Fluminense  
Rua Passo da Pátria, 156, 24240-240, Niterói, RJ – fabiana@ic.uff.br

### **Marcelo Carvalho Pinto**

Curso de Engenharia Mecânica – Universidade Federal Fluminense  
Rua Passo da Pátria, 156, 24240-240, 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” (Economia, Administração e Engenharia de Produção), 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:** *Aerodesign, Projeto Mecânico, Auxílio Multicritério à Decisão, MACBETH.*

## **1. INTRODUÇÃO**

Um projeto de engenharia pode ser definido como um conjunto de atividades que geram um produto, um sistema ou um processo. Neste 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 (Vida-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, se habilitar a competir.

Tradicionalmente os projetos deste 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 de Metodologias Multicritério de Apoio à Decisão. Estas metodologias permitem 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. Essa 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 (MCDA) podem ser definidas como um conjunto de técnicas de apoio à tomada de decisão que têm a finalidade de investigar um número de alternativas, considerando múltiplos critérios e objetivos em conflito. Desta forma, é possível gerar soluções compromisso e uma hierarquização das alternativas, de acordo com o grau de atração destas para o tomador de decisão (Gomes, 1999).

Segundo Bouyssou (1993), uma abordagem multicritério apresenta as seguintes vantagens:

- construção de uma base para o diálogo entre os intervenientes utilizando diversos pontos de vista comuns;
- maior facilidade em incorporar incertezas aos dados sobre cada ponto de vista;
- encarar cada alternativa como um compromisso entre objetivos em conflito.

Este último argumento destaca o fato de que raramente será encontrada uma situação em que exista uma alternativa superior às restantes sobre todos os pontos de vista.

Em um problema multicritério é necessário, em primeiro lugar, estabelecer claramente qual o objetivo da análise. Classicamente podem ser definidas três problemáticas multicritério: ordenação, escolha e alocação em classes (Barba-Romero e Pomerol, 1997). No caso presente, pretende-se fazer uma ordenação como etapa inicial de uma escolha. Deve-se ainda definir as alternativas (que neste caso são os modelos de trem de pouso), o método a ser usado e quem atua como decisor (aquele que emite juízos de valor sobre as alternativas e os critérios), que neste artigo é um dos autores, com experiência em aeromodelismo. O método MACBETH foi o utilizado neste trabalho.

### **2.1. Método MACBETH**

Na resolução do presente problema multicritério existem duas questões essenciais, a saber:

- 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 custo de uma mercadoria o exemplo clássico. Em outros casos a avaliação é qualitativa, sendo necessário transformá-la em quantitativa. Há ainda casos em que, embora haja uma escala de valores intrínseca, ela é desconhecida pela impossibilidade de realizar os ensaios laboratoriais necessários. É o que ocorre neste artigo, onde os parâmetros de desempenho do trem de pouso foram substituídos pela avaliação qualitativa do especialista.

- 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.

Estes dois problemas podem ser resolvidos com o auxílio do método MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) (Bana e Costa & Vansnick, 1994).

Para o primeiro deles é usado o módulo *Scores* do programa MACBETH. A metodologia MACBETH propõe a construção de uma escala de valor cardinal sobre o conjunto de alternativas ( $A$ ), a partir de juízos absolutos de diferença de atratividade entre duas delas. A questão fundamental nesta abordagem é (Bana e Costa & Vansnick, 1995): Dados os impactos  $i_j(a)$  e  $i_j(b)$  de duas alternativas  $a$  e  $b$  de  $A$  segundo um ponto de vista fundamental  $PVF_j$  (critério), sendo  $a$  julgada mais atrativa que  $b$ , a diferença de atratividade entre  $a$  e  $b$  é “fraca”, “forte”, ...?

É introduzida uma escala semântica formada por categorias de diferença de atratividade, com o objetivo de facilitar a interação entre o decisor e o analista. O decisor deverá escolher uma, e somente uma, entre as categorias apresentadas:  $C_1$  diferença de atratividade muito fraca;  $C_2$  diferença de atratividade fraca;  $C_3$  diferença de atratividade moderada;  $C_4$  diferença de atratividade forte;  $C_5$  diferença de atratividade muito forte;  $C_6$  diferença de atratividade extrema.

Para avaliação das alternativas em cada critério, é construída uma matriz de diferenças de atratividade. As alternativas são previamente ordenadas por ordem decrescente de atratividade para facilitar a construção da matriz. Caso não fosse feita uma ordenação prévia, a utilização de uma matriz triangular superior não seria possível, dificultando a identificação de inconsistências nos julgamentos do decisor.

Cada elemento  $x_{ij}$  da matriz toma o valor  $k$  ( $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ) se o decisor julgar que a diferença de atratividade do par  $(a_i, a_j)$  pertence à categoria  $C_k$ . Estes números não têm significado matemático; servem apenas como indicadores semânticos de qual categoria de diferença de atratividade foi atribuída ao par respectivo.

Por programação linear são sugeridos uma escala de notas e os intervalos em que elas podem variar sem tornar o problema inconsistente (problema de programação linear 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.

Nos casos em que as matrizes de valor são grandes, a avaliação de todas as ações de maneira coerente se torna difícil. Nestes casos, é comum o aparecimento de inconsistências nos julgamentos de valor do decisor. Há dois tipos de inconsistências: semântica, quando a atribuição de categoria de diferença de atratividade a um par de ações não é logicamente aceitável, e cardinal, se a representação dos julgamentos não é possível através de uma escala cardinal dentro dos números reais. Estas inconsistências significam que o decisor não seguiu o princípio da Racionalidade Forte, tornado impossível a construção de uma pré-ordem no conjunto das alternativas e, conseqüentemente, não se pode estabelecer uma correspondência biunívoca entre esse conjunto e o dos números reais que respeite as propriedades de uma função utilidade. O *software* sugere alterações nos julgamentos de valor que eliminem as inconsistências.

Para o segundo problema apontado (atribuição de pesos e construção da função que conduz ao critério síntese), poder-se-ia usar, entre outros, o método AHP (Saaty, 1980). Optou-se por usar 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 (Roy e Bouyssou, 1993). 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.

### 3. ESTUDO DE CASO

#### 3.1. 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;
- 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.

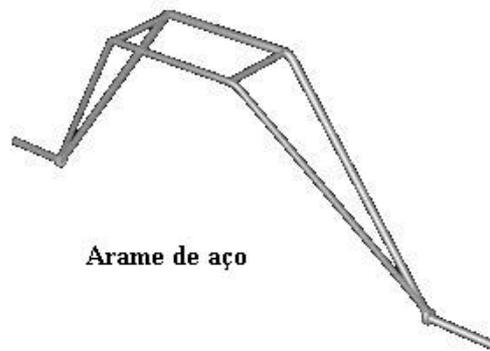


Figura 1. Estrutura bicicleta com arame de aço.



Figura 2. Estrutura bicicleta com chapa de alumínio.

O passo seguinte foi determinar o 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 voo, 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.

### 3.1.1. 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 aterrisagem.

O primeiro subcritério gerado foi o espaço de solo necessário para a decolagem e aterrisagem 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 qual c2 é trem de chapa bicicleta, c3 trem de chapa triciclo, a2 trem de arame bicicleta e a3 trem de arame triciclo.

Tabela 1. Notas das alternativas nos subcritérios de Dirigibilidade.

Alternativas	Notas para os subcritérios de Dirigibilidade		
	Estabilidade	Arrasto	Peso
trem de chapa bicicleta	37,5	100	3
trem de chapa triciclo	100	70	0
trem de arame bicicleta	0	30	100
trem de arame triciclo	75	0	80

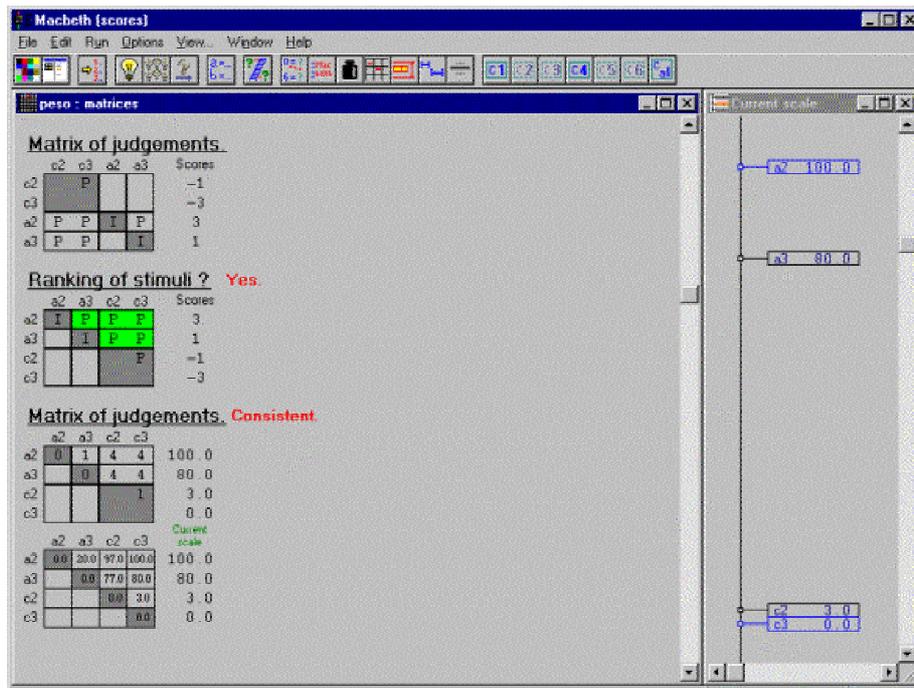


Figura 3. Tela do MACBETH com as notas das alternativas no subcritério Peso.

### 3.1.2. 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	Nota
trem de chapa biciclo	100
trem de chapa triciclo	100
trem de arame biciclo	0
trem de arame triciclo	40

### 3.1.3. 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. Notas para o critério Custo de Material.

Alternativas	Nota
trem de chapa biciclo	3
trem de chapa triciclo	0
trem de arame biciclo	100
trem de arame triciclo	80

### 3.1.4. 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  $j$  ( $SC_j$ ).

$$\text{Nota em Dirigibilidade} = K_1 SC_1 + K_2 SC_2 + K_3 SC_3 \quad (1)$$

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).

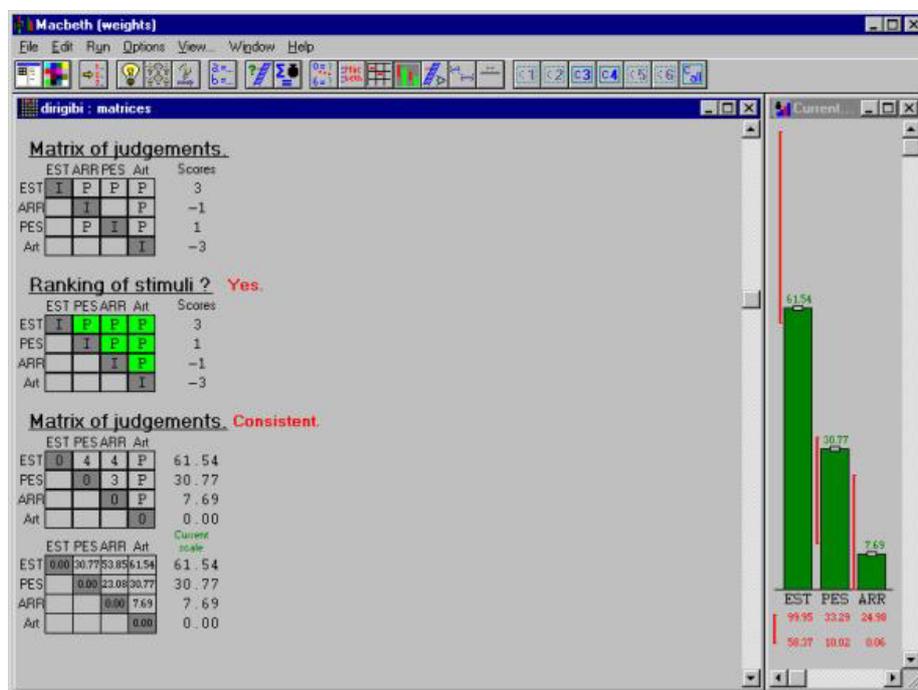


Figura 4. Pesos para os subcritérios de Dirigibilidade.

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

Tabela 4. Notas das alternativas no critério Dirigibilidade.

Alternativas	Nota
trem de chapa bicicleta	54,1
trem de chapa triciclo	83,1
trem de arame bicicleta	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.

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

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

Alternativas	Nota final
trem de chapa bicicleta	40,8
trem de chapa triciclo	56,8
trem de arame bicicleta	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 bicicleta, que, curiosamente, era o usado no protótipo original.

#### 4. 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.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Bana e Costa, C.A., Vansnick, J.C., 1994, "MACBETH - an interactive path towards the construction of cardinal value functions", *International Transactions in Operational Research*, No. 1, pp. 489-500.
- Bana e Costa, C.A., Vansnick, J.C., 1995, "Uma nova abordagem ao problema da construção de uma função de valor cardinal: MACBETH", *Investigação Operacional*, Vol. 15, pp. 15-35.
- Bana e Costa, C.A., Vansnick, J.C., 1997, "Thoughts on a theoretical framework for measuring attractiveness by categorical based evaluation technique (MACBETH)". In *Multicriteria Analysis*, J.C.N. Clímaco (ed.), Springer-Verlag, Berlin.
- Barba-Romero, S., Pomerol, J.C., 1997, "Decisiones Multicriterio: Fundamentos Teóricos e Utilización Práctica", *Colección de Economía*, Universidad de Alcalá.
- Bazzo, W.A., Pereira, L.T.V., 2000, "Introdução à Engenharia", Editora da UFSC, 6ª Edição.
- Bouyssou, D., 1993, "Décision multicritère ou aide multicritère?", *Bulletin du Groupe de Travail Européen "Aide Multicritère à la Décision"*, Series 2, No. 2, Printemps93.
- Gomes, E.G., 1999, "Integração entre Sistemas de Informação Geográfica e Métodos Multicritério no Apoio à Decisão Espacial", Tese de Mestrado, Programa de Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

Roy, B., Bouyssou, D., 1993, “Aide Multicritère à la Décision: Méthods et Cas”, Economica, Paris.  
Saaty, T.L., 1980, “The Analytic Hierarchy Process”, McGraw-Hill, New York.  
Vidal-Pessolani, R. B., Soares de Mello, J.C.C.B., Leta, F.R., Gomes, E.G., Pinto, M.C., 2001, “O Projeto Aerodesign como ferramenta de ensino multidisciplinar através de casos concretos”, Anais do VII Encontro de Educação em Engenharia, Petrópolis, Rio de Janeiro, Novembro [Cdrom].

## 5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## MULTICRITERIA DECISION AID METHODS USED IN MECHANICAL PROJECTS: A CASE STUDY

### **João Carlos Correia Baptista Soares de Mello**

Production Engineering Department – Fluminense Federal University  
Rua Passo da Pátria, 156, 24240-240, Niterói, RJ, Brazil – jcsmello@bol.com.br

### **Eliane Gonçalves Gomes**

Production Engineering Program – Federal University of Rio de Janeiro  
Caixa Postal: 68543, 21945-970, Rio de Janeiro, RJ, Brazil – eggomes@pep.ufrj.br

### **Raul Bernardo Vidal Pessolani**

Mechanical Engineering Department – Fluminense Federal University  
Rua Passo da Pátria, 156, 24240-240, Niterói, RJ, Brazil – raul@mec.uff.br

### **Fabiana Rodrigues Leta**

Mechanical Engineering Department – Fluminense Federal University  
Rua Passo da Pátria, 156, 24240-240, Niterói, RJ, Brazil – fabiana@ic.uff.br

### **Marcelo Carvalho Pinto**

Mechanical Engineering Graduation Course – Fluminense Federal University  
Rua Passo da Pátria, 156, 24240-240, Niterói, RJ, Brazil.

***Abstract.** The teaching of mechanical projects ponders, mainly, on the design of pieces and components. The choice of materials, forms and models is often regarded as second plan and attributed to factors as experience or common sense. In this paper we present a methodology that aids these initial project choices. Borne in the areas of Economy, Administration and Production Engineering, the Multicriteria Decision Aid may have an important role in projects, helping the initial decisions. As a case study, we choose a landing gear geometry selection of a miniaturized airplane used in students' competition. Besides the case study, we present the multicriteria methodologies basic concepts and the theoretical basis of the used method (MACBETH).*

***Keywords:** Aerodesign, Mechanical Projects, Multicriteria Decision Aid, MACBETH.*