

## **4. Análise Hierárquica de Processos (AHP)**

Será abordada, a seguir, a caracterização de um processo de tomada de decisão, bem como a descrição da ferramenta escolhida nessa pesquisa como apoio à tomada de decisão na adoção de tecnologias de manufatura.

### **4.1 O Processo de Tomada de Decisão**

Kengpol e O'Brien (2001) descrevem que, freqüentemente, os executivos relutam em fazer grandes investimentos em novas tecnologias de manufatura pela falta de técnicas que avaliem e justifiquem tais investimentos. De acordo com os autores, as técnicas de decisão devem ser capazes de identificar o grupo de opções, avaliar as opções e ser hábil para escolher a melhor opção.

É comum o gerente se deparar com uma situação na qual uma decisão deve ser tomada entre uma série de alternativas conflitantes e concorrentes, então duas opções básicas se apresentam: 1) usar a sua intuição gerencial e 2) realizar um processo de modelagem da situação, simulando os mais diversos cenários, de maneira a estudar mais profundamente o problema (LACHTERMACHER, 2004).

A segunda opção trata o processo de tomada de decisão de forma racional, ao analisar detalhadamente todas as alternativas e suas conseqüências, assim elimina ou reduz o grau de subjetividade do processo, ampliando a probabilidade de acerto na escolha da alternativa.

Mas qual é a definição de decisão? Segundo Andrade (2004), *“uma decisão é um curso de ação escolhido pela pessoa, como o meio mais efetivo à sua disposição, para alcançar os objetivos pretendidos, ou seja, para resolver o problema que o incomoda”*.

Costa (2005) classifica as situações de decisão como demonstrado no quadro 9:

Quadro 9 – Situação de decisão

Classificação quanto ao conhecimento dos desdobramentos futuros (cenários)	Decisão sob certeza	Quando se conhece com certeza os resultados futuros oriundos da decisão.
	Decisão sob incerteza	Quando o decisor desconhece a probabilidade de ocorrência dos cenários e, por conseguinte, não pode avaliar o risco da decisão adotada.
	Decisão sob risco	Quando o decisor consegue estimar a probabilidade de ocorrência dos cenários e, por conseguinte, pode avaliar o risco associado à decisão adotada.
Classificação quanto ao tipo de decisão	Escolha	Escolher uma alternativa dentre um conjunto de alternativas viáveis
	Classificação	Classificar um conjunto de alternativas em subconjuntos.
	Ordenação	Dados os elementos de um conjunto de alternativas, ordená-las segundo algum critério.
	Classificação ordenada	Classificar um conjunto de alternativas em subconjuntos ordenados, ou em classes de referência ordenadas.
	Priorização	Dados os elementos de um conjunto de alternativas, estabelecer uma ordem de prioridades para os elementos do mesmo.
Classificação quanto ao número de critérios considerados	Decisões monocritério	Quando a decisão encontrada busca maximizar a satisfação do decisor considerando um único critério de decisão.
	Decisões Multicritérios	Quando a decisão encontrada busca maximizar a satisfação do decisor considerando um conjunto de critérios de decisão simultaneamente.

Fonte: Adaptado de Costa (2005)

Para o presente trabalho, a classificação das situações de decisão quanto ao conhecimento dos cenários enquadra-se na decisão sob risco. Quanto ao tipo de decisão, tem-se a priorização e quanto ao número de critérios, tem-se a decisão multicritérios.

Tendo reconhecido a problemática de decisão, o passo seguinte é a construção do modelo. Um modelo de decisão é uma abstração, é uma fase de um estudo de pesquisa operacional onde a eficácia do modelo depende do quanto ele se aproxima da realidade do problema abordado. Um modelo de decisão é um processador de informações que leva a uma decisão (COSTA, 2005; ANDRADE, 2004).

Lachtermacher (2004) cita diversas vantagens para o uso da modelagem em um processo de tomada de decisão:

- ✓ Os modelos forçam os decisores a tornarem explícitos seus objetivos;
- ✓ Os modelos forçam a identificação e o armazenamento das diferentes decisões que influenciam os objetivos;
- ✓ Os modelos forçam a identificação e o armazenamento dos relacionamentos entre as decisões;

- ✓ Os modelos forçam a identificação das variáveis a serem incluídas e em que termos elas serão quantificáveis;
- ✓ Os modelos forçam o reconhecimento de limitações;
- ✓ Os modelos permitem a comunicação de suas idéias e seu entendimento para facilitar o trabalho de grupo.

Como exemplo do uso de modelagem no processo decisório, têm-se os modelos baseados na disciplina de Análise de Multicritério. São modelos que tratam de problemas complexos de forma simples, ou seja, são acessíveis aos decisores sem exigir elevados investimentos de tempo e dinheiro na sua utilização (COSTA, 2002).

#### **4.2 O Método de Análise Hierárquica de Processos (AHP)**

A introdução de novas tecnologias de manufatura representa um impacto considerável na posição estratégica das empresas no mercado. O resultado da inovação geralmente é distribuído em longo prazo, tornando o processo de decisão um fator crucial no sucesso do investimento. Nesse momento, é necessário um adequado sistema de suporte a decisão para facilitar a seleção e avaliação de novas tecnologias que melhor se ajuste as metas e objetivos organizacionais (JAGANATHAN, ERINJERI E KER, 2007).

Os autores Mousavi *et al* (2007) e Yusuff, Yee e Hashmi (2001) sugerem os métodos multicritérios para análise de decisão na adoção de AMT. De acordo com os autores, os modelos decisórios de multicritérios são baseados em: (1) identificar os fatores de capacidade e (2) encontrar modelos matemáticos para descrever ou prescrever a melhor escolha. As técnicas utilizam uma combinação de suposições subjetivas e qualitativas com técnicas de modelagem matemática. Os métodos apresentados e adotados em indústrias e pesquisas provaram ser ferramentas funcionais e poderosas.

Dos métodos multicritérios, o método de Análise Hierárquica de Processos (AHP) é o mais popular e foi aplicado para resolver vários problemas complexos de decisão (JAGANATHAN, ERINJERI e KER, 2007). A vantagem principal do AHP é a habilidade inerente ao método de manipular fatores intangíveis, fatores esses

determinantes no processo de decisões, como é o caso dessa dissertação. Também os cálculos matemáticos são mais simplificados e compreensíveis, fazendo dessa técnica ideal para ser empregada no processo de avaliação proposto.

Segundo Forman *apud* Castro *et al* (2005), o método AHP leva em conta dados, experiências, percepções e intuições de uma maneira lógica e completa, permitindo que sejam feitas escalas de prioridades ou de pesos.

A aplicação da AHP é dividida em três passos:

- 1º) Representar um problema através de uma estrutura hierárquica, onde o primeiro nível da hierarquia representa o objetivo, seguindo de critérios, sub-critérios nos níveis intermediários e, finalmente, as alternativas disponíveis;
- 2º) Fazer comparação par a par;
- 3º) Derivar a prioridade ou valor de preferência para as alternativas. (CHAKRABORTY e DEY, 2006)

A escolha do método de multicritério, AHP (*Analytic Hierarchy Process*), como o método mais apropriado ao desenvolvimento da pesquisa, foi respaldada nos seguintes aspectos:

- i) Consistência, lógica, transparência, facilidade de uso (Demonstrado no tópico 4.3);
- ii) Quantidade de aplicações práticas em vários campos de estudo (Demonstrado nos gráficos de 1 a 4, do artigo "*Analytic hierarchy process: An overview of applications*" de Vaidya e Kumar (2006). O artigo apresentado pelos autores destina-se a uma revisão de literatura das aplicações da AHP. Foram referenciados 154 artigos, publicados em jornais e revistas internacionais com elevada reputação);

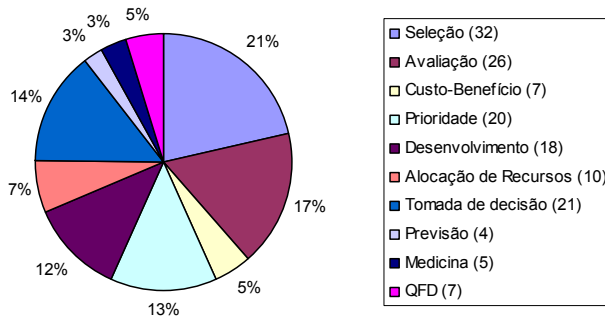


Gráfico 1 – Temas específicos de aplicação da AHP

Fonte: Vaidya e Kumar (2006)

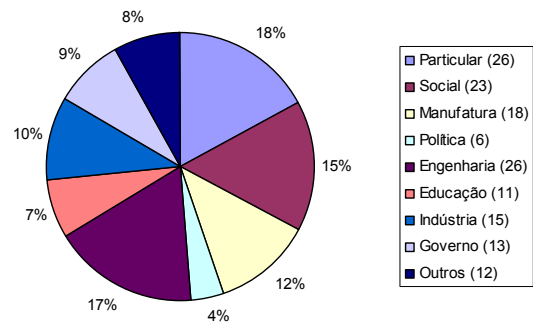


Gráfico 2 – Áreas de Aplicação da AHP

Fonte: Vaidya e Kumar (2006)

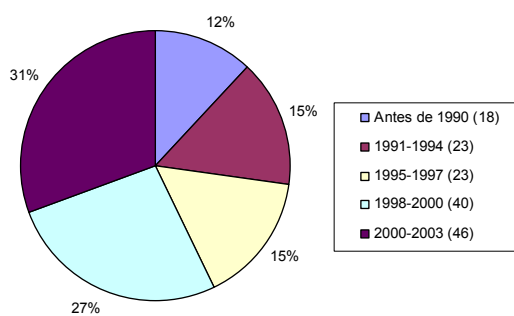


Gráfico 3 – Data de publicação de trabalhos com AHP

Fonte: Vaidya e Kumar (2006)

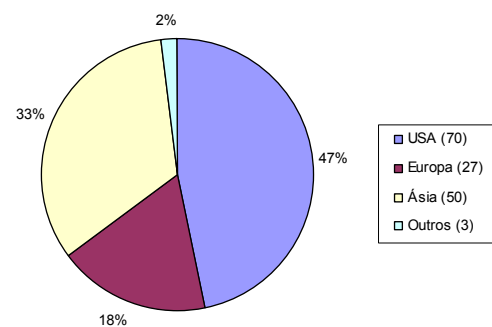


Gráfico 4 – Região de Aplicação da AHP

Fonte: Vaidya e Kumar (2006)

iii) Publicações científicas internacionais de aplicações da AHP em estudos de AMT.

Citam-se alguns exemplos:

- ✓ “A preliminary study on the potential use of the analytical hierarchical process (AHP) to predict advanced manufacturing technology (AMT) implementation” de Yusuff, Yee e Hashmi (2001):

A modelagem proposta com a AHP foi elaborada para auxiliar as empresas na implementação de AMTs. Os fatores importantes para implementação da AMTs foram incorporados no modelo a fim de proporcionar aos gestores uma avaliação da habilidade que a companhia tem para implementar a tecnologia e auxilia na identificação de ações preventivas necessárias para assegurar a implementação com sucesso. O modelo serve também como um guia que provê informações e cria consciência nos usuários ao demonstrar a extensão de mudanças requeridas para a implantação da tecnologia. O modelo facilita o processo decisório ao levar-se em conta todos os principais fatores de sucesso. A título de ilustração, a figura 7 demonstra a hierarquia modelada:



Figura 7 – Exemplo 1 de hierarquia (AHP)

Fonte: Adaptado de Yusuff, Yee e Hashmi (2001)

Ainda no mesmo artigo, os autores citam um trabalho desenvolvido por Nakamura *et al* (1996) onde o modelo de decisão de multicritério foi utilizado para mensurar os impactos econômicos, estratégicos, sociais, operacionais e organizacionais causados pela implementação da tecnologia CIM.

✓ *“Measuring a manufacturing system’s performance using Saaty’s system with feedback approach”* de Yurdakul (2002):

O método AHP foi utilizado juntamente com o SWF (systems-with-feedback) para alcançar o objetivo global de definir a estratégia competitiva mais adequada. O uso da AHP foi restrito a análise de como os critérios de desempenho da manufatura (Confiabilidade, Flexibilidade, Qualidade, Custo e Rapidez) influenciavam a lucratividade. Cada critério foi desmembrado em um nível inferior de subcritérios, como exemplo, a figura 8, demonstra o critério flexibilidade e os sub-critérios:

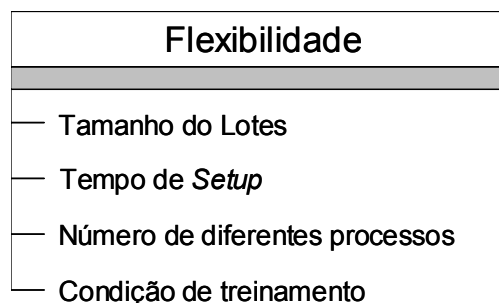


Figura 8 – Exemplo de critério e subcritério

Fonte: Adaptado de Yurdakul (2002)

- ✓ *“Selection of computer-integrated manufacturing technologies using a combined analytic hierarchy process and goal programming model”* de Yurdakul (2004):

O artigo desenvolve um sistema de suporte a decisão para avaliação e seleção de alternativas de CIM baseado em análise quantitativa e qualitativa. Através da formulação de uma hierarquia (AHP) mediu-se a contribuição das alternativas CIM para a posição competitiva da função manufatura.

- ✓ *“Use of AHP in decision-making for flexible manufacturing systems”* de Bayazit (2005):

O artigo incluiu na hierarquia critérios e sub-critérios quantitativos e qualitativos para avaliar a implementação do FMS. Foram definidos quatro critérios para avaliação: Vantagens, oportunidades, riscos e desvantagens. O critério “vantagens” foi desmembrado no sub-critério vantagens para o cliente e vantagens para a empresa, que por sua vez, o sub-critério vantagens para o cliente foi avaliado em qualidade, entrega, variedade de produtos e satisfação. A conclusão do problema demonstrou score favorável a alternativa de implementar o FMS.

- ✓ *“Evaluation of CIM technologies in Saudi industries using AHP”* de Al-Ahmari (2007):

O artigo avalia várias alternativas de grupos de tecnologias CIM mediante a comparação dos critérios baseados nos objetivos de manufatura. São citados como objetivos de manufatura: Redução do custo de produção, redução do tempo de produção, aumento no nível de produtividade, dentre outros. Algumas das alternativas de tecnologias CIM foram: CAD/CAM, CAD/CAE, LAN/EDI. A figura 9 ilustra a hierarquia.

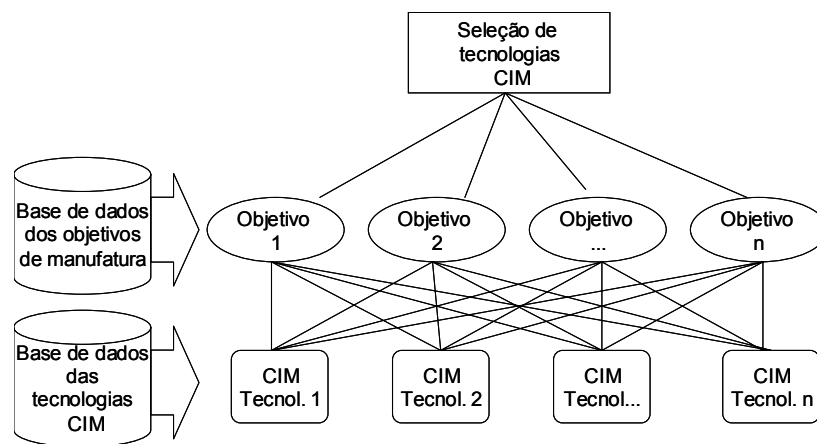


Figura 9 – Exemplo 2 de hierarquia (AHP)

Fonte: Al-Ahmari (2007)

iv) Não foi encontrado nenhum trabalho realizado no Brasil que tratasse especificamente da análise de investimento em AMT com o uso da AHP.

#### 4.3 Descrição do Método AHP – Baseado em Saaty (1991)

O tomador de decisão, quer esteja motivado pela necessidade de prever ou controlar, geralmente enfrenta um complexo sistema de componentes correlacionados, como recursos, resultados ou objetivos desejados, pessoas ou grupos de pessoas etc.; ele está interessado na análise desse sistema. Presumivelmente, quanto melhor ele entender essa complexidade, melhor será sua previsão de decisão (SAATY, 1991).

O método AHP foi desenvolvido na Wharton School of Business – Universidade da Pensilvânia por Thomas L. Saaty, e descrito no livro *“The Analytic Hierarchy Process”*, publicado em 1980.

Saaty foi motivado pelas dificuldades de comunicação que observou durante seu trabalho. Existia uma lacuna em relação à ausência de qualquer enfoque sistêmico prático para determinação de prioridades na tomada de decisão (SAATY, 1991).

Para o idealizador do método AHP, a metodologia deve ser útil para formular problemas incorporando conhecimento e julgamentos de forma que as questões envolvidas sejam claramente articuladas, avaliadas, debatidas e priorizadas. Uma das grandes vantagens do AHP é a possibilidade de se modelar um problema com dados quantitativos e com aspectos subjetivos, envolvendo também o grau de certeza ou incerteza envolvido no problema.



De acordo com Costa (2002), o Método de Análise Hierárquica está baseado em três princípios do pensamento analítico, que sintetizam as etapas para a construção do modelo multicritério:

### 1º Princípio - Construção de hierarquias

No AHP, o problema é estruturado em níveis hierárquicos, como forma de buscar uma melhor compreensão e avaliação do mesmo. Uma hierarquia, segundo Saaty (1991), “é uma abstração da estrutura de um sistema para estudar as interações funcionais de seus componentes e seus impactos no sistema total”. A construção de hierarquias é uma etapa fundamental do processo de raciocínio humano.

Os elementos chaves de uma hierarquia são (figura 10): a) Foco principal (objetivo global), b) Conjunto de alternativas viáveis (representam a possibilidade de decisão) e c) Conjunto de critérios (quesitos à luz dos quais deve-se avaliar a alternativa). Dependendo da complexidade do problema, podem ser utilizadas múltiplas camadas de critérios, a partir da estruturação destes em sub-critérios.

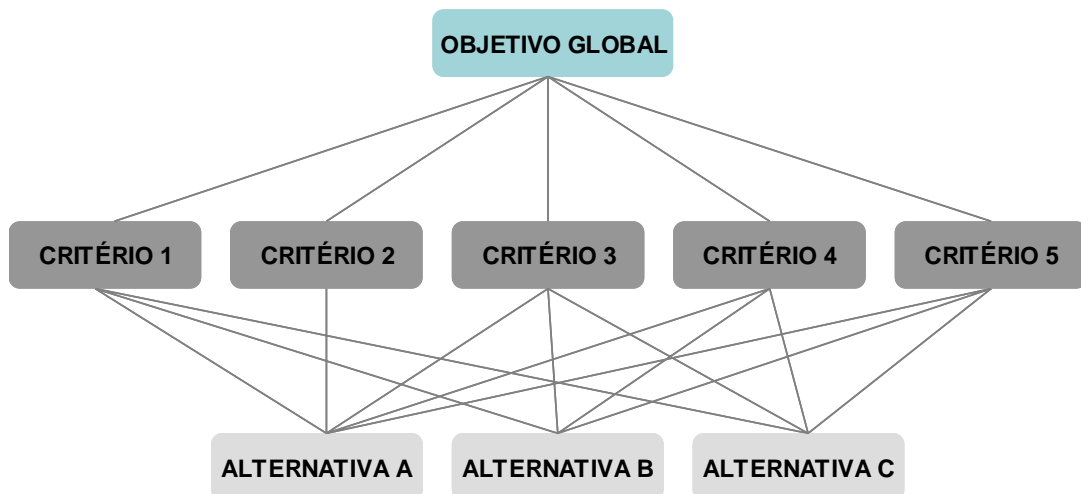


Figura 10 – Estrutura Hierárquica genérica de problemas de decisão

A título de exemplificação, baseadas na estrutura anteriormente demonstrada, serão demonstradas as etapas da construção e aplicação do método AHP. Para tal, segue a nomenclatura utilizada:

Objetivo Global	OG
Critério 1	C1
Critério 2	C2
Critério 3	C3
Critério 4	C4
Critério 5	C5
Alternativa A	AA
Alternativa B	AB
Alternativa C	AC

## **2º Princípio – Definição de Prioridades e Julgamentos**

O ajuste das prioridades no AHP fundamenta-se na habilidade do ser humano de perceber o relacionamento entre objetos e situações observadas, comparando pares à luz de um determinado foco ou critério (julgamentos paritários).

A priorização das alternativas (BOAS, 2005) é obtida de respostas a perguntas do tipo: “qual a importância do critério 1 em relação ao critério 2?” Esse procedimento é conhecido por comparação par a par (*pairwise comparison*), sendo utilizado para estimar a escala em que os elementos de cada nível da hierarquia são medidos e avaliar, no final, a performance de cada alternativa em relação aos critérios.

Portanto, o método baseia-se na comparação entre pares de critérios e subcritérios, se existirem, e na construção de uma série de matrizes quadradas.

As comparações par a par, expressas em termos lingüísticos/verbais, são convertidas em valores numéricos usando a Escala Fundamental de Saaty para julgamentos comparativos, sendo essa escala de valores, que varia de 1 a 9, demonstrada no quadro 10. Mede-se ,então, o grau de importância do elemento de um determinado nível sobre os elementos de um nível inferior.

Quadro 10 – Escala Fundamental de Saaty para julgamentos comparativos

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
2,4,6,8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição entre duas definições

Fonte: Saaty (1991)

A comparação par a par, gera matrizes quadradas, onde o número na linha  $i$  e na coluna  $j$  dá a importância do critério  $C_i$  em relação à  $C_j$ , como se observa na forma matricial indicada abaixo:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1j} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2j} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3j} \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & 1/a_{3j} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Os elementos  $a_{ij}$  indicam o julgamento do par de critérios ( $C_i, C_j$ ) e  $\alpha$  o valor da intensidade de importância. Saaty (1991) define as seguintes regras para cada elemento  $a_{ij}$  da matriz:

- Se  $a_{ij} = \alpha$ , então  $a_{ji} = 1/\alpha$ ,  $\alpha \neq 0$ .
- Se  $C_i$  é julgado como de igual importância relativa a  $C_j$ , então  $a_{ij} = 1$ ,  $a_{ji} = 1$  e  $a_{ii} = 1$ , para todo  $i$ .

Para o exemplo proposto, a matriz abaixo (quadro 11), demonstra a comparação do desempenho das alternativas à luz do critério C3, traduzida em julgamentos:

Quadro 11 – Exemplo da matriz de comparação das alternativas à luz do critério C3

C3	AA	AB	AC
AA	1	1	2
AB	1	1	1
AC	1/2	1	1

É realizada a matriz de comparação para todos os critérios em relação às alternativas e em relação ao objetivo Global.

Cumprida a fase de coleta dos julgamentos de valor, e conseqüente formação das matrizes de comparação para cada nó de julgamento dos níveis hierárquicos, a fase seguinte é o momento de associação de prioridades às alternativas viáveis. Para tanto, alguns procedimentos matemáticos, são organizados em três pontos (COSTA, 2002):

- Obtenção do Quadro de Julgamentos Normalizados: Para cada nó de julgamento da hierarquia calcula-se a matriz normalizada. O cálculo compreende o somatório dos elementos de cada coluna e a divisão de cada elemento da coluna pelo respectivo somatório. A matriz que resulta do processo é chamada de matriz normalizada, a qual é definida como:

$$A' = [a'_{ij}] \text{ onde } a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{ik}} \text{ para } 1 \leq i \leq n, \text{ e } 1 \leq j \leq n$$

Quadro 12 – Exemplo 1 do cálculo para matriz normalizada

C3	AA	AB	AC
AA	1	1	2
AB	1	1	1
AC	1/2	1	1
Soma	1+1+1/2=5/2	1+1+1=3	2+1+1=4

Quadro 13 – Exemplo 2 do cálculo para matriz normalizada

C3	AA	AB	AC
AA	1/(5/2)	1/3	2/4
AB	1/(5/2)	1/3	1/4
AC	(1/2)/(5/2)	1/3	1/4

Quadro 14 – Exemplo Matriz normalizada para o C3

C3	AA	AB	AC
AA	0,4	0,333	0,50
AB	0,4	0,333	0,25
AC	0,2	0,333	0,25

- Cálculo da Prioridade Média Local (PML): as PMLs são as médias das linhas dos quadros normalizados, ou vetor de prioridades local (autovetor), ou ainda o peso relativo calculado para cada um dos nós de julgamento. A PML é determinada por:

$$W = [W_k] \text{ onde } W_k = \frac{\sum_{i=1}^n a'_{ij}}{n} \text{ para } 1 \leq j \leq n, \text{ e } 1 \leq k \leq n.$$

Quadro 15 – Exemplo cálculo PML<sub>C3</sub>

C3	AA	AB	AC	PML <sub>C3</sub>
AA	0,4	0,34	0,5	(0,4+0,34+0,5)/3=0,413
AB	0,4	0,34	0,25	(0,4+0,34+0,25)/3=0,327
AC	0,2	0,34	0,25	(0,2+0,34+0,25)/3=0,260

Quadro 16 – Exemplo cálculo PML para as alternativas à luz de todos os critérios

	C1	C2	C3	C4	C5
AA	0,10	0,49	0,41	0,54	0,64
AB	0,30	0,31	0,33	0,30	0,10
AC	0,60	0,20	0,26	0,16	0,26

Quadro 17 – Exemplo cálculo PML para a importância dos critérios à luz de objetivo Global

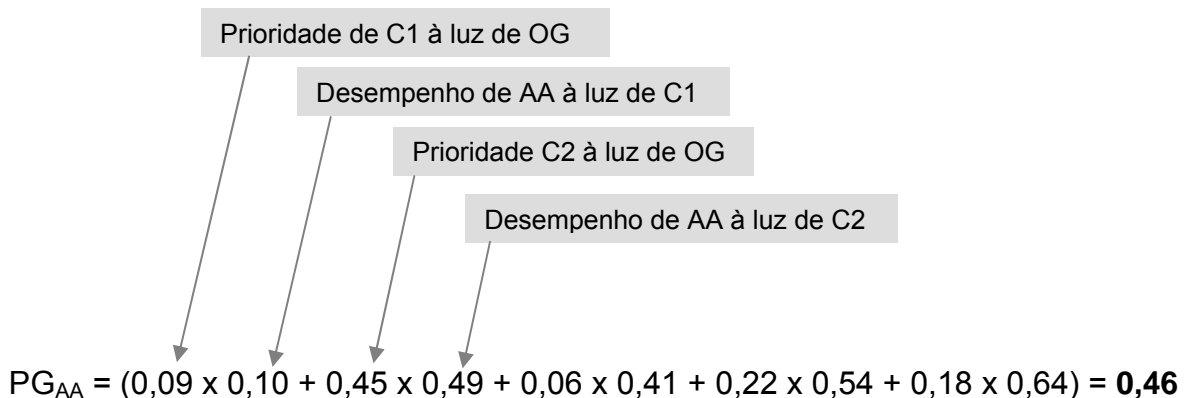
	C1	C2	C3	C4	C5
OG	0,09	0,45	0,06	0,22	0,18

- Cálculo da Prioridade Média Global (PG): para calcular a PG é necessário combinar as PMLs no vetor de prioridades global. Os elementos da PG representam os desempenhos das alternativas à luz do foco principal. Uma vez que todos os pesos relativos tenham sido calculados na PML, uma PG (ou peso composto “ $C_d$ ”) para cada escolha da decisão (chamada “ $d$ ”) é determinada. Isso é definido pela agregação de pesos sobre a hierarquia para cada escolha da decisão. Para tanto, multiplica-se o peso através do caminho, desde o topo da hierarquia, descendo até as escolhas da decisão, e então, soma-se esses produtos de todos os diferentes caminhos da escolha da decisão. O resultado é um único valor de peso para cada escolha da decisão. Pela notação matemática, o peso composto,  $C$ , é dado por:

$$C = [c_d] \text{ para } 1 \leq d \leq n \text{ onde } c_d = \sum_{t=1}^{nt} W_t * \prod_{l=1}^{nl-1} W_l$$

onde  $nt$  é o número de nodos terminais na hierarquia para a alternativa  $d$ ,  $nl$  o número de níveis na hierarquia,  $t$  denota o nó “folha” na hierarquia correspondente à alternativa  $d$  e a seqüência  $t, nl - 1, nl - 2, \dots, 1$  denota o caminho na hierarquia desde a alternativa  $d$  até a raiz.

Voltando ao exemplo tem-se:



Quadro 18 – Exemplo cálculo PG das alternativas à luz do Objetivo Global

	AA	AB	AC
PG	0,46	0,28	0,26

Para finalizar a descrição do modelo AHP, o último princípio é a consistência lógica, etapa essa que avalia a consistência e confiança do método.

### 3º princípio – Consistência Lógica

Como a base do método AHP é a realização de um julgamento de valor, podem-se esperar, em algumas situações, avaliações inconsistentes. Prevendo essa eventualidade, Saaty propõe procedimentos que permitem avaliar a consistência dos julgamentos:

- i) Cálculo do Índice de Consistência (IC): do inglês *Consistency Index*, avalia o grau de inconsistência da matriz de julgamentos paritários, através da seguinte equação:

$$IC = \frac{|\lambda_{\max} - N|}{N - 1}$$

onde:

N é a ordem da matriz e  $\lambda_{\max}$  é o maior autovalor da matriz de julgamentos paritários.

Abaixo está exemplificado o cálculo de  $\lambda_{\max}$ , em relação ao C3:

Primeiro, multiplica-se a matriz das comparações aos pares das alternativas à luz do critério C3, chamada matriz [A], pelo vetor de prioridades local (PML<sub>C3</sub>) [B], que gerará a matriz [A'], em seguida somam-se as linhas [A'] para gerar um vetor novo [C].

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,413 \\ 0,327 \\ 0,260 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,413 & 0,327 & 0,521 \\ 0,413 & 0,327 & 0,260 \\ 0,206 & 0,327 & 0,260 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,261 \\ 1 \\ 0,793 \end{pmatrix}$$

Logo, divide-se cada elemento do vetor [C] por seu elemento correspondente no vetor [B] para encontrar um vetor [D]:

$$[D] = [1,261/0,413 \quad 1/0,327 \quad 0,793/0,260] = [3,068 \quad 3,058 \quad 3,050]$$

Agora,  $\lambda_{\max}$  equivale à soma dos componentes do vetor [D], dividida pela ordem da matriz:

$$\lambda_{\max} = (3,068 + 3,058 + 3,050)/3 = 3,058$$

$$IC = |(3,058 - 3)| / (3-1) = 0,029$$

- ii) Cálculo da Razão de Consistência (RC): do inglês *Consistency Ratio*, permite avaliar a inconsistência em função da ordem da matriz de julgamentos, através da seguinte equação:

$$RC = \frac{IC}{IR}$$

onde:

IC é o Índice de Consistência e IR é o Índice Randômico (*do inglês*, Random Index).

O IR é o índice de consistência obtido para uma matriz randômica recíproca, com elementos não-negativos, para vários tamanhos de matriz N foram aproximados por Saaty (baseado num grande número de simulações) como demonstra o quadro 19:

Quadro 19 – Índices de Consistência Randômicos (IR)

Ordem da Matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Valores de IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Fonte: Saaty (1991)

Para o exemplo tem-se:

$$RC = 0,029/0,58 = 0,050$$



Em seu trabalho, Saaty sugere que é aceitável uma razão de consistência menor que 0,10. Para valores de  $RC > 0,10$  sugere-se uma revisão na matriz de comparações.

#### 4.4 Limitações e críticas ao uso do AHP

Apesar de seu amplo e crescente espectro de aplicações, o AHP apresenta alguns problemas e limitações que devem ser levados em conta.

Dentre as críticas ao AHP, a reversão de ordem (*rank reversal*) tem sido a mais citada e polêmica. Bana e Costa e Vainsnick (2001) e Silva e Belderrain (2007) mostraram alguns exemplos onde a inclusão ou exclusão de alternativas ou critérios gera o efeito da reversão de ordem das relações de dominância. A reversão de ordem é atribuída pelos pesquisadores como o “efeito colateral” do cálculo que normaliza o vetor de prioridades.

Belton e Gear *apud* Passo, Gomes e Freitas Junior (2007) relacionam esse problema a forma com que o método clássico da AHP normaliza os pesos das comparações. Como solução para o problema, os autores sugerem que os elementos sejam divididos pelo maior elemento do conjunto não pela soma do conjunto, sendo mostrado que dessa forma não ocorre a reversão de ordem.

Outras críticas são levantadas por Goodwin e Wright *apud* Thomas (2006):

- a) Conversão da escala verbal para numérica: Devido ao uso de um método verbal de comparação, este converte automaticamente os julgamentos para uma escala numérica, no entanto, a correspondência entre as escalas é baseada em pressupostos não testados;
- b) A realização das comparações par a par em uma escala restrita de 1 a 9 pode causar inconsistência nos julgamentos. Por exemplo, se A é considerado cinco vezes mais importante que B e B, cinco vezes mais importante que C, então, para termos consistência, A teria que ser 25 vezes mais importante que C, o que não é possível por causa do limite de escala. Lootsma *apud* Silva e Belderrain (2007) propõe como uma variação do AHP clássico, o AHP

multiplicativo, onde ao invés da escala linear é utilizada uma escala geométrica e multiplicativa;

- c) Dificuldade dos decisores em escolher uma opção verbal que represente fielmente a sua preferência, podendo gerar comparações redundantes e inconsistentes, reduzindo a atratividade para os usuários;
- d) Número grande de comparações e alternativas eleva o trabalho computacional e a dificuldade de manter a consistência nos julgamentos.