

## **0313101 Introdução à Engenharia Civil**

### **AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES**

#### **1. Introdução**

Este texto apresenta algumas considerações sobre o processo de avaliação de soluções, que é uma das etapas do procedimento de projeto de engenharia. De início convém mencionar que, como a maioria das atividades do projeto, também a avaliação das soluções não tem uma regra simples de aplicação. Se houvesse um único critério de julgamento, a escolha seria fácil, pois, em geral, é possível estabelecer a preferência de uma solução em relação às demais.

Porém, na maioria dos projetos de engenharia devem-se empregar diversos critérios para avaliação das soluções propostas. Nesta situação, a decisão sobre a alternativa a ser escolhida torna-se difícil, a não ser que uma solução seja melhor que as demais de acordo com todos os critérios. Mas, nem sempre isto ocorre.

Por exemplo, considere que em um determinado projeto haja 3 alternativas e que se está considerando 4 critérios de projeto. Como um primeiro passo, pode-se estabelecer uma ordem de preferência entre as soluções segundo cada um dos critérios. Admita-se que ao efetuar a avaliação relativa, tenha-se concluído que a alternativa A é superior às outras segundo os critérios 1 e 2, enquanto as alternativas B e C são as melhores de acordo com os critérios 3 e 4.

Será que se pode, então, selecionar a alternativa A como a melhor, porque ela leva vantagem em relação às demais em 2 critérios, e detalhar o projeto a partir dela? Será que não se está fazendo uma escolha precipitada?

Afinal de contas, pode ser que a alternativa A seja apenas ligeiramente melhor que as alternativas B e C segundo os critérios 1 e 2, e muito pior que elas de acordo com os outros critérios. Percebe-se assim que a escolha não é tão fácil.

Certamente há uma melhor condição de decisão se fosse possível quantificar a preferência em relação às alternativas para cada critério de avaliação. Mas existe outro ponto a ser considerado. Será que todos os critérios têm a mesma importância? Ou será que um deles é preponderante? Quando um critério é predominante pode-se selecionar a alternativa que é melhor segundo este critério desde que ela seja meramente aceitável de acordo com os demais.

Os comentários acima conduzem a examinar um procedimento de avaliação que, ao levar em consideração um projeto com múltiplos critérios a serem satisfeitos, atribua pesos aos critérios, segundo a sua importância relativa, e notas às soluções para cada um dos critérios.

#### **2. Matriz de Decisão**

Uma forma relativamente simples de implementar o procedimento acima esboçado é o que se chama de Matriz de Decisão. Consiste em selecionar a melhor alternativa pela determinação da maior média ponderada das notas.

Assim, colocam-se em uma tabela, de um lado, as soluções propostas, por exemplo, ao longo da primeira linha. Na primeira coluna listam-se os critérios de avaliação. Podem ser colocados na 2ª coluna da tabela os pesos atribuídos aos critérios. Os demais espaços da tabela são utilizados para a atribuição de notas a cada uma das alternativas segundo os critérios adotados.

Embora se trate de um procedimento aparentemente simples e objetivo, deve-se atentar para o fato que atribuir uma lista de pesos para os critérios envolvidos em um projeto de engenharia não é uma tarefa fácil e implica, normalmente, em uma avaliação subjetiva. Caberia, nestas circunstâncias, saber do cliente o que é mais

importante para ele. Os pesos assumidos para os critérios devem refletir esta posição e não simplesmente a opinião do engenheiro.

Por outro lado, a atribuição de notas às soluções para cada critério exige um conhecimento relativamente preciso do problema que normalmente só é possível para um especialista.

De qualquer forma, considerando as limitações expostas, a matriz de decisão pode ser empregada para ter uma primeira avaliação das soluções.

### 3. Aperfeiçoamento da Matriz de Decisão

Há uma série de propostas para refinamento da idéia da matriz de decisão. Uma proposta é a sugerida pelo Prof. Jose Antonio Jardini que pressupõe uma comparação, tanto entre os critérios, como entre as soluções, aos pares. Partindo de avaliações qualitativas procede-se a uma quantificação desta preferência.

A Tabela 1 estabelece uma relação entre o nível de importância de um critério (extremamente mais importante, muito mais importante, mais importante, moderadamente mais importante, igualmente importante) em relação a outro e notas a serem trabalhadas na atribuição dos pesos relativos aos critérios.

**Tabela 1 Comparação entre Critérios**

Preferência relativa de importância	Nota relativa
extremamente mais importante	9 ou 8
muito mais importante	7 ou 6
mais importante	5 ou 4
moderadamente mais importante	3 ou 2
Igualmente importante	1

A partir desta primeira tabela constrói-se outra em que são listados todos os critérios e onde a comparação é feita entre todos eles, dois a dois.

Em "*Fundamentals of Engineering Design*", Hyman apresenta um procedimento semelhante para comparação dos critérios dois a dois, porém, com uma avaliação absoluta entre os critérios, atribuindo peso 1, quando o critério é mais importante e peso 0 quando ele é menos importante.

Para a atribuição de notas às diversas alternativas segundo um dado critério pode-se aplicar o mesmo procedimento descrito para hierarquizar os critérios, para qualificar quanto uma dada solução é preferida em relação à outra e depois estabelecer uma correspondência com um índice quantitativo. A Tabela 2 ilustra a correspondência entre uma hierarquização qualitativa e índices quantitativos.

**Tabela 2 Comparação entre Soluções**

Qualificação da preferência	Índice quantitativo
extremamente acentuada	9 ou 8
muito acentuada	7 ou 6
acentuada	5 ou 4
moderada	3 ou 2
indiferente	1

### 4. Exemplo

Em um projeto de redução do consumo de energia elétrica são comparadas três alternativas para iluminação.

## A) Características das Soluções

	Vapor de mercúrio	Vapor de sódio	Incandescente
Potência (W)	125	70	250
Durabilidade (h)	12.000	16.000	2.000
Custo (R\$)	220,00	260,00	5,00

## B) Critérios de decisão

Foram estabelecidos os seguintes critérios de decisão

- Custo total
- Meio Ambiente
- Conforto visual
- Tempo da troca

## C) Aplicação do Procedimento de Avaliação

### C1) Ponderação dos critérios

- i. Construir a tabela para comparação dos critérios, listando os critérios tanto nas linhas como nas colunas (Tabela 3)

Tabela 3 - Comparação de critérios

	custo	meio ambiente	visual	troca
Custo	1,00	2,00	0,33	0,17
Meio ambiente	0,50	1,00	0,20	0,13
Visual	3,00	5,00	1,00	0,20
Troca	6,00	8,00	5,00	1,00
	10,50	16,00	6,53	1,49

- i. Comparar os critérios das linhas com os das colunas. Assim, por exemplo, como visto na Tabela 3, Custo é considerado moderadamente mais importante que Meio Ambiente; portanto na célula (1,2) coloca-se a nota "2" e, por consequência, na célula simétrica (2,1) coloca-se "  $1/2 = 0,5$  ".

Outro exemplo: "Visual" é mais importante que "Meio Ambiente; portanto na célula (3,2) coloca-se 5 e na célula (2,3)  $\Rightarrow 1/5=0,2$ .

Desta forma, compara-se o critério que aparece em cada linha com cada um que aparece nas colunas. Na diagonal tem-se tudo igual a 1.

- ii. Procedede-se a soma dos índices quantitativos de cada coluna.

- iv. Para se efetuar normalização, divide-se cada termo de uma coluna pela soma dos termos da coluna. Resulta a Tabela 4, indicada por normalizada (em azul).

- v. Calcula-se a média dos valores das linhas, obtendo como resultado os pesos de cada critério (custo: 0,095746; troca: 0,6267, etc.)

Tabela 4 Normalização dos pesos

	custo	Meio amb	visual	troca	
custo	0,10	0,13	0,05	0,11	0,10
Meio ambiente	0,05	0,06	0,03	0,08	0,06
visual	0,29	0,31	0,15	0,13	0,22
troca	0,57	0,50	0,77	0,67	0,63
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
normalizada					importância média

## C2) Avaliação das soluções

- i. Agora, para cada critério, efetua-se a comparação das alternativas de solução (lâmpada de sódio, mercúrio e incandescente).
- ii. Por exemplo, segundo o critério “Custo”, a lâmpada incandescente é a melhor alternativa, sendo moderadamente preferida em relação à de vapor de mercúrio e acentuadamente em relação à de vapor de sódio.
- iii. Depois, procede-se a normalização das notas, de acordo com o mesmo procedimento empregado na normalização dos critérios, gerando uma nova tabela, à direita da inicial. Verifica-se que a lâmpada incandescente tem um índice quantitativo 0,66507 bem superior aos das demais alternativas, segundo o critério “Custo”. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 Comparação das soluções do ponto de vista “custo”

custo	sódio	mercúrio	incand		sódio	mercúrio	incand	
sodio	1,00	0,33	0,20		0,11	0,06	0,14	0,10
mercurio	3,00	1,00	0,25		0,33	0,19	0,17	0,23
incand.	5,00	4,00	1,00		0,56	0,75	0,69	0,67
	9,00	5,33	1,45		1,00	1,00	1,00	1,00

Repete-se o procedimento para os demais critérios: meio ambiente, aspecto visual e troca; os resultados estão mostrados nas Tabelas 6, 7 e 8, respectivamente.

Tabela 6 Comparação das soluções do ponto de vista “meio ambiente”

MA	sódio	mercúrio	incand		sódio	mercúrio	incand	
sodio	1,00	3,00	9,00		0,69	0,72	0,53	0,65
mercurio	0,33	1,00	7,00		0,23	0,24	0,41	0,29
incand.	0,11	0,14	1,00		0,08	0,03	0,06	0,06
	1,44	4,14	17,00		1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 7 Comparação das soluções do ponto de vista “visual”

visual	sódio	mercúrio	incand		sódio	mercúrio	incand	
sodio	1,00	0,50	0,20		0,14	0,11	0,13	0,13
mercurio	2,00	1,00	0,33		0,29	0,22	0,22	0,24
incand.	4,00	3,00	1,00		0,57	0,67	0,65	0,63
	7,00	4,50	1,53		1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 8 Comparação das soluções do ponto de vista “troca”

troca	sódio	mercúrio	incand		sódio	mercúrio	incand	
sódio	1,00	3,00	9,00		0,69	0,72	0,53	0,65
mercúrio	0,33	1,00	7,00		0,23	0,24	0,41	0,29
incand.	0,11	0,14	1,00		0,08	0,03	0,06	0,06
	1,44	4,14	17,00		1,00	1,00	1,00	1,00

## C3) Ordenação das alternativas

Uma vez estabelecida a hierarquização dos critérios e efetuada a avaliação das soluções segundo cada critério, efetua-se a ordenação das alternativas.

Para isto constrói-se a Tabela 9. Note que na primeira coluna aparecem as soluções e que, para cada critério, são utilizadas duas colunas: a primeira é o transporte da

última coluna da Tabela 5 “custo”; e a segunda é o peso do critério tirado da tabela de “valorização” (Tabela 4).

Assim, pode-se calcular a nota ponderada de cada alternativa. Por exemplo, para o caso da lâmpada de sódio, obtém-se:

$$\text{Nota ponderada} = B46 * C46 + D46 * E46 + F46 * G46 + H46 * I46$$

Tabela 9 Ponderação Final

		custo		ma		visual		troca	final
sódio	0,10	0,10	0,65	0,06	0,13	0,22	0,65	0,63	<b>0,48</b>
mercúrio	0,23	0,10	0,29	0,06	0,24	0,22	0,29	0,63	0,28
incand.	0,67	0,10	0,06	0,06	0,63	0,22	0,06	0,63	0,24
	1,00		1,00		1,00		1,00		1,00

Como resultado de aplicação do procedimento, verifica-se que a alternativa escolhida é a utilização de vapor de sódio.

## 5.Método AHP

Outro método de seleção é o AHP (ANALYTIC HIERARCHY PROCESS), que é um método de análise multicriterial que permite incluir todos os fatores importantes, tangíveis ou intangíveis, que podem ser expressos qualitativa ou quantitativamente (SAATY, 1980). Segundo Garber (2002), o AHP é um sistema para análise e síntese de problemas complexos que permite justificar as decisões de um problema de forma isolada. O tomador de decisão julga a importância de cada critério em uma sequência de comparações entre pares de critério. O mesmo procedimento ele aplica para julgar o mérito de cada solução sob um dado critério. Além disso, o AHP permite que a experiência da pessoa (projetista) ou do avaliador seja aplicada, pois, ela é tão valiosa quanto os dados numéricos disponíveis, num processo de tomada de decisão. O método AHP consiste em quatro etapas básicas:

- Estruturação do problema com a especificação dos objetivos, a definição dos critérios que serão utilizados na avaliação e a identificação das alternativas oferecidas como solução;
- Determinação de preferências por meio de comparações paritárias, ou seja, comparações entre cada par de fatores de decisão, subdividido em objetivos, critérios e alternativas;
- Síntese e de
- terminação de prioridade relativa ou peso de cada elemento de decisão, em um dado nível, usando o método de consolidação dos valores atribuídos aos fatores;
- Agregação das prioridades relativas para a escolha final.
- O método fundamenta-se na comparação dos elementos dois a dois. A partir da construção de uma matriz quadrada avalia-se a importância de um elemento (critério ou alternativa) em relação a outro, estabelecendo, pois, uma hierarquia. Os termos desta matriz ( $a_{ij}$ ) explicitam quanto um elemento (i) é preferível em relação ao outro (j). Os valores adotados na matriz estão mostrados na Tabela 10, em função da importância relativa dos termos em comparação. Os valores apresentados nesta tabela foram extraídos dos trabalhos de (GARBER, 2002; JANSEN et al., 2004; PAMPLONA, 1999).

Tabela 10 Comparação entre critérios/alternativas



Observa-se que a intensidade dessas preferências deve satisfazer a condição de reciprocidade, como expressa pela última relação acima: se A é x vezes preferível que B, então B é 1/x vezes preferível que A.

Cabe ressaltar que quando se trabalha com valores determinísticos, o estabelecimento de uma hierarquia em função da comparação dos atributos de cada alternativa de solução, é realizada maximizando ou minimizando os valores, por um processo de normalização. O processo de normalização é realizado por intermédio da divisão de cada elemento pelo somatório dos elementos de cada coluna da matriz.

Além disso, para efetuar uma comparação mais coerente, emprega-se o conceito de consistência e inconsistência. Almeida (2002) explica que este conceito baseia-se na ideia de que, quando se tem uma quantidade básica de dados, todos os outros podem ser deduzidos logicamente a partir dele. Quando são realizadas as comparações entre os elementos, por exemplo, se a alternativa A1 é 3 vezes mais preferível que A2 e, A1 é 6 vezes mais preferível que A3, pode ser deduzida uma relação de dominância entre essas comparações. Se esta relação for diferente de 2, em função das opiniões expressas pelos avaliadores, significa que existe uma inconsistência na matriz. Esta inconsistência ocorre geralmente em problemas práticos, devido à subjetividade dos julgamentos, independente da quantidade de pessoas envolvidas no processo de avaliação.

## **6. Exemplo de Aplicação do Método AHP**

Utiliza-se como exemplo a escolha da melhor instalação para o empurrador fluvial através do uso da metodologia AHP. Os dados analisados anteriormente servem de base para a estruturação deste método.

O primeiro passo para aplicação deste método é definir o problema e o objetivo. Neste caso, o problema é saber qual a melhor alternativa de instalação propulsora para o empurrador que transportará álcool e derivados de petróleo pela hidrovía Tietê-Paraná? O objetivo é identificar esta instalação. As alternativas disponíveis são as instalações Diesel, diesel-elétrica, convencional e com Azipod. Os critérios de avaliação são: custo operacional do comboio, impacto ambiental e segurança. Para o caso em questão, consideram-se, inicialmente, para definição da matriz de decisão os dados referentes à rota 1 definidos nas seções anteriores para estruturação do método AHP.

O problema estruturado pelo método AHP está mostrado na Figura 2.

### **6.1 – Ordenação dos critérios**

Após a estruturação do problema, monta-se a matriz de preferência entre os critérios, conforme modelo apresentado na Tabela 3. Para montagem da matriz de preferência de critérios considera-se o ponto de vista de todos os agentes envolvidos no problema; armador, órgãos que regulamentam o transporte, a população ribeirinha e a sociedade como um todo. Assim, a ordem de preferência é, pela ordem: custo operacional, impacto ambiental e segurança. Esta ordenação reflete, em primeiro lugar, a prática usual de valorizar fortemente o aspecto econômico, mas procura incorporar na decisão outros aspectos que o autor considera muito importante. A ordem de preferência especificada resultou na matriz apresentada na Tabela 11.

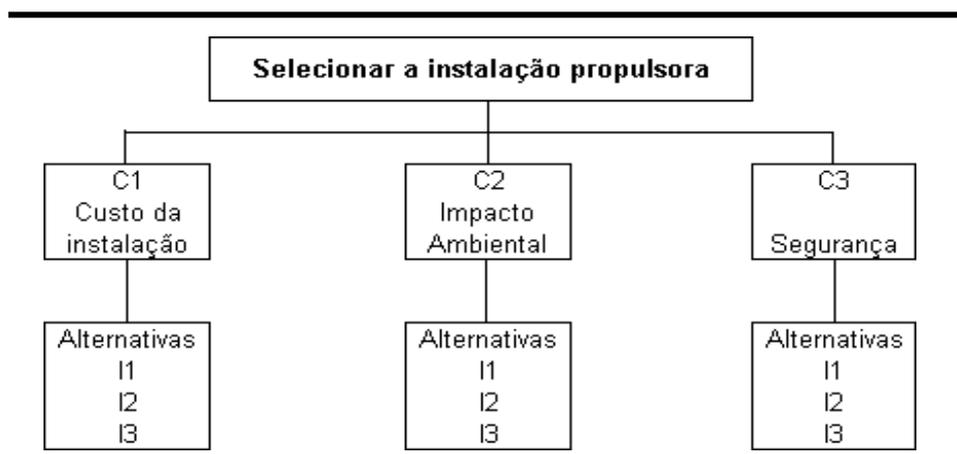


Figura 2 – Problema estruturado conforme método AHP

Tabela 11 – Matriz de comparações

Critérios	C1	C2	C3
C1-Custo operacional do comboio	1	7	7
C2 - Impacto ambiental	1/7	1	1
C3 - Segurança	1/7	1/1	1
Totais	1,29	9	9

As preferências atribuídas na Tabela 11 mostram que em relação ao custo operacional do comboio, C1 é 7 vezes preferível que C2 e C3, devido o menor custo operacional. No que tange ao impacto ambiental, C2 e C3 são igualmente preferíveis, pois as duas instalações emitem a mesma quantidade de poluentes. Assim, para normalizar a matriz divide-se cada elemento pelo total de sua respectiva coluna obtendo-se a Tabela 12.

## 6.2 – Avaliação das alternativas

O passo seguinte é comparar as instalações propulsoras em relação às suas características. O procedimento é o mesmo realizado anteriormente, substituindo a montagem da matriz de preferência de critérios pela montagem das matrizes de preferências das alternativas para cada critério.

Tabela 12– Matriz com valores normalizados

Critérios	C1	C2	C3	Média dos critérios ou pesos
C1 - Custo operacional do comboio	0,778	0,778	0,778	0,778
C2 - Impacto ambiental	0,111	0,111	0,111	0,111
C3 - Segurança	0,111	0,111	0,111	0,111

### A) Custo operacional do comboio

A matriz de comparação do custo operacional está apresentada na Tabela 13

Tabela 13 - Matriz de comparação do custo operacional do comboio

CUSTO OPERACIONAL DO COMBOIO			
Alternativas	I1	I2	I3
I1	1	5	5
I2	1/5	1	2
I3	1/5	1	1
Totais	1,4	6,5	8

Em relação aos julgamentos apresentados na matriz acima, considerou-se que I1 é 5 vezes preferível em relação a I2 e I3, pois I2 e I3 apresentam custos operacionais maiores que a instalação Diesel. Admite-se que I2 é 2 vezes mais preferível que I3, pois os custos operacionais destas instalações apresentam uma pequena diferença. Definida a matriz de comparação, normalizam-se os valores da matriz, conforme mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 – Matriz de comparações do custo operacional do comboio

Alternativas	I1	I2	I3	Média dos critérios ou pesos
I1	0,714	0,769	0,625	0,703
I2	0,143	0,154	0,250	0,182
I3	0,143	0,077	0,125	0,115

A Tabela 15 apresenta a matriz de consistência.

Tabela 15– Análise da consistência das comparações

Alternativas	I1	I2	I3	Média dos critérios ou pesos	Consistência
I1	1	5	5	0,703	2,189
I2	0,2	1	2	0,182	0,553
I3	0,2	0,5	1	0,115	0,347
Total					3,088

## B) Impacto Ambiental

A matriz de comparação do impacto ambiental está apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 - Matriz de comparação do impacto ambiental

IMPACTO AMBIENTAL			
Alternativas	I1	I2	I3
I1	1	2	2
I2	1/2	1	1
I3	1/2	1	1
Totais	2	4	4

Manifestaram-se os julgamentos sobre o impacto ambiental, considerando que I1 é 2 vezes preferível em relação a I2 e I3, pois I2 e I3 emitem gases igualmente maior quantidade de gases em relação a I1. Considera-se que I2 e I3 apresentam emissões equivalentes, portanto, atribuiu-se o valor 1. Definida a matriz de comparação, normalizam-se os valores da matriz, conforme mostrados na Tabela 17.

Tabela 17– Matriz de comparações do impacto ambiental normalizada

Alternativas	I1	I2	I3	Média dos critérios ou pesos
I1	0,500	0,500	0,500	0,500
I2	0,250	0,250	0,250	0,250
I3	0,250	0,250	0,250	0,250

A Tabela 18 apresenta a matriz de consistência.

Tabela 18 – Análise da consistência das comparações

Alternativas	I1	I2	I3	Média dos critérios ou pesos	Consistência
I1	1	2	2	0,500	1,500
I2	0,50	1	1	0,250	0,750
I3	0,50	1	1	0,250	0,750
Total					3

### C) Segurança

A matriz de comparação da segurança está apresentada na Tabela 19.

Em relação à segurança, considera-se que I1 é 1/5 (0,2) vezes preferível em relação a I2 e, I1 é 1/7 (0,143) em relação a I3. Os dados apresentados anteriormente definiram a matriz de comparação de segurança, uma vez que as instalações elétricas apresentam maiores vantagens em relação à instalação Diesel.

Tabela 19 - Matriz de comparação da segurança

SEGURANÇA			
Alternativas	I1	I2	I3
I1	1	3	5
I2	1/3	1	3
I3	1/5	1/3	1
Totais	1,50	4	9

A matriz de comparações normalizada está apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 – Matriz de segurança normalizada

Alternativas	I1	I2	I3	Média dos critérios ou pesos
I1	0,077	0,048	0,097	0,074
I2	0,385	0,238	0,226	0,283
I3	0,538	0,714	0,677	0,643

A Tabela 21 apresenta a matriz de consistência.

Tabela 21 – Análise da consistência das comparações

Alternativas	I1	I2	I3	Média dos critérios ou pesos	Consistência
I1	1	0,2	0,143	0,074	0,222
I2	5	1	0,33	0,283	0,866
I3	7	3	1	0,643	2,008
Total					3,097

### 6.3 – Classificação da decisão

Após a hierarquização dos critérios, agrupam-se estes dados na matriz de decisão, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 – Matriz de decisão

Critérios	C1	C2	C3
Alternativas			
I1	0,703	0,500	0,074
I2	0,182	0,250	0,283
I3	0,115	0,250	0,643

Para determinar a melhor opção, basta multiplicar cada critério de decisão pelos pesos determinados na Tabela 12, conforme mostrado na Tabela 23.

Tabela 23 – Classificação das alternativas pelo critério subjetivo

Critérios	C1	C2	C3	X	pesos	=	Classificação
Alternativas							
I1	0,748	0,633	0,074		0,778		61,04%
I2	0,180	0,260	0,283		0,111		20,09%
I3	0,071	0,106	0,643		0,111		18,87%

Observa-se que segundo os critérios considerados, inicialmente, a instalação indicada é a Diesel, pois apresentou maior valor na classificação, sendo que a diesel-elétrica ficou em 2º lugar e em 3º a instalação Azipod. Até o momento, não foram incorporados os dados quantitativos relacionados a estas instalações, como o valor de frete. Partindo do princípio que, para o armador, o aspecto econômico tem um grande peso na escolha da instalação este parâmetro deve ser analisado em sequência.

#### Referências bibliográficas

GARBER, M. F. **Estruturas flutuantes para a exploração de campos de petróleo no mar (FPSO):** apoio à decisão na escolha do sistema. São Paulo, 2002. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo - USP.

SAATY, T.L. (1980) - The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill. New York.

JANSEN, L. K. C. ; SHIMIZU, T. ; JANSEN, J. U.. Uma análise de investimentos considerando fatores intangíveis. Revista Produção Online , v. 4, n.4, 2004.