

ANGELA HUM TCHEMRA

TABELA DE DECISÃO ADAPTATIVA
NA TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

São Paulo
2009

ANGELA HUM TCHEMRA

TABELA DE DECISÃO ADAPTATIVA
NA TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia.

São Paulo
2009

ANGELA HUM TCHEMRA

TABELA DE DECISÃO ADAPTATIVA
NA TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Computação e
Sistemas Digitais

Orientador:
Prof. Dr. João José Neto

São Paulo
2009

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 24 de junho de 2009.

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

FICHA CATALOGRÁFICA

Tchemra, Angela Hum

Tabela de decisão adaptativa na tomada de decisões multicritério / A.H. Tchemra. – ed. rev. -- São Paulo, 2009.

172 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1. Tomada de decisão 2. Teoria da computação 3. Inteligência artificial I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II. t.

*Ao meu filho Rodrigo,
com muito amor e carinho.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João José Neto, pela paciência e sabedoria durante a orientação, pelo constante e persistente estímulo durante todo o trabalho de pesquisa e elaboração dessa tese, e principalmente pela sua verdadeira amizade.

Ao meu filho, aos meus irmãos, aos meus pais e à minha família que tanto me apoiaram e estiveram presentes nos momentos em que mais precisei. Um agradecimento especial à Liliane Marques Wong, que mesmo longe, foi uma das maiores incentivadoras do meu trabalho e muito me ajudou.

Aos amigos e professores da Universidade Presbiteriana Mackenzie, Licoln, Sérgio, Edson, Melanie, Silza, Orlando e tantos outros. Ao Alex Takai pelo auxílio na implementação do software. Ao Rubens de Camargo pelas reuniões de estudo sobre adaptatividade e pela amizade. Um agradecimento especial ao Vilar Ribeiro de Figueiredo, que foi quem me incentivou a enfrentar o desafio do doutorado e me acompanhou em todos os momentos, me apoiando e principalmente pela sua amizade.

Aos amigos da Faculdade de Engenharia São Paulo e da Fundação Armando Álvares Penteado pelo apoio constante.

Aos professores Dr. Paulo Sérgio Muniz Silva, Dr. Ricardo Luis de Azevedo da Rocha, Dr. Aparecido Valdemir de Freitas e Dr. Almir Rogério Camolesi pela participação da banca e pelas sugestões, que muito contribuíram para a versão revisada do meu trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, me incentivaram e me apoiaram, tornando possível a conclusão desta tese.

RESUMO

Esta tese apresenta a formulação de uma extensão da tabela de decisão adaptativa, denominada Tabela de Decisão Adaptativa Estendida (*TDAE*), que tem por objetivo apoiar aplicações de tomada de decisão multicritério. É implementado um algoritmo de tomada de decisão para a *TDAE* que incorpora os mecanismos de tabelas de decisão tradicionais, técnicas adaptativas e procedimentos de métodos multicritério. A descrição e execução do algoritmo e a aplicabilidade da *TDAE* em problemas de decisão multicritério são mostradas numa aplicação particular. É apresentada uma avaliação de desempenho do algoritmo de decisão, em relação ao custo de tempo e de memória exigidos para a sua execução. Uma ferramenta de apoio à decisão baseada na *TDAE* é descrita e implementada. Os resultados do trabalho mostram que a *TDAE* é viável e pode ser uma opção alternativa de dispositivo para apoiar processos decisórios de problemas de decisão multicritério.

Palavras-chave: Tabelas de decisão adaptativa. Adaptatividade. Tomada de decisão. Métodos multicritério.

ABSTRACT

This thesis presents the formulation of an extension of the adaptive decision table called Table of Extended Adaptive Decision (*TEAD*), which aims at supporting applications of multicriteria decision making. A decision making algorithm is implemented for the *TEAD* embodying the traditional decision tables mechanisms, adaptive techniques, and multicriteria methods procedures. The description and implementation of the algorithm and the applicability of *TEAD* in multicriteria decision problems are shown in a particular application. A perform evaluation of the decision algorithm is presented in relation to time and memory costs required for its implementation. A tool for decision support based on *TEAD* is described and implemented. The results of the study show that *TEAD* is viable and can be a device alternative option to support the decision making problems of multicriteria decision.

Keywords: Adaptive decision tables. Adaptivity. Decision making. Multicriteria methods.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama geral da fundamentação conceitual.....	25
Figura 2 – Estrutura geral de um dispositivo adaptativo.....	29
Figura 3 – Estrutura da Tabela de Decisão.....	37
Figura 4 – Estrutura geral da TDA	50
Figura 5 – Matriz de decisão (Fülöp 2005).....	76
Figura 6 – Exemplo de hierarquia de um problema de decisão	83
Figura 7 – Matriz E de julgamentos aos pares entre os critérios.....	83
Figura 8 – Matriz Z de desempenho das alternativas em relação aos critérios	85
Figura 9 – Hierarquia do problema de decisão.....	88
Figura 10 – Matriz de julgamento	88
Figura 11 – Matriz de desempenho.....	89
Figura 12 – Estrutura geral da $TDAE$ para aplicações de decisões multicritério	91
Figura 13 – Estrutura de cada função adaptativa FAD na tabela	95
Figura 14 – Tabela de decisão convencional	101
Figura 15 – Matriz de decisão	102
Figura 16 – Matriz E de comparação entre os critérios	112
Figura 17 – Matriz Z de desempenho das alternativas em relação aos critérios.....	117
Figura 18 – Matriz de comparação MC_i	117
Figura 19 – Estrutura hierárquica do exemplo.....	130
Figura 20 – Tabela de decisão subjacente do exemplo	131
Figura 21 – Matriz de comparação E entre os critérios	131
Figura 22 – Matriz de comparação normalizada (E')	132
Figura 23 – Matriz MC_1	133
Figura 24 – Matriz MC_2	133
Figura 25 – Matriz MC_3	133
Figura 26 – Matriz Z de desempenho das alternativas	134
Figura 27 – Configuração t_1 da tabela de decisão do exemplo.....	135
Figura 28 – Regra rcc a ser consultada	136
Figura 29 – Configuração t_1 da $TDAE$ do exemplo	138

Figura 30 – Configuração t_2 da <i>TDAE</i> do exemplo	139
Figura 31 – Interface inicial da <i>TDAE</i>	147
Figura 32 - Tela para a entrada dos critérios e das alternativas.....	149
Figura 33 - Configuração inicial t_0 da tabela de decisão subjacente.....	149
Figura 34 - Tela para o decisor julgar os critérios	150
Figura 35 - Matriz de comparação das alternativas diante do critério escolhido	151
Figura 36– Matriz de desempenho das alternativas	151
Figura 37 – Tabela de decisão com as regras ordenadas	152
Figura 38 – Consulta a uma regra específica.....	152
Figura 39 – Hierarquia da satisfação na escola (Fonte: Saaty, 1991).....	154
Figura 40 – Entrada dos critérios e das alternativas do problema.....	154
Figura 41 – Tabela de decisão subjacente inicial.....	155
Figura 42 – Matriz de julgamentos entre os critérios.....	155
Figura 43 – Matriz de julgamentos normalizada e pesos dos critérios	156
Figura 44 – Matrizes de comparação das alternativas em relação a cada um dos critérios.....	157
Figura 45 – Matriz de desempenho das alternativas.....	157
Figura 46 – Regras ordenadas na tabela de decisão.....	158
Figura 47 – Pesos das regras ordenadas na tabela de decisão.....	158
Figura 48 – Regra a ser consultada na tabela de decisão	159
Figura 49 – Mensagem de regra não encontrada	159
Figura 50 – Alternativa para a nova regra	159
Figura 51 – Nova configuração da tabela de decisão	160
Figura 52 – Configuração da tabela de decisão simplificada	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de Tabela de Decisão de Entradas Mistas	39
Tabela 2 – Exemplo de Tabela de Decisão de Entradas Limitadas	40
Tabela 3 – Exemplo de Tabela de Decisão com Entradas Estendidas	40
Tabela 4 – Exemplo de Tabela de Decisão com Entradas Codificadas	41
Tabela 5 – Exemplo de Tabela de Decisão com ações a serem tomadas.....	41
Tabela 6 – Exemplo de seqüência de ações a serem tomadas	42
Tabela 7 – Exemplo de seqüência de ações numerada.....	42
Tabela 8 – Exemplo de Tabela de Decisão e a Regra ELSE	43
Tabela 9 – Exemplo de Tabela de Decisão com condições indiferentes nas regras.	44
Tabela 10 – Escala Fundamental de Saaty (Fonte: Saaty, 1991)	84
Tabela 11 - Tabela de índices de consistência randômico (Fonte: Saaty, 1991)	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

$\mathcal{A} = \{a_k, 1 \leq k \leq p\}$	Conjunto de alternativas
\mathcal{AC}	Ações adaptativas elementares de consulta
$\mathcal{AD} = (\mathcal{AC}, \mathcal{AE}, \mathcal{AI})$	Corpo de uma função adaptativa
\mathcal{AE}	Ações adaptativas elementares de exclusão
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
\mathcal{AI}	Ações adaptativas elementares de inclusão
$ax = (ax_1, \dots, ax_j, \dots, ax_p)^T$	Vetor dos valores globais das alternativas
$C = \{c_i, 1 \leq i \leq m\}$	Conjunto de critérios
$\mathcal{CA} = (\mathcal{FA}, \mathcal{RA})$	Mecanismo adaptativo
$CC(A_i, A_j)$	Índice de concordância das alternativas A_i e A_j
CI	Índice de consistência
CR	Razão de consistência
cs	Vetor de consistência
\mathcal{CT}	Configurações da \mathcal{TDAE}
\mathcal{CV}	Conjunto finito de valores válidos dos critérios
$\mathcal{DA} = (\mathcal{DN}, \mathcal{CA})$	Dispositivo adaptativo dirigido por regras
$DC(A_i, A_j)$	Índice de discordância das alternativas A_i e A_j
$\hat{a}_{i,j}$	Valores dos critérios
\mathcal{DN}	Dispositivo subjacente não-adaptativo
$E_{i,j}$	Valor de comparação c_i e c_j
E	Matriz de comparação entre critérios
ELECTRE	<i>Elimination and Choice Translating Reality</i>
$\mathcal{FA} = \{\mathcal{FAD}_s, 1 \leq s \leq n\}$	Conjunto das funções adaptativas
\mathcal{FM}	Conjunto de funções auxiliares
$G = \{g_i, 1 \leq i \leq ng\}$	Conjunto de geradores

ICR	Índice de consistência randômico
λ_{max}	Autovalor
\mathcal{M}	Método multicritério
m	Quantidade de critérios
MACBETH	<i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i>
MAUT	<i>Multiple Attribute Utility Function</i>
MC_i	Matriz de comparação entre as alternativas em relação a cada critério
n	Quantidade de regras
NF	Nome da função adaptativa
Olap	Processamento Analítico Online
p	Quantidade de alternativas
$P = \{p_i, 1 \leq i \leq np\}$	Conjunto de parâmetros
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation</i>
$\mathcal{R} = \{r_j, 1 \leq j \leq n\}$	Conjunto de regras
$\mathcal{RA} = \{ra_j, 1 \leq j \leq n\}$	Conjunto de regras da camada adaptativa
$r_j = (d_{i,j}, x_{k,j})$	Regra da tabela de decisão subjacente
SAD	Sistemas de Apoio à Decisão
SIG	Sistemas de Informação Gerencial
SMART	<i>Simple Multi Attribute Rating Technique</i>
$t_0 \in \mathcal{CT}$	Configuração inicial da \mathcal{TDAE}
$\mathcal{TD} = (C, \mathcal{A}, \mathcal{R})$	Tabela de Decisão
$\mathcal{TDA} = (\mathcal{TDN}, CA)$	Tabela de Decisão Adaptativa
$\mathcal{TDAE} = (\mathcal{TDA}, \mathcal{FM}, \mathcal{M})$	Tabela de Decisão Adaptativa Estendida
\mathcal{TDN}	Tabela de Decisão Subjacente
t_i	Configurações da \mathcal{TDAE}
TODIM	Tomada de Decisão Interativa Multicritério
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>

$$V = \{v_i, 1 \leq i \leq nv\}$$

Conjunto de variáveis

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_m)^T$$

Vetor de pesos dos critérios

$$x_{k,j}$$

Valores para as alternativas

$$Y_k$$

Valor associado à regra r_k

$$Z$$

Matriz de desempenho das alternativas

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	8
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS	11
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 MOTIVAÇÃO.....	18
1.2 JUSTIFICATIVA	22
1.3 OBJETIVOS	23
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	25
2 TECNOLOGIA ADAPTATIVA	27
2.1 ADAPTATIVIDADE	27
2.2 DISPOSITIVOS ADAPTATIVOS	29
2.2.1 Dispositivo adaptativo dirigido por regras	29
2.2.2 Outros formalismos adaptativos	32
2.2.3 Tabela de decisão adaptativa	34
2.2.3.1 Tabela de decisão.....	34
2.2.3.2 Estrutura da tabela de decisão	36
2.2.3.3 Escopo dos valores das condições e ações.....	38
2.2.3.4 Uso da regra ELSE	42
2.2.3.5 Número de regras de uma tabela de decisão	44
2.2.3.6 Divisão de uma tabela de decisão	45
2.2.3.7 Operação da tabela de decisão.....	46
2.2.3.8 Tabela de Decisão Adaptativa	47
3 TEORIA DA DECISÃO	53
3.1 TOMADA DE DECISÃO	55
3.2 PROCESSOS DECISÓRIOS	57
3.3 RECURSOS COMPUTACIONAIS DE APOIO À DECISÃO.....	61

3.3.1 SIG e OLAP	62
3.3.2 Sistemas de Apoio à Decisão (SAD).....	63
3.3.3 Técnicas de Inteligência Artificial nos Negócios	65
3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS SISTEMAS COMPUTACIONAIS.....	71
3.5 MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO.....	74
3.5.1 Preferências de escolha	78
3.5.2 Método AHP (Analytic Hierarchy Process)	82
3.5.3 Consistência dos julgamentos.....	85
3.5.4 Exemplo de aplicação do AHP	87
4 EXTENSÃO DA <i>TDA</i> PARA APOIAR DECISÕES MULTICRITÉRIO.....	90
4.1 FORMULAÇÃO DA <i>TDAE</i>	91
4.2 OPERAÇÃO DA <i>TDAE</i>	97
4.3 ALGORITMO DE TOMADA DE DECISÃO DA <i>TDAE</i>	99
4.3.1 Passos principais do Módulo I da <i>TDAE</i>	100
4.3.2 Passos principais do Módulo II da <i>TDAE</i>	102
4.3.3 Passos principais do Módulo III da <i>TDAE</i>	104
4.4 AVALIAÇÃO DO ALGORITMO DE DECISÃO DA <i>TDAE</i>	106
4.4.1 Avaliação das exigências de espaço.....	107
4.4.2 Avaliação das exigências de tempo de processamento.....	108
4.4.2.1 Exigência de tempo do Módulo I.....	108
4.4.2.2 Avaliação do tempo do Módulo II.....	111
4.4.2.3 Avaliação do tempo do Módulo III.....	120
5 APLICAÇÃO DA <i>TDAE</i> EM DECISÕES MULTICRITÉRIO	128
5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO.....	129
5.2 ALGORITMO DE TOMADA DE DECISÃO DA APLICAÇÃO	130
5.2.1 Passos do Módulo I.....	130
5.2.2 Passos do Módulo II.....	131
5.2.3 Passos do Módulo III.....	135
5.2.3.1 Fase 1 - Montagem da camada adaptativa da <i>TDAE</i>	135
5.2.3.2 Fase 2 - Uso da <i>TDAE</i> para consultas.....	136

5.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO ALGORITMO DE DECISÃO	139
6 IMPLEMENTAÇÃO DA <i>TDAE</i>	147
6.1 INTERFACE E EXECUÇÃO DA <i>TDAE</i>	148
6.2 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO SOFTWARE <i>TDAE</i>	153
6.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O SOFTWARE <i>TDAE</i>	161
7 CONCLUSÕES	162
7.1 CONTRIBUIÇÕES	163
7.2 TRABALHOS FUTUROS	165
REFERÊNCIAS.....	167

1 INTRODUÇÃO

Problemas de tomada de decisão têm sido objetos de estudos e pesquisas em diversas áreas do conhecimento científico, dentre as quais, a da teoria da decisão e a da ciência da computação. A dinâmica e, principalmente, a complexidade dos processos decisórios geraram e têm exigido o desenvolvimento de metodologias e de técnicas, que auxiliem as pessoas e as organizações na busca das melhores soluções para os vários tipos de problemas de decisão.

São encontrados problemas de tomada de decisão em áreas como a de gestão de negócios, por exemplo, no planejamento estratégico, na produção industrial, na logística, no controle de estoques, na compra e venda de ações, na concessão de créditos. Também decisões são tomadas em processos de avaliação de ensino e de aprendizagem na área educacional, assim como, no controle de redes de computadores, na matemática, nos estudos de biologia e de medicina, para citar apenas algumas.

Métodos de tomada de decisão têm sido desenvolvidos e dependem da complexidade do problema, de seus critérios e de suas alternativas de solução. Aqui, critérios, também denominados atributos, são entendidos como fatores que guiam a decisão e as alternativas são cursos de intenção de ações para resolver um problema (RAGSDALE, 2001).

Segundo Gomes, Gomes e Almeida (2002), a complexidade no processo de tomada de decisão ocorre quando o responsável ou os responsáveis pela decisão precisam atender a vários critérios, freqüentemente conflitantes, diante de várias ações possíveis. As dificuldades de identificar os impactos, as incertezas, as conseqüências das decisões e as suas relações, muitas vezes dinâmicas, têm exigido do decisor, ou grupo de decisores, análises de cenários possíveis para uma melhor compreensão do problema. Para auxiliar nessas tarefas e nos processos de tomada de decisão, o decisor pode empregar os recursos da tecnologia da

informação, que têm se mostrado extremamente importantes como instrumentos de apoio.

1.1 MOTIVAÇÃO

Tomar uma decisão sobre um determinado assunto exige do decisor um processo de raciocínio, em que as informações existentes e as adquiridas durante o processo, quando comparadas entre si, podem levar a novas informações, e com isso, influenciarem no processo. Pode ser, portanto, um processo complexo e dinâmico, dada à quantidade de variáveis existentes e que podem surgir.

Cabe observar que problemas de decisão que têm apenas um único critério ou uma única medição agregada, como por exemplo, o custo, são problemas clássicos de otimização, cuja função objetivo é o critério e as limitações são os requisitos das alternativas. Diferentes técnicas de otimização tais como, análise de custo e benefício, programação linear, programação não-linear, entre outras, podem ser utilizadas para achar o valor ótimo (FÜLÖP, 2005).

No entanto, na maioria dos problemas de tomada de decisão é necessário escolher apenas uma solução entre as várias alternativas e que seja a mais satisfatória, considerando-se vários critérios ao mesmo tempo. São denominados problemas de tomada de decisão multicritério e, nessas situações, a aplicação de métodos multicritério¹ de apoio à decisão é a mais adequada (ROY, 1996).

Os métodos multicritério se caracterizam pela capacidade de incorporar critérios quantitativos e qualitativos dos problemas, e, mais importante, permitem a análise de decisão e testam a sua confiabilidade diante dos julgamentos do decisor. O princípio básico desses métodos é estabelecer uma relação de preferências entre as alternativas, que são avaliadas pelo decisor ou grupo de decisores. É muito freqüente o decisor, diante de várias alternativas, demonstrar que prefere uma

¹ Os métodos multicritério serão discutidos no capítulo 3 desta Tese.

alternativa x a uma alternativa y , de acordo com as suas experiências e interesses, sem deixar de considerar os múltiplos critérios (FÜLÖP, 2005).

Fülöp (2005) destaca duas famílias principais de métodos, as que são baseadas na Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT – *Multiple Attribute Utility Function*) e as de subordinação (*Outranking*), por oferecerem flexibilidade à análise multicritério e à avaliação no processo de escolha, reduzindo a subjetividade e aumentando a eficiência da decisão.

Podem ser destacados os métodos SMART (*Simple Multi-Attribute Rating Technique*), AHP (*Analytic Hierarchy Process*), entre outros, que fazem parte da família MAUT, onde são aplicadas funções de utilidade que refletem a utilidade de cada critério em relação às alternativas disponíveis.

Os métodos multicritério MAUT, considerados da Escola Americana, utilizam os conceitos de modelagem de preferência, e são empregados em aplicações que partem do princípio de que toda decisão está agregada a uma função de valor. Essa função, chamada função utilidade, tem como parâmetros critérios e alternativas do problema de decisão convertidos em pesos (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004). Assim, o objetivo é encontrar a forma da função utilidade multicritério que represente as preferências do decisor de acordo com seus parâmetros.

Enquanto, os métodos ELECTRE (*Elimination and Choice Translating Reality*), PROMETHEE (*Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation*), MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*), TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), entre outros, pertencem à família dos métodos *Outranking*, da Escola Francesa, que determinam subconjuntos ou categorias das alternativas de acordo com os níveis de preferência.

Aliado ao número crescente de pesquisas e aplicações dos métodos multicritério de apoio à decisão, dos métodos de otimização e outros, implementações computacionais têm sido desenvolvidos para auxiliar e agilizar o processo decisório e permitir que o decisor melhore o seu desempenho e tenha maior controle sobre a decisão.

Para auxiliar os profissionais em suas necessidades específicas e diversificadas de informações, os avanços tecnológicos têm permitido, por exemplo, coletar e organizar os dados da empresa, formando bases de conhecimento que, segundo O'Brien (2004), proporcionam o compartilhamento e a disseminação do conhecimento para o apoio ao processo de tomada de decisão na empresa. Os dados são provenientes de problemas semelhantes cujas soluções são conhecidas, ou de experiências passadas, ou de fatos presentes, ou, ainda, de previsões de futuro, para que os riscos de uma decisão sejam minimizados.

O responsável pela decisão tem à disposição, por exemplo, os sistemas de apoio à decisão que simulam ambientes para análise e avaliação das alternativas de solução do problema. Alguns desses sistemas têm como base o conceito de *feedback*, com realimentação de informações, permitindo ao decisor um estudo mais adequado dos dados que interferem na decisão.

Entre as várias ferramentas existentes para fornecer informação e modelar as necessidades dos usuários para apoiar suas decisões, destacam-se os Sistemas de Informação Gerencial (SIG), os de Processamento Analítico Online (Olap), os Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) e os *Data mining*. Além desses sistemas, considerados mais tradicionais, outros sistemas são usados pelas organizações, como os baseados na Inteligência Artificial, tais como as redes neurais ou a lógica difusa, para reconhecer padrões de problemas de decisão, que podem dar suporte a decisões difíceis (O'BRIEN, 2004; STAIR; REYNOLDS, 2002).

A busca para encontrar modelos formais de computação destinados ao apoio ou à resolução de problemas de decisão rotineiros ou, complexos, tem gerado o desenvolvimento de sistemas que levam em consideração a subjetividade dos julgamentos do decisor, como nos métodos multicritério. Pode-se destacar o software *Expert Choice* desenvolvido para o método AHP, por ser considerado um dos mais utilizados em nível internacional (ZUFFO, 1998). Outros exemplos de sistemas de apoio à decisão multicritério podem ser encontrados na página do

INEC² - Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra, tais como: VIP Analysis (*Variable Interdependent Parameters Analysis for Multicriteria Choice Problems*), IRIS (*Interactive Robustness Analysis and Parameters' Inference for Multicriteria Sorting Problems*), SRF, TRIMAP, LinearTri, MOMILP (*Multiple Objective Mixed Integer Linear Programming Package*), InterFractional e outros.

Também podem ser encontradas várias relações de softwares de apoio a decisão multicritério nos sites de pesquisas, entre outros, EURO³ (*The Association of European Operational Research Societies*) e da *International Society on Multiple Criteria Decision Making*⁴.

Além dos sistemas citados, existem outras implementações de modelos computacionais dos mais diferentes tipos e técnicas, e dentre elas, destacam-se aquelas que empregam métodos da Tecnologia Adaptativa.

De acordo com Neto (2002), a utilização de métodos desenvolvidos na Tecnologia Adaptativa serve como alternativa para a resolução de problemas complexos e de natureza dinâmica, e pode ser mais eficaz do que alguns métodos tradicionais. Isto pode ser reforçado pelos inúmeros trabalhos de pesquisa encontrados na página da internet do Laboratório de Linguagens e Tecnologias Adaptativas⁵ (LTA) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que resultaram em diversos modelos adaptativos, aplicações e produtos, os quais têm contribuído para o desenvolvimento da área da computação e de outras áreas do conhecimento.

Na área da Tecnologia Adaptativa, entende-se a adaptatividade como uma técnica que possibilita a um dispositivo a capacidade de se automodificar (Neto, 2001). Essa característica é o diferencial que permite alterações dinâmicas, automáticas e sem interferências externas, no comportamento e na estrutura do dispositivo sobre o qual a adaptatividade atua.

² <http://www.inescc.pt>

³ <http://www.euro-online.org>

⁴ <http://www.terry.uga.edu/mcdm>

⁵ <http://www.pcs.usp.br/~lta>

Analisando-se as aplicações de modelos adaptativos, observadas em várias áreas, identificam-se dispositivos muito conhecidos e tradicionais, tais como autômatos, *statecharts*, redes de Markov, gramáticas, árvores de decisão, tabelas de decisão, entre outros (Neto, 2007; Pistori, 2003).

Segundo Neto (2007), a tabela de decisão na sua versão adaptativa exibe ampla aplicabilidade, visto que permite codificar o comportamento de sistemas complexos de software voltados à tomada de decisões, entre outras aplicações.

A dinâmica no processo decisório de busca de soluções para problemas de tomada de decisão que envolvam múltiplos critérios, aliada à necessidade do uso de sistemas computacionais que possam auxiliar nos procedimentos de decisão, incentivaram e motivaram o estudo e aplicação da Tecnologia Adaptativa na área de tomada de decisão. Particularmente, avaliar a viabilidade do uso dos recursos adaptativos e das potencialidades das tabelas de decisão adaptativas em decisões multicritério.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os dispositivos cuja formulação é elaborada usando o conceito de adaptatividade são denominados dispositivos adaptativos. Em um grande número de casos, os dispositivos adaptativos são desenvolvidos a partir de dispositivos organizados na forma de um conjunto de regras, e nesse caso, obtêm-se dispositivos adaptativos dirigidos por regras, termo este abreviado simplesmente para dispositivo adaptativo.

O formalismo adaptativo definido por Neto (2001) mostra que um dispositivo dirigido por regras passa a ter características adaptativas, quando se aplicam ações adaptativas⁶ ao seu conjunto de regras, que modificam o próprio conjunto de regras de forma autônoma e, em consequência, também alteram o seu comportamento. No mesmo artigo, Neto apresenta a Tabela de Decisão Adaptativa para simular um

⁶ O formalismo adaptativo e as ações adaptativas serão tratados no capítulo 2 desta Tese.

autômato adaptativo, que tem como dispositivo não adaptativo uma tabela de decisão convencional, mostrando que existe um amplo campo de exploração, entre outros, na formulação de dispositivos adaptativos de tomada de decisões.

Nos processos de tomada de decisão, o uso de tabelas de decisão convencionais tem sido bastante útil na representação das condições, ou dos critérios⁷, e das alternativas de ações. Como a tabela de decisão possibilita uma listagem e visualização das regras de decisão, provenientes das diferentes combinações dos critérios e ações, pode também servir para facilitar a análise de problemas de tomada de decisão multicritério.

Aliando, portanto, as características das tabelas de decisão no uso de decisões multicritério às técnicas adaptativas, é proposta nesta tese o desenvolvimento de um dispositivo adaptativo baseado em Tabelas de Decisão Adaptativas que auxilie o responsável pela decisão na análise das alternativas de solução de problemas de decisão.

O modelo adaptativo proposto pode servir como mais uma alternativa aos já existentes, no contexto dos processos decisórios que envolvam múltiplos critérios e nas suas regras de decisão. Além de prover as necessidades de informação sobre a situação de tomada de decisão e de incorporar funções de utilidade para representar as preferências do decisor, o modelo adaptativo proposto pode ainda alterar o conjunto de regras, gerando informações e alterando dinamicamente os seus procedimentos.

1.3 OBJETIVOS

A pesquisa inicial com a Tabela de Decisão Adaptativa encontrada no trabalho de Neto (2001), como já foi mencionada anteriormente, motivou outros estudos sobre o

⁷ Os termos critério e condição serão utilizados nesta Tese com o significado de que são fatores que influenciam o decisor na escolha de uma alternativa de decisão. As características das tabelas de decisão convencionais serão apresentadas no capítulo 2 desta Tese.

mesmo tema. Pode-se citar, por exemplo, o artigo publicado por Pedrazzi; Tchemra e Rocha (2005), sobre a aplicação das tabelas de decisão adaptativas em um estudo de caso no processo de homologação de fornecedores de materiais na área da construção civil. Outro trabalho proposto na dissertação de Pedrazzi (2007) foi o desenvolvimento de um ambiente para aplicações de tomada de decisão baseado em tabelas de decisão adaptativas. Também podem ser encontrados os primeiros estudos sobre tabelas de decisão adaptativas em problemas de decisão multicritério em Tchemra (2007). O conjunto desses estudos tem mostrado a capacidade de computação e utilidade das tabelas de decisão adaptativas. O que se pretende neste trabalho é estender e explorar de maneira mais aprofundada os assuntos relacionados ao modelo.

O objetivo principal desta tese é apresentar e formular uma extensão da Tabela de Decisão Adaptativa para apoiar aplicações de tomada de decisão multicritério. Também é objetivo, apresentar uma avaliação analítica do desempenho do algoritmo de decisão, quanto ao custo de tempo e espaço de memória, devido à carência de referências sobre o assunto em relação aos modelos adaptativos na literatura.

Para alcançar esses objetivos, os seguintes objetivos específicos devem ser atingidos:

- tendo como base o formalismo geral do dispositivo adaptativo dirigido por regras, formalizar uma versão estendida da Tabela de Decisão Adaptativa;
- apresentar um algoritmo geral de decisão para a versão estendida da Tabela de Decisão Adaptativa, para que opere como elemento central de um processo de tomada de decisão, que envolve múltiplos critérios ao mesmo tempo;
- apresentar um estudo do tempo e do espaço de memória exigidos pelo algoritmo geral de decisão, expresso na forma da Tabela de Decisão Adaptativa estendida;
- ilustrar a aplicação da Tabela de Decisão Adaptativa estendida na resolução de problemas de decisão, que dependem de múltiplos critérios e analisar o particular algoritmo de decisão;
- descrever e implementar uma ferramenta de apoio à decisão baseada na extensão da Tabela de Decisão Adaptativa.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Tendo em vista os objetivos da tese, optou-se por focar e discutir os assuntos principais que fundamentam os tópicos específicos relacionados ao tema pesquisado: Tabela de Decisão Adaptativa aplicada a decisões multicritério. Por serem abrangentes, foi pesquisada e selecionada a literatura que permitiu oferecer uma visão e uma integração entre os assuntos trabalhados referentes à Tecnologia Adaptativa, ao Processo de Tomada de Decisão, aos Métodos Multicritério de apoio à decisão e aos Recursos Computacionais.

O seguinte diagrama (Figura 1) apresenta a correlação entre os principais assuntos, que possibilitaram a busca da fundamentação conceitual para o desenvolvimento da tese.

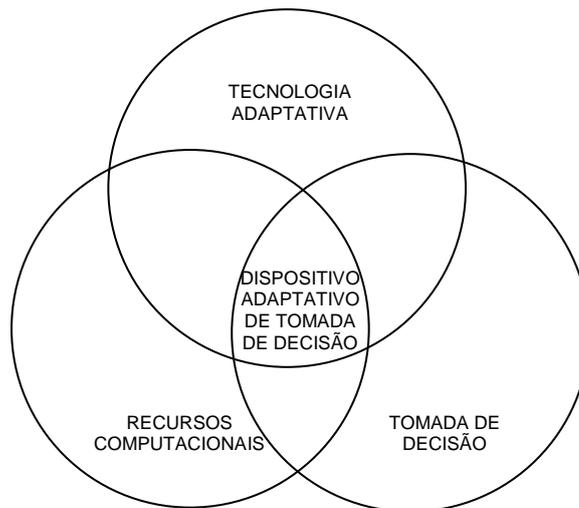


Figura 1 - Diagrama geral da fundamentação conceitual

Desta forma, uma visão da Tecnologia Adaptativa é apresentada no Capítulo 2. Nele apresentam-se o conceito sobre adaptatividade, suas características e os principais dispositivos adaptativos já desenvolvidos. Também são estudadas as tabelas de decisão convencionais e os seus elementos. Em seguida, a partir destes fundamentos, é apresentado o formalismo geral da Tabela de Decisão Adaptativa.

Tendo como objetivo definir uma extensão da Tabela de Decisão Adaptativa que apóie aplicações na área de tomada de decisão, no Capítulo 3 são estudados e apresentados aspectos importantes sobre os processos de Tomada da Decisão. Devido à abrangência do tema, optou-se pela inclusão, no mesmo capítulo, dos estudos de alguns modelos de sistemas de apoio à decisão, com o objetivo de se destacar as características principais de cada um. E, para completar a fundamentação teórica, também são tratados os métodos multicritério de apoio à decisão. Procura-se, assim, analisar e definir a aplicação das tabelas de decisão adaptativas para os processos de tomada de decisão multicritério.

No Capítulo 4 é feita a formulação de uma extensão da Tabela de Decisão Adaptativa, que suporte processos de tomada de decisão multicritério. É apresentado o algoritmo geral de decisão e um estudo sobre o espaço de memória e do tempo exigidos para sua execução, para avaliar o mecanismo que trata o processo de tomada de decisão, que agrega técnicas adaptativas e métodos multicritério.

No Capítulo 5 é apresentado um exemplo de aplicação da formulação estendida da Tabela de Decisão Adaptativa, como apoio na busca de solução de problemas de decisão multicritério. Também é incluída uma análise do particular algoritmo de decisão, quanto ao espaço e tempo necessários para o processamento.

É descrito no Capítulo 6 uma implementação de um protótipo da extensão da Tabela de Decisão Adaptativa, para fins de aplicações práticas em processos de tomada de decisão multicritério.

E, finalmente, as considerações, conclusões e contribuições da tese são apresentadas no Capítulo 7, seguidas pelas sugestões para trabalhos futuros.

2 TECNOLOGIA ADAPTATIVA

Neste capítulo são tratados os temas relacionados à Tecnologia Adaptativa, com o objetivo de apresentar o formalismo geral da Tabela de Decisão Adaptativa. Primeiramente, é introduzida uma visão das aplicações do conceito de adaptatividade já desenvolvidas na área. Em seguida, é apresentado um estudo sobre as tabelas de decisão clássicas, cujas principais características são incorporadas na definição da Tabela de Decisão Adaptativa, que associadas ao mecanismo adaptativo possibilitam uma extensão da mesma para aplicações de apoio a tomada de decisão.

2.1 ADAPTATIVIDADE

As pesquisas na área de Tecnologia Adaptativa têm envolvido estudos nos mais variados campos do desenvolvimento científico, com a finalidade de se buscar novas técnicas computacionais para auxiliar ou possibilitar a obtenção de soluções para problemas de diferentes níveis de complexidade (NETO, 2001; NETO, 2007).

Na área da Tecnologia Adaptativa, é importante entender o conceito de adaptatividade. O termo é empregado para designar a característica de um dispositivo, que tem a capacidade de alterar a sua própria estrutura interna de forma autônoma, sem interferência externa, mudando em conseqüência o seu próprio comportamento (NETO, 2001; NETO, 2007). Os dispositivos resultantes, cuja formulação é elaborada usando o conceito de adaptatividade, são denominados dispositivos adaptativos.

Neto (2001) define, portanto, o dispositivo adaptativo como um formalismo que possui um mecanismo adaptativo que confere a um dispositivo a capacidade de alterar dinamicamente sua topologia e seu comportamento. É um dispositivo que se automodifica quando detecta situações que exijam mudanças nas reações, em

resposta aos estímulos de entrada. Em outras palavras, o dispositivo deve se adaptar, reagindo adequadamente às mudanças impostas por ele para realizar algo, em toda a sua extensão.

Outra característica do formalismo adaptativo é a possibilidade de se empregar dispositivos conhecidos e tradicionais, tais como, autômatos de pilha estruturados, *statecharts*, redes de Markov, gramáticas, árvores de decisão, tabelas de decisão, e a eles acrescentar uma camada adaptativa que lhes confere uma capacidade de automodificação. Uma breve descrição desses formalismos adaptativos é encontrada em Neto (2007), onde faz um levantamento da evolução da Adaptatividade e da Tecnologia Adaptativa.

É importante ressaltar que os primeiros estudos que geraram os conceitos teóricos da Tecnologia Adaptativa, no Brasil, tiveram como origem as pesquisas apresentadas por Neto e Magalhães (1981) para a busca de reconhecedores sintáticos de linguagens não regulares e por modelos para a construção de compiladores, tendo como meio, autômatos finitos e de pilha. Esses estudos progrediram e, a partir de gramáticas livres de contexto, geraram reconhecedores baseados em autômatos de pilha estruturados, que por sua vez evoluíram, chegando à concepção dos autômatos adaptativos. A trajetória desses estudos é relatada no artigo de Neto (2007), assim como, o histórico e o estado da arte da Tecnologia Adaptativa podem ser encontrados com maiores detalhes nas teses de Pistori (2003) e Camolesi (2007), que fazem um levantamento sobre a evolução da área.

Assim, Neto (2001) define o dispositivo adaptativo, mostrado na figura 2, como um dispositivo formado por um núcleo que representa o dispositivo subjacente convencional que é encapsulado por uma camada adaptativa, cujos recursos agem sobre o núcleo quando há alguma interação com o meio externo, dando as características de modificação autônoma.

Pode-se observar em Neto (2007) e Pistori (2003), que há um grande número de casos em que o dispositivo adaptativo é construído a partir de um dispositivo subjacente elaborado na forma de um conjunto de regras, e nesse caso, obtém-se o

dispositivo adaptativo dirigido por regras, termo este abreviado simplesmente para dispositivo adaptativo.

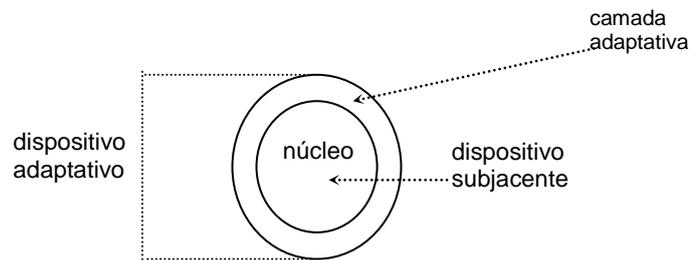


Figura 2 – Estrutura geral de um dispositivo adaptativo

2.2 DISPOSITIVOS ADAPTATIVOS

Em seguida, é apresentado o formalismo geral do dispositivo adaptativo e são descritos alguns modelos existentes, com o objetivo de fundamentar o modelo da tabela de decisão adaptativa.

2.2.1 Dispositivo adaptativo dirigido por regras

O dispositivo adaptativo dirigido por regras (\mathcal{DA}) é o modelo geral para o dispositivo adaptativo, definido por Neto (2001) como um sistema cuja operação é realizada por um conjunto finito de regras, que se modifica dinamicamente.

Esse modelo \mathcal{DA} é formalizado por Neto (2001) pela dupla $\mathcal{DA} = (\mathcal{DN}, \mathcal{CA})$ que representam:

- \mathcal{DN} : o núcleo composto por um dispositivo subjacente não-adaptativo, cujas operações são definidas por um conjunto finito de regras \mathcal{R} ;
- \mathcal{CA} : o mecanismo adaptativo, que pode agir sobre o núcleo e possui os recursos necessários à mudança da estrutura e do comportamento do dispositivo subjacente, enquanto está em operação.

De acordo com Böhm e Jacopini (1966), um dispositivo dirigido por um conjunto de regras, pode ser expresso por um mecanismo, cujo algoritmo pode ser descrito apenas por estruturas de controle, como às de seqüência de declarações, seleções do tipo “*if-then-else*” e iterações que possibilitam repetições de blocos de instruções com condições de parada.

Logo, o dispositivo subjacente \mathcal{DN} , que é definido por um conjunto finito e estático de regras \mathcal{R} , quando testadas em um algoritmo, dentro do qual há seqüências de estruturas condicionais do tipo “se-então” (“*if-then*”), podem levar às seguintes situações:

- no caso em que uma única regra de \mathcal{R} é encontrada e que satisfaça às condições procuradas, o dispositivo executa a ação determinada pela regra; essa situação define uma operação determinística;
- no caso em que mais de uma regra de \mathcal{R} é encontrada, satisfazendo as condições procuradas, o dispositivo executa as diversas possibilidades em paralelo, caracterizando uma operação não-determinística;
- quando nenhuma regra de \mathcal{R} satisfaz as condições procuradas, o dispositivo comunica uma situação de erro e encerra a sua operação.

Para que o dispositivo subjacente passe a ser dinâmico e adaptativo, ao conjunto de regras são associados os recursos adaptativos, que podem ser ativados e executados, produzindo alterações no conjunto de regras e gerando uma nova configuração do dispositivo, dependendo do estímulo recebido.

Os recursos adaptativos definem o mecanismo adaptativo \mathcal{CA} , que são compostos pelas declarações das funções adaptativas \mathcal{FA} , e cujas chamadas são associadas às regras do dispositivo subjacente. Essas chamadas são denominadas ações adaptativas \mathcal{AD} , que agem sobre o conjunto de regras \mathcal{R} que define o dispositivo.

Para cada função adaptativa \mathcal{FA} é associada uma lista de ações adaptativas elementares \mathcal{AD} , que indicam as modificações a serem impostas ao conjunto de regras \mathcal{R} . São possíveis três tipos de ações adaptativas:

- ação adaptativa elementar de consulta⁸ $\mathcal{AD} ?$: permite examinar o conjunto de regras do dispositivo para encontrar regras, que satisfaçam as condições procuradas;
- ação adaptativa elementar de inclusão $\mathcal{AD} +$: permite o acréscimo de uma nova regra ao conjunto de regras, de acordo com as condições dadas;
- ação adaptativa elementar de exclusão $\mathcal{AD} -$: permite eliminar do conjunto de regras alguma regra, que satisfaça as condições fornecidas.

Como para cada função adaptativa \mathcal{FA} é possível associar mais de uma ação adaptativa \mathcal{AD} , as ações de consulta $\mathcal{AD} ?$ e de exclusão $\mathcal{AD} -$ são executadas antes das de inclusão $\mathcal{AD} +$ da correspondente função.

É importante observar que, opcionalmente, somente duas ações adaptativas podem ser associadas a cada regra \mathcal{R} selecionada do dispositivo subjacente. Na regra escolhida pode-se especificar:

- uma ação adaptativa a ser executada antes que a regra seja realizada;
- e outra ação adaptativa para ser aplicada após a execução da regra.

Se para qualquer regra \mathcal{R} do dispositivo subjacente não for associada alguma ação adaptativa, é considerada regra normal, portanto, não-adaptativa.

Nos próximos itens deste capítulo, são apresentados alguns formalismos adaptativos mais importantes para o embasamento teórico do modelo da Tabela de Decisão Adaptativa.

⁸ Os caracteres $?$, $+$ e $-$ são utilizados por Neto (2001) para representar, respectivamente as ações adaptativas elementares de consulta, inclusão e exclusão.

2.2.2 Outros formalismos adaptativos

A formalização geral do dispositivo adaptativo mostra que é possível transformar dispositivos tradicionalmente conhecidos em dispositivos com características adaptativas, por meio do acréscimo de uma camada adaptativa.

O autômato adaptativo criado por Neto (1993) é considerado uma extensão e versão adaptativa do autômato de pilha estruturado. Os estudos e pesquisas realizados por Neto sobre reconhecedores de linguagens dependentes de contexto, que pudessem ter melhor desempenho do que os existentes na época, resultaram na definição do autômato adaptativo como um modelo formal de computação e de representação de linguagens.

Um autômato de pilha estruturado é formalmente composto por um conjunto de estados, de transições entre os estados e da utilização de uma pilha para armazenar os estados de retorno de sub-máquinas (NETO, 1987). Quando a este conjunto se aplicam funções específicas capazes de modificar a quantidade de estados e das próprias transições, o autômato passa a ter características adaptativas. Estas funções específicas são denominadas transições adaptativas que possibilitam a execução de ações adaptativas de consulta, inclusão ou eliminação de transições que alteram a topologia do autômato de pilha estruturado.

Basicamente, durante a operação de reconhecimento de sentenças de linguagens dependentes de contexto, o autômato adaptativo vai se modificando, passando por uma seqüência de configurações que geram o conjunto de máquinas de estados (NETO, 1993). Esta seqüência de configurações indica quais são os passos percorridos pelo autômato adaptativo para reconhecer ou não uma sentença da linguagem. Cada passo é uma máquina de estados responsável pelo tratamento das sub-cadeias que formam a sentença.

Cada máquina de estados do autômato adaptativo tem como ponto de partida uma configuração inicial de estados, da memória e das transições, e quando se dá a execução do reconhecimento da cadeia de entrada, transições da máquina são

realizadas, tais como, transições internas, ou transições de chamada a uma sub-máquina, ou transições de retorno à sua sub-máquina chamadora.

Quando uma cadeia de entrada é construída de tal maneira que o autômato ainda não possa tratá-la, a máquina de estados do autômato adaptativo, através das transições adaptativas, é modificada para que a cadeia seja tratada. Estas modificações levam a uma nova máquina de estados, uma vez que estados e transições podem ser eliminados e outros incluídos em consequência das ações adaptativas.

No artigo de Neto (2007), os formalismos subjacentes podem ser classificados quanto à forma de operação do dispositivo. Destacam-se as seguintes categorias:

- dispositivos de reconhecimento: como os autômatos convencionais, que se caracterizam por conjuntos estáticos e finitos de estados e de regras de transição;
- dispositivos de geração: no caso das gramáticas livres de contexto que têm como base as regras de produção da gramática;
- dispositivos para a representação de sistemas assíncronos: como o formalismo clássico dos *statecharts* utilizados para o sincronismo de eventos;
- dispositivos estocásticos: são dispositivos que apresentam transições associadas à probabilidades, tal como a rede de Markov que tem a capacidade de representar fenômenos aleatórios;
- dispositivos de processamento: representados pelos códigos de programação;
- dispositivos de auxílio à tomada de decisão: como as tabelas de decisão e árvores de decisão que são constituídas por conjuntos de regras.

Nos formalismos adaptativos, esses modelos subjacentes, que são estáticos, se transformam em dispositivos dinâmicos, cujas alterações estruturais acarretam modificações no comportamento dos dispositivos durante a sua operação.

Outros formalismos, como as gramáticas adaptativas baseadas em gramáticas dependentes de contexto (IWAI, 2000), as ações adaptativas são associadas às regras de produção que possibilitam alterar tanto o conjunto de símbolos não-terminais, como as regras de produção da gramática. Ainda na categoria das gramáticas, Pariente (2004) descreve o formalismo das gramáticas livres de contexto adaptativas, que tem como núcleo uma gramática livre de contexto e um mecanismo adaptativo que determina quais produções são aplicáveis em cada passo de uma derivação.

A camada adaptativa da árvore de decisão não-determinística, desenvolvida por Pistori (2003), permite que a árvore seja reestruturada com a inserção ou remoção de sub-árvores. O autor ilustra a aplicabilidade das árvores de decisão adaptativas na solução de problemas relacionados com processamento digital de imagens e aprendizagem de máquina.

Vale destacar que o uso das tabelas de decisão adaptativas, para simular autômatos adaptativos para o reconhecimento de cadeias de entrada (NETO, 2001), se constituiu em uma fonte de inspiração para a formulação de dispositivos adaptativos de tomada de decisão multicritério.

2.2.3 Tabela de decisão adaptativa

Para a formalização da Tabela de Decisão Adaptativa, um estudo sobre as tabelas de decisão clássicas é apresentado em seguida.

2.2.3.1 Tabela de decisão

Cabe ressaltar aqui que, durante a pesquisa bibliográfica sobre a Teoria das Tabelas de Decisão, foram encontradas duas obras que podem ser consideradas como

trabalhos históricos e pioneiros. São obras clássicas e abordam de forma bem completa o tema, justificando suas referências nesta tese.

Uma das obras é intitulada *Decision Tables* de Marion L. Hughes, Richard M. Shank e Elionor Svendsen Stein, editada pela Midi Publications, Management Development Institute, Divisions of Information, Industries, Inc., Wayne, Pennsylvania, em 1968. E, a outra obra é denominada *Decision Tables and Their Practical Application in Data Processing* de Thomas R. Gildersleeve, publicada por Prentice Hall, 1970, de Englewood Cliffs, N. J.

Historicamente, na área de desenvolvimento de sistemas, as tabelas de decisão são ferramentas que se prestam a auxiliar na descrição de procedimentos de problemas complexos (HUGHES; SHANK; STEIN, 1968). Mostram-se mais eficientes do que as formas narrativas, ou escritas, ou na representação de diagramas ou fluxogramas, para a comunicação entre profissionais de áreas não técnicas e técnicos da computação. Além disso, as tabelas de decisão podem auxiliar na formulação de questões de problemas, nem sempre clara em outras formas.

Hughes; Shank e Stein (1968) e Gildersleeve (1970) afirmam que as tabelas de decisão fornecem uma comunicação efetiva sobre os procedimentos entre os profissionais de todos os níveis e áreas, sejam executivos, gerentes, pessoal de operação e outros. Como as tabelas são concisas, de fácil leitura e manutenção, servem aos executivos como meio de formular os modelos de decisão elementares ou complexos. Para os profissionais de nível operacional, as tabelas servem para controlar melhor os projetos que estão sendo desenvolvidos, bem como na sua manutenção. Auxiliam os profissionais de sistemas, que as utilizam na codificação dos programas. Em todos os casos, as tabelas podem ser examinadas e modificadas, podendo minimizar as probabilidades de ocorrência de erros.

As tabelas de decisão podem ser usadas como forma de documentação das informações ou como meio de análise de modelos de decisão e seus resultados. Segundo Hughes; Shank e Stein (1968), as primeiras são chamadas de tabelas inertes, enquanto que as últimas são denominadas tabelas ativas, objetos de estudo deste trabalho.

Uma tabela de decisão pode ser considerada como um modelo alternativo para uma função ou problema composto por condições, ações e regras:

- as condições são variáveis, cujos valores devem ser avaliados para a tomada de decisão;
- ações representam o conjunto de operações a serem executadas condicionadas pelas respostas das condições;
- regras representam o conjunto de situações, que são verificadas em resposta às condições.

Ao usar as tabelas de decisão ativas para modelar processos lógicos complexos, primeiramente, é necessário identificar quais são as condições existentes no problema e que tipo de ações podem ser tomadas (GILDERSLEEVE, 1970). Em seguida, determinar as regras do problema, ou seja, verificar as possíveis combinações das condições identificadas que resultem na execução das diferentes ações. Essas regras com as suas condições e ações são facilmente visualizadas quando organizadas numa tabela de decisão, vista a seguir.

2.2.3.2 Estrutura da tabela de decisão

Tabelas de decisão são construídas de tal forma que os procedimentos sejam claramente entendidos pelos seus usuários, seguindo um modelo de estrutura conhecido.

Segundo Hughes; Shank e Stein (1968), Gildersleeve (1970) e Neto (2001), uma tabela de decisão é tipicamente dividida em quatro seções ou quadrantes básicos, como mostrados na figura 3.

No quadrante I, cada linha de condição corresponde à uma variável do problema e que será avaliada no processo de decisão, cujo valor é apresentado no quadrante II, valores das condições. No preenchimento do quadrante II deve-se considerar todos os valores possíveis que as variáveis podem assumir.

As linhas das ações, no quadrante III, representam o conjunto de procedimentos ou operações que será executado de acordo com as respostas das condições.

		Colunas de Regras
Quadrante I	Linhas das Condições	Quadrante II Valores das condições
Quadrante III	Linhas das Ações	Quadrante IV Ações a serem tomadas

Figura 3 – Estrutura da Tabela de Decisão

As colunas de regras formam o conjunto de possibilidades ou situações, que podem ocorrer em razão das avaliações das condições e das ações tomadas.

No quadrante IV são assinaladas as ações, que devem ser tomadas quando as regras são avaliadas.

Formalmente, uma tabela de decisão pode ser definida por $\mathcal{TD} = (C, \mathcal{A}, \mathcal{R})$, onde:

- C é o conjunto de condições, que representam as variáveis do problema:
 $C = \{ C_i, 1 \leq i \leq n \}$
- \mathcal{A} é a relação de ações que podem ser executadas para solucionar o problema: $\mathcal{A} = \{ \mathcal{A}_j, 1 \leq j \leq m \}$
- \mathcal{R} é o conjunto de regras, composto pela combinação dos valores das variáveis, que levam à execução de ações possíveis: $\mathcal{R} = \{ \mathcal{R}_k, 1 \leq k \leq p \}$ com a regra $\mathcal{R}_k = (c_{i,k}, a_{j,k})$ sendo:
 - $c_{i,k}$ um valor que a condição C_i pode assumir na regra;
 - $a_{j,k}$ uma indicação de execução da ação \mathcal{A}_j na regra.

De maneira simplificada, qualquer regra \mathcal{R}_k da tabela pode ser interpretada como uma série de sentenças “se X então Y” (*if X then Y*), onde X é o conjunto de condições a serem verificadas e Y as ações a serem executadas. Geralmente, as condições são compostas por “and”s ou “or”s, ou seja, X é uma sentença da forma: “ C_1 and C_2 and ... and C_n ”, ou uma composição do tipo “ C_1 or C_2 or ... or C_n ”, ou ainda, uma combinação de “and”s, “or”s e “not”s.

2.2.3.3 Escopo dos valores das condições e ações

Os valores que as condições C_i podem assumir num determinado problema, geralmente, são valores binários, indicados pelas letras Y (Yes), T (True) ou S (Sim), ou N (No ou Não) ou F (False) no quadrante II da tabela de decisão. Historicamente, eles indicam se a condição é verificada (Y, T, S) ou não (N, F) para uma determinada regra \mathcal{R}_k (HUGHES; SHANK; STEIN, 1968; GILDERSLEEVE, 1970). Esses valores são usados para facilitar a leitura e análise lógica da tabela e garantir que valores quantitativos ou qualitativos das variáveis sejam melhor interpretados, como é descrito adiante. Nos casos em que a condição não interfere na ação, ou seja, quando a existência ou não da condição para aquela regra é indiferente, convencionou-se deixar em branco (b) o local correspondente no quadrante II.

Quando uma ação \mathcal{A}_j deve ser executada, geralmente, adota-se a letra X, que é indicada na linha da ação e coluna correspondente à regra \mathcal{R}_k a ser verificada, no quadrante IV da tabela. Procura-se deixar em branco (b), ou usar um traço (-), quando determinada ação não será tomada para aquela regra.

Neste trabalho, para uma regra \mathcal{R}_k são adotados os valores S, N ou branco (b) para as condições $c_{i,k} = \{ \text{“S”}, \text{“N”}, b \}$ e para as ações, uma das indicações $a_{j,k} = \{ \text{“X”}, b \}$.

Para tabelas construídas com valores de condições iguais a “S”, “N” ou branco (b) e valores de ações “X” ou branco (b), Hughes; Shank e Stein (1968) as denominam como tabelas com entradas limitadas.

Entretanto, existem problemas, cujas variáveis não podem ser limitadas aos valores descritos anteriormente, pois exigem a representação de dados mais detalhados, tais como, valores específicos, ou intervalos de valores numéricos inteiros ou reais, ou dados limitados a valores máximos ou mínimos, entre outros. Tabelas compostas por estes tipos de dados são denominadas tabelas de entradas estendidas ou ampliadas (HUGHES; SHANK; STEIN, 1968; GILDERSLEEVE, 1970), podendo-se usar, por exemplo, os operadores de relação \geq , \leq , $>$, $<$, $=$ ou \neq para indicar os limites ou restrições dos valores.

É possível, no entanto, que determinados problemas exijam o uso de valores limitados para algumas das condições e, para outras, entradas estendidas. Esta variação de entradas pode ser representada numa tabela de decisão chamada tabela de entrada mista (HUGHES; SHANK; STEIN, 1968; GILDERSLEEVE, 1970). Desta maneira, a tabela pode ter linhas de condições dos dois tipos de entrada, tomando-se a devida precaução para que cada linha seja apenas de um tipo.

A Tabela 1 mostra um exemplo no qual um estudante precisa de um livro para as suas pesquisas e, para esse fim, pode obtê-lo na biblioteca ou comprá-lo numa livraria ou pela internet, dentro dos prazos de entrega e dos recursos de que dispõe:

Livro disponível na biblioteca	S	N	N	N	N	N
Prazo para entrega da compra (dias)		imediatos	imediatos	3 – 7	3 – 7	> 7
Recurso disponível para pagar no dia		S	N	N	S	
Comprar na livraria		X			X	
Comprar pela internet			X	X		
Não comprar	X					X

Tabela 1 – Exemplo de Tabela de Decisão de Entradas Mistas

Hughes; Shank e Stein (1968) ainda observam que, uma tabela de entrada mista pode ser reconstruída de tal forma que se torne uma tabela inteiramente de entrada limitada para facilitar a análise lógica e solução do problema. Para isto, os valores estendidos de cada variável podem ser considerados como condições separadas,

onde para cada regra indicam-se os valores S, N ou branco apropriados. Desta maneira, a Tabela 2 mostra como a Tabela 1 pode ser modificada para conter apenas entradas limitadas:

Livro disponível na biblioteca	S	N	N	N	N	N
Entrega imediata da compra		S	S	N	N	N
Entrega da compra entre 3 – 7 dias		N	N	S	S	N
Entrega da compra superior a 7 dias		N	N	N	N	S
Recurso disponível para pagar no dia		S	N	N	S	
Comprar na livraria		X			X	
Comprar pela internet			X	X		
Não comprar	X					X

Tabela 2 – Exemplo de Tabela de Decisão de Entradas Limitadas

Outra proposta feita por Hughes; Shank e Stein (1968) para facilitar o manuseio de tabelas de entradas estendidas ou mistas é substituir os valores das condições por códigos numéricos e seqüenciais. Por exemplo, uma alternativa para codificação dos valores é atribuir o código 1 para o primeiro valor da linha, o código 2 para o segundo valor diferente que aparece na mesma linha, o código 3 para o terceiro valor diferente na linha e assim sucessivamente para cada valor diferente da linha. Repete-se o processo de codificação para cada linha. Além de facilitar a manipulação da tabela de decisão, a codificação pode tornar mais clara a sua leitura.

Para compreender melhor este processo de codificação, a Tabela 3 apresenta algumas condições para a elaboração de um anúncio publicitário de um produto, levando-se em consideração certas características, como idade e escolaridade, e preferências de cor do consumidor:

Idade	< 20	< 20	20 – 40	20 – 40	< 20	> 40
Escolaridade	fundamental	médio	superior	fundamental	outra	superior
Cor de preferência	azul	vermelho	azul	preto	vermelho	preto

Tabela 3 – Exemplo de Tabela de Decisão com Entradas Estendidas

A codificação dos valores de cada condição poderia, por exemplo, obedecer à seguinte ordem:

- idade inferior a 20 anos = 1, idade entre 20 e 40 = 2 e idade superior a 40 = 3
- nível de escolaridade fundamental = 1, médio = 2, superior = 3 e outra = 4
- cor de preferência azul = 1, vermelho = 2 e preto = 3

A Tabela 4 mostra, então, a Tabela 3 codificada:

Idade	1	1	2	2	1	3
Escolaridade	1	2	3	1	4	3
Cor de preferência	1	2	1	3	2	3

Tabela 4 – Exemplo de Tabela de Decisão com Entradas Codificadas

Tradicionalmente, nas tabelas de decisão são indicadas as ações que devem ser tomadas numa seqüência específica. Para uma determinada regra, o símbolo X indica qual ação deve ser executada. Como para cada regra pode haver mais de uma ação a ser tomada e numa ordem diferente, segundo Hughes; Shank e Stein (1968), convém repetir a ação no quadrante III para visualizar melhor esta seqüência. Gildersleeve (1970), entretanto, sugere numerar a ordem das ações, substituindo o X por um número seqüencial.

Para exemplificar, a Tabela 5 ilustra as ações que devem ser tomadas por uma agência publicitária para a divulgação de um produto, que leva em consideração as mídias usadas:

Propaganda na televisão	X		X	X
Entrega de folhetos		X		
Divulgação em revistas	X	X		X
Divulgação na internet			X	X

Tabela 5 – Exemplo de Tabela de Decisão com ações a serem tomadas

Observando a Tabela 5, verifica-se que várias ações serão tomadas e executadas na seqüência apresentada. Porém, supondo que haja uma necessidade estratégica de execução de cada ação numa ordem diferente à mostrada. Adotando a sugestão

de Hughes; Shank e Stein (1968), a seqüência das ações pode ser descrita na forma mostrada na Tabela 6:

Propaganda na televisão	X			
Divulgação em revistas	X			
Entrega de folhetos		X		
Divulgação em revistas		X		
Divulgação na internet			X	
Propaganda na televisão			X	
Divulgação na internet				X
Divulgação em revistas				X
Propaganda na televisão				X

Tabela 6 – Exemplo de seqüência de ações a serem tomadas

Outra forma de apresentar a seqüência de ações para cada regra seria aquela proposta por Gildersleeve (1970), onde as ações seriam numeradas. A Tabela 7 mostra como a Tabela 5 pode ser reconstruída de acordo com a proposta:

Propaganda na televisão	1		2	3
Entrega de folhetos		1		
Divulgação em revistas	2	2		2
Divulgação na internet			1	1

Tabela 7 – Exemplo de seqüência de ações numerada

2.2.3.4 Uso da regra ELSE

Deve-se observar que, para determinados problemas, podem existir situações em que nenhuma das regras da tabela de decisão é satisfeita. Neste caso, é possível incluir mais uma coluna na tabela, coluna esta, denominada regra ELSE (HUGHES; SHANK; STEIN, 1968). Para esta regra, somente são especificadas as ações que devem ser executadas e omite-se qualquer valor para as condições.

Um exemplo simples do uso da regra ELSE é apresentado na Tabela 8, onde estão definidas as regras para um problema de concessão de crédito para clientes ou não clientes de uma instituição financeira. São consideradas algumas variáveis, tais

como, o tempo em que o cliente tem vínculo com a instituição, sua renda mensal e se é um profissional liberal ou não.

Cliente a mais de 2 anos	S	S	S	S	N	E
Renda mensal > 5.000	S	S	N	S	S	L
Profissional liberal	S	N	S	N	N	S
Crédito até 3.000			X		X	E
Crédito entre 3.000 e 5.000		X		X		
Conceder crédito especial	X					
Não conceder crédito						X

Tabela 8 – Exemplo de Tabela de Decisão e a Regra ELSE

Observa-se na Tabela 8 que existem 5 regras claramente definidas. Para outras combinações das variáveis, todas recaem na regra ELSE, onde apenas uma ação é indicada.

É importante que a regra ELSE seja usada corretamente e de forma cuidadosa, pois se corre o risco de usá-la em regras que às vezes podem não estar claras numa primeira análise do problema, o que pode gerar alguma ação inadequada e, em consequência, erros graves.

Ao se construir uma tabela com a regra ELSE, Hughes; Shank e Stein (1968) sugerem uma análise detalhada de quais combinações de regras fazem parte da regra ELSE, para verificar o seu uso correto. Este processo de análise que consiste em abrir ou “explodir” as combinações de regras que compõem a regra ELSE, pode dar maior clareza de situações particulares e verificar se a tabela está correta e se, realmente, contempla todas as regras possíveis.

2.2.3.5 Número de regras de uma tabela de decisão

O nível de complexidade de um problema pode determinar o tamanho de uma tabela de decisão. Por exemplo, para problemas cujas variáveis assumem apenas dois valores (entradas limitadas), o número de combinações, ou seja, o número de regras p (colunas da tabela) pode ser dado pela expressão 2^n , onde n representa a quantidade de condições (linhas da tabela).

Para variáveis que assumem valores múltiplos, calcular o número de regras ou combinações possíveis depende da quantidade de valores que pode ocorrer para cada variável. Supondo que existam n variáveis no problema e que a quantidade de valores que cada uma pode assumir seja representada por v_i , com $1 \leq i \leq n$, o número de regras p pode ser calculado pelo produto:

$$p = v_1 * v_2 * \dots * v_i * \dots * v_n$$

Hughes; Shank e Stein (1968) observam, entretanto, que nem sempre o número total de regras ou combinações precisa estar presente na tabela. Há casos em que uma regra reúne várias combinações, como aquela em que um branco ou mais estão presentes, mostrando que as condições para aquela regra são indiferentes, reduzindo a quantidade de regras.

Para verificar se a tabela abrange todas as combinações possíveis do problema, a Tabela 9 ilustra um exemplo simples, onde estão especificadas duas condições para a aprovação de um aluno numa determinada disciplina de um curso:

Média $\geq 7,0$	S	S	N
Frequência $\geq 75\%$	S	N	
Aprovado	X		
Reprovado		X	X

Tabela 9 – Exemplo de Tabela de Decisão com condições indiferentes nas regras

No exemplo, a Tabela 9 parece estar incompleta, uma vez que para estar completa deveria ter o número total de regras $p = 2^n = 2^2 = 4$, onde $n = 2$ representa a

quantidade de condições. No entanto, para um aluno que tem média inferior a 7,0, a frequência não influencia na sua avaliação final.

Para se determinar o número de combinações presentes numa regra que contém brancos, pode-se, por exemplo, efetuar o cálculo 2^b , onde b é a quantidade de brancos na regra, supondo que as variáveis assumem os valores S, N ou branco.

No exemplo da Tabela 9, uma das regras possui apenas um branco, logo $b = 1$, o que resulta em $2^1 = 2$, indicando que essa regra é uma fusão da regra onde $\text{média} < 7,0$ e $\text{frequência} \geq 75\%$ e da regra com $\text{média} < 7,0$ e $\text{frequência} < 75\%$, as duas levando a ação de reprovação, o que significa que a frequência não interfere no resultado. Portanto, a tabela está completa, apesar de mostrar apenas 3 regras.

Hughes; Shank e Stein (1968) e Gildersleeve (1970) também chamam a atenção para a verificação da existência de regras redundantes ou inconsistentes na tabela de decisão construída, pois elas devem ser eliminadas, uma vez que indicam que a lógica da solução do problema está errada.

Observa-se que a redundância nas regras pode ser verificada pela presença de duas ou mais regras, que tenham as mesmas combinações de condições e a inconsistência pode ser reconhecida quando as combinações são equivalentes, porém conduzem a ações diferentes. No caso de escolha determinística, as combinações equivalentes devem ser analisadas e opta-se por uma, eliminando as outras da tabela. No não-determinismo, após criteriosa análise, as regras podem permanecer na tabela, e aplicadas em paralelo.

2.2.3.6 Divisão de uma tabela de decisão

Em geral, problemas que exigem modelos de decisão complexos podem levar à construção de tabelas de decisão relativamente grandes, o que pode dificultar a compreensão da lógica da solução.

Para estes casos, Hughes; Shank e Stein (1968) sugerem uma divisão do problema, de tal maneira que, cada parte lógica do problema seja representada por uma tabela. Estas tabelas seriam vinculadas segundo uma seqüência lógica numa tabela, chamada tabela de decisão principal, de acordo com regras estabelecidas.

A vinculação de cada tabela pode ser representada, por exemplo, pela ação de chamada de um procedimento de execução de uma tabela, identificada por um nome *id_tabela* ou um número de referência.

Para tabelas de entrada limitada, a identificação da tabela a ser executada é colocada na linha de ação, junto com a ação de chamada da tabela, e assinalando com um “X” na regra correspondente. Já para tabelas de entradas estendidas, o nome ou número de referência da tabela a ser executada pode aparecer em substituição à letra “X”.

Para finalizar este tópico, tabelas de decisão que possuem como última ação de cada regra uma ação de chamada de outra tabela são denominadas tabelas de decisão abertas. Entretanto, quando o controle de um processo passa para outra tabela, de forma temporária, e retorna para a tabela que a chamou, a tabela executada é denominada tabela de decisão fechada. Assim, ao final da execução de uma tabela fechada, o controle do processo retorna para a mesma regra na tabela que a chamou, passando a executar a próxima ação indicada (HUGHES; SHANK; STEIN, 1968).

2.2.3.7 Operação da tabela de decisão

Os tópicos anteriores evidenciam a relativa facilidade de uso das tabelas de decisão e que são ferramentas que dispõem de recursos para a codificação e tratamento de condições, ações e regras de problemas de diferentes níveis de complexidade.

A solução do problema pode ser obtida através da execução ou operação da tabela de decisão conforme o algoritmo descrito a seguir, de forma simplificada (NETO, 2001; HUGHES; SHANK; STEIN, 1968; GILDERSLEEVE, 1970):

- de acordo com as condições atuais do problema, procuram-se quais regras da tabela satisfazem estas condições:
 - se nenhuma regra satisfaz as condições impostas, nenhuma ação é tomada;
 - se apenas uma regra se aplica, tem-se uma escolha determinística, então, as ações correspondentes à regra são executadas;
 - se mais de uma regra satisfaz as condições, significa um caso de não-determinismo, e as ações correspondentes às regras são aplicadas em paralelo;
- uma vez aplicada a regra, a tabela pode ser utilizada novamente.

Observa-se que este dispositivo não se altera porque as suas regras são previamente especificadas e não podem ser modificadas durante a sua operação. Desta maneira, se novas regras surgem para o mesmo problema, é necessário que a tabela seja refeita, o que pode representar um dispêndio de tempo e custo.

2.2.3.8 Tabela de Decisão Adaptativa

Neto (2001) mostra que os dispositivos adaptativos dirigidos por regras podem dar maior flexibilidade às tabelas de decisão, permitindo, não somente a consulta às regras, como também a inclusão e a exclusão de regras durante a operação do dispositivo, transformando, assim, a tabela de decisão numa ferramenta mais poderosa.

Baseado no dispositivo adaptativo dirigido por regras, Neto (2001) define a Tabela de Decisão Adaptativa (*TDA*) e a utiliza para simular um autômato adaptativo para reconhecer sentenças de linguagens dependentes de contexto.

A TDA definida por Neto tem como dispositivo subjacente uma tabela de decisão convencional, na qual é acrescentada a camada adaptativa composta por um conjunto de linhas para a definição das funções adaptativas. Quando uma ação adaptativa é executada, geralmente, o conjunto de regras é modificado e, em consequência, a quantidade de colunas da tabela. A quantidade de linhas, porém, permanece fixa, pois não há alteração nas mesmas (NETO, 2001).

Desta maneira, a TDA pode ser definida pela dupla: $TDA = (TDN, CA)$, onde TDN representa a tabela de decisão convencional, logo, é tabela não-adaptativa e CA é o mecanismo adaptativo.

A tabela de decisão não-adaptativa é definida pela sêxtupla:

$TDN = (CT, NRT, CV, t_0, AT, CRA)$ onde:

- CT é o conjunto de todas as configurações⁹ possíveis da tabela de decisão;
- $NRT \subseteq CT \times CV \times CT \times CRA$ é o conjunto de regras de decisão da tabela;
- CV é o conjunto finito de valores válidos das condições do problema inseridos na tabela, incluindo ε (vazio);
- $t_0 \in CT$ é a configuração inicial da tabela de decisão;
- $AT \subseteq CT$ é o subconjunto de configurações da tabela de decisão aceitas durante o processo; logo, o subconjunto $FC = CT - AT$ é composto pelas configurações rejeitadas;
- CRA é o conjunto finito dos possíveis resultados obtidos pela execução das ações quando da aplicação das regras NRT ; com $\varepsilon \in CRA$;
- cada regra $rt \in NRT$ é da forma $rt = (t_i, cv, t_j, r)$, onde com a entrada de valores das condições $cv \in CV$, a regra rt gera a resposta $r \in CRA$ e muda a configuração da tabela corrente t_i para a tabela t_j .

O mecanismo adaptativo CA da TDA é definido pelo conjunto das funções adaptativas FA , cada uma declarada pela sêxtupla:

⁹ Configuração, neste trabalho, significa a imagem de uma tabela de decisão.

$\mathcal{FA} = (\text{nome}, P, V, G, \mathcal{BA}, \mathcal{AD}, \mathcal{AA})$, na qual se tem:

- nome: é uma identificação usada para referenciar a função adaptativa;
- P: é composta de uma lista de parâmetros formais que são utilizados para referenciar valores passados para a função adaptativa quando é chamada;
- V: opcional, é uma lista de variáveis, que são usadas para armazenar valores resultantes da aplicação da função adaptativa;
- G: opcional, é uma lista de geradores usados para referenciar novos valores, quando a função adaptativa é ativada;
- \mathcal{BA} : opcional, indica uma chamada de ação adaptativa anterior;
- \mathcal{AD} : representa o corpo da função adaptativa e é composta por um conjunto de ações adaptativas elementares de consulta, inclusão e exclusão que modificam o conjunto de regras corrente da tabela de decisão;
- \mathcal{AA} : opcional, indica uma chamada de ação adaptativa posterior.

Desta forma, o mecanismo adaptativo \mathcal{CA} da \mathcal{TDA} é determinado por:

- $\mathcal{CA} \subseteq \mathcal{BA} \times \mathcal{NRT} \times \mathcal{AA}$, onde \mathcal{BA} (*Before Action*) e \mathcal{AA} (*After Action*) são conjuntos de ações adaptativas a serem executadas, respectivamente, antes e depois das regras não-adaptativas da tabela, e ambos contêm a ação nula ε , ou seja, $\varepsilon \in \mathcal{BA} \cap \mathcal{AA}$.

A estrutura geral da \mathcal{TDA} é apresentada na figura 4, baseada no formato descrito por Neto (2001) e na tabela de decisão convencional, com o acréscimo de linhas e colunas:

	linha de cabeçalho (tag)	colunas das funções adaptativas	colunas das regras
tabela de decisão não-adaptativa	linhas das condições	declaração das funções adaptativas	valores das condições
	linhas das ações		ações a serem aplicadas
funções adaptativas	linhas das funções adaptativas		ações adaptativas a serem executadas

Figura 4 – Estrutura geral da *TDA*

Os elementos que compõem a *TDA* são descritos a seguir:

a) linha de cabeçalho (*tag*) – linha onde são identificados os tipos de cada coluna que compõe a tabela; um *tag* ou rótulo, simbolizado por um dos caracteres **H ? + - S R E**, é utilizado:

a1) **H** indica a coluna do cabeçalho de especificação de uma função adaptativa; em cada célula desta coluna, junto às linhas das funções adaptativas, deve ser definido um dos caracteres:

- B (“before”) para indicar que a função deve ser executada antes da regra não-adaptativa subjacente;
- A (“after”), para a função que será executada depois da regra não-adaptativa subjacente;
- P para indicar que aquela linha corresponde a um parâmetro de uma função adaptativa;
- V para indicar que é uma variável da função adaptativa;
- G para indicar um gerador;

a2) **? + -** representam, respectivamente, as colunas das ações adaptativas elementares de consulta, inclusão e exclusão de regras na tabela de decisão subjacente; em cada coluna desse tipo, as células podem conter:

- nas células das condições, valores específicos que serão testados;
 - nas células das ações, devem ser assinaladas as ações que serão tomadas;
 - nas células das ações adaptativas, indicam-se aquelas ações adaptativas a serem executadas, bem como, seus parâmetros, suas variáveis e seus geradores correspondentes;
- a3) **S** (“*start*”) indica a coluna da regra de início da execução da *TDA*; nela são representadas as condições iniciais e ações iniciais para a operação da tabela;
- a4) **R** indica que a coluna corresponde a uma regra normal, ou seja, é uma regra da tabela de decisão não-adaptativa, cujas células podem conter, além dos valores das condições e das indicações das ações subjacentes, que devem ser executadas, as sinalizações para as chamadas das ações adaptativas, com a passagem dos parâmetros, variáveis e geradores correspondentes; geralmente, as colunas de regras não-adaptativas são indicadas por números inteiros e seqüenciais;
- a5) **E** corresponde à última coluna da tabela, servindo como delimitador do conjunto de regras.
- b) linhas das condições – cada linha de condição corresponde à uma variável do problema;
- c) valores das condições – em suas células, são indicados os valores das condições, podendo ser entradas limitadas (“S”, “N” ou branco) ou entradas estendidas;
- d) linhas das ações – cada linha representa uma ação ou procedimento, que pode ser executado em resposta ao conjunto de condições combinadas; nestas ações, pode-se incluir os comandos de chamada a tabelas que executam outras tabelas de decisão não-adaptativas ou adaptativas;
- e) ações a serem aplicadas – devem ser marcadas as células das ações que serão executadas quando as regras são avaliadas;

- f) linhas de funções adaptativas – nestas linhas são definidos os elementos das funções adaptativas: nomes das funções adaptativas, parâmetros, variáveis e geradores;
- g) ações adaptativas a serem executadas – em suas células assinalam-se aquelas que serão chamadas antes ou depois da aplicação da regra, assim como, indicam-se os valores dos parâmetros, variáveis e geradores necessários à sua execução.

O formalismo geral da *TDA* é a base para o modelo do sistema adaptativo aplicado em decisões multicritério, que é descrito no capítulo 4 deste trabalho.

3 TEORIA DA DECISÃO

Tendo em vista que um dos objetivos deste trabalho é mostrar a aplicabilidade da Tecnologia Adaptativa na busca de soluções de problemas de tomada de decisão, as primeiras pesquisas para esta tese, mostraram a abrangência de assuntos da Teoria da Decisão.

A Teoria da Decisão é uma área do conhecimento que trata de problemas decisórios e apresenta um conjunto de conceitos e métodos de análise que auxiliam pessoas a tomarem melhores decisões, em função de informações coletadas e disponíveis (RAIFFA, 1977). A análise de decisão fornece ao decisor uma metodologia que permite o estudo do problema de forma estruturada e racional, uma vez que o processo decisório é dinâmico, facilitando e melhorando a qualidade das respostas.

Os autores Keefer; Kirkwood e Corner (2004) pesquisaram artigos na área de tomada de decisão, publicados no período de 1990 a 2001. Encontraram trabalhos sobre problemas complexos com características de tomada de decisão no planejamento estratégico das empresas, nos investimentos, na análise de custos e lucro, em problemas de logística, na manufatura, no controle de tráfego aéreo, nos diagnósticos médicos, em políticas públicas, em aplicações militares, na área de energia e outros. Esses autores verificaram que os artigos tinham como objetivo estudar aplicações de técnicas de análise de decisão. Diante deste amplo campo de pesquisa, houve a necessidade de delimitar o estudo de problemas de tomada de decisão, razão pela qual esta tese focaliza a aplicação na área de Gestão de Negócios.

Dada a abrangência de termos específicos empregados na Teoria da Decisão, conceitos importantes são apresentados em seguida, com o objetivo de deixar claro o seu uso neste trabalho.

De acordo com Certo (2000) e Pidd (1998), uma decisão requer que um indivíduo, ou grupo, escolha uma alternativa dentre várias existentes. O número de opções

pode variar de duas disponíveis a, até, um número ilimitado. Decisões podem ser simples, como as que uma pessoa toma no seu dia-a-dia, em situações como ir ao cinema ou ler um livro, ou podem ser complexas, quando se relaciona, por exemplo, com o seu negócio nas questões de investimentos, uma vez que uma decisão pode influenciar as subseqüentes.

No contexto deste trabalho, entende-se por alternativa um curso de intenção de ação para resolver um problema (RAGSDALE, 2001), ou seja, uma alternativa representa uma maneira distinta de reagir (ação) para atingir a solução do problema, satisfazendo seus requisitos.

Também neste contexto, problema pode ser definido como algo que está errado e precisa ser corrigido ou resolvido. Para isto, é necessário identificar as causas que geraram o problema e as restrições nele existentes (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2002). Em geral, a palavra problema tem seu significado usual designando uma pergunta, um enigma, ou uma questão que precisa ser resolvida. Problema de decisão deve ser, portanto, compreendido como um problema que apresenta, pelo menos, duas alternativas de solução. Assim, tomar decisão é um processo de escolha da melhor alternativa, para alcançar respostas de problemas de decisão. É importante notar que na computação, de acordo com Lewis e Papadimitriou (1998), um problema computacional também pode ser definido como um processo de decisão, que tem como resposta *sim* ou *não* quando um determinado conjunto de entradas satisfaz ou não uma determinada propriedade a ser verificada, respectivamente.

Deve-se observar que o decisor (*decision maker*), também denominado tomador de decisão, ou agente de decisão, ou especialista, pode ser representado por uma pessoa ou um grupo de pessoas, e é aquele que, de acordo com o seu julgamento e juízo de valor, influencia no processo decisório e é o responsável pela tomada de decisão (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2002). Suas escolhas ou preferências durante o processo dependem de sua experiência de vida e profissional, seu conhecimento e sua criatividade, entre outros fatores, e que podem ser alterados à medida que novas idéias e informações são acumuladas e descartadas, gerando uma dinâmica própria.

Torna-se, portanto, importante estudar o processo de tomada de decisão, tratado no próximo item, não se pretendendo aprofundar na ciência da decisão, mas apenas para que os conceitos dele oriundos possam subsidiar esta tese.

3.1 TOMADA DE DECISÃO

Segundo Harris (1998), o estudo da tomada de decisão consiste na identificação e escolha de alternativas com base nos valores e nas preferências daquele que toma a decisão. Observa esse autor que, para se tomar uma decisão, escolhas alternativas devem ser consideradas. Assim sendo, deseja-se não somente identificar todas as alternativas possíveis, mas também escolher aquela que melhor se adapta aos objetivos, alvos, valores etc.

Herbert Simon, especialista em psicologia e ciência da computação, é considerado pioneiro na pesquisa sobre tomada de decisão e de importante influência na teoria da gestão e da microeconomia, o que lhe valeu o Prêmio Nobel da Economia de 1978¹⁰. Além de ser o responsável pelo conceito de tomada de decisão organizacional, Simon também direcionou as suas pesquisas na área de informática, em especial na área de inteligência artificial, com contribuições significativas em sistemas de apoio a tomada de decisões (POMEROL; ADAM, 2006).

O pesquisador afirma que nem sempre é possível conhecer todas as alternativas disponíveis ou mesmo conseguir chegar à decisão que possa ser considerada ótima, pela complexidade dos objetivos e dos elementos que definem o problema de decisão.

Simon observa que as pessoas possuem limitações na capacidade para captar todos os fatos que envolvem um problema e que realmente sejam relevantes para a decisão. Tais limites surgem porque os seres humanos têm um conhecimento

¹⁰ <http://www.janelanaweb.com/digitais/simondigest.html>

restrito, têm capacidades limitadas para poder analisar as conseqüências do próprio saber que detêm e as reações às suas decisões.

Em um processo de decisão deve-se levar em consideração, tanto elementos de natureza objetiva, próprios do problema e das ações, quanto os elementos subjetivos, que dependem dos valores e características do tomador de decisão (THOMAZ, 2000). Tomar decisão é uma tarefa que requer conhecimento, segurança e coerência do decisor para que a decisão seja confiável.

Raiffa (1977) também comenta que nem sempre as pessoas se comportam de acordo com os princípios adotados por uma metodologia de escolha de alternativa, que resulta na constante preferência de uma alternativa em detrimento de outra. O autor observa que os métodos de escolha podem auxiliar formalmente o decisor, para que a decisão não seja tomada somente pelo seu julgamento pessoal, o que às vezes pode levar a uma decisão diferente ou até mesmo contrária em relação à do método.

Ragsdale (2001) observa que decisões consideradas boas, mesmo que obtidas com técnicas de análise de decisão, não podem garantir bons resultados. Se, por exemplo, um profissional decidiu abandonar um emprego numa empresa para ter o seu próprio negócio, segundo parâmetros que tenha estabelecido e são conhecidos num determinado período, pode não garantir um bom resultado, em outro momento. Pode acontecer que haja uma mudança na legislação tributária, por exemplo, que não estava prevista, e com isto inviabilizar o seu empreendimento.

Com o objetivo de se minimizar a subjetividade na decisão, contudo, métodos desenvolvidos na área da Teoria da Decisão possibilitam a elaboração de modelos de decisão que oferecem técnicas para a estruturação do problema e funções que permitem representar os julgamentos e as preferências dos decisores de forma consistente durante o processo de tomada de decisão (RAIFFA, 1977; RAGSDALE, 2001).

Os processos de análise para a tomada de decisão, portanto, servem para minimizar os riscos de uma escolha, uma vez que apresentam ou recomendam várias

alternativas de ações para a solução de um problema (RAIFFA, 1977; RAGSDALE, 2001; LAUDON; LAUDON, 1999; STAIR; REYNOLDS, 2002). O alcance dos objetivos é o que determina a eficiência do processo de tomada de decisão. Visando essas características, e devido à sua importância para esta tese, são apresentados nos próximos itens considerações sobre os processos decisórios, recursos computacionais de apoio à decisão e métodos de tomada de decisão.

3.2 PROCESSOS DECISÓRIOS

As decisões nas organizações, geralmente, são escolhas tomadas com base em objetivos de diferentes níveis e no tempo necessário para obtenção dos resultados. Há decisões baseadas em atividades administrativas em níveis estratégicos, cujos propósitos são de longo prazo, e os de níveis táticos e operacionais, freqüentemente considerados de curto prazo. A empresa deve estar atenta e analisar os fatores do ambiente externo e interno que possam influenciar as suas atividades e coletar informações que apoiem os processos decisórios, sejam estratégicos ou operacionais (PIDD, 1998; CERTO, 2000; STAIR; REYNOLDS, 2002; O'BRIEN, 2004).

Vários estudos sobre o processo de escolha são encontrados na literatura, entre eles o da escolha racional clássica, no qual os autores Ackoff e Sasieni (1968, apud PIDD, 1998) observam que o modelo do processo decisório deve reunir dados que possam representar as variáveis de controle, por exemplo, aqueles obtidos no âmbito interno da empresa e sobre os seus concorrentes, que determinarão quais são as ações alternativas. Além disso, completar com dados externos à empresa, tais como fatores políticos ou econômicos, consideradas variáveis incontroláveis que são relevantes ao problema em questão, e critérios de decisão que possam levar à melhor ação dentre as apresentadas. Assim, o modelo pode apresentar os efeitos de uma escolha.

De acordo com Balestrin (2002), o pesquisador Herbert Simon em 1997 propôs que o processo decisório em qualquer atividade seja constituído inicialmente pela etapa

de percepção da necessidade de decisão ou oportunidade, seguida pela formulação de alternativas de ação, pela avaliação das alternativas em termos de suas contribuições e pela escolha de uma ou mais alternativas para fins de execução.

Para Stair e Reynolds (2002), com o problema identificado, seu modelo de escolha é definido pelas fases de tomada de decisão, de implementação e de monitoramento como as principais etapas para a obtenção da solução do problema.

Durante a fase de tomada de decisão, Stair e Reynolds (2002) distinguem os estágios de inteligência, projeto e escolha. No primeiro, são identificadas e definidas as dificuldades potenciais e/ou oportunidades advindas do problema. É o estágio onde as informações relacionadas às causas do problema são coletadas. As alternativas de soluções são desenvolvidas e analisadas no estágio de projeto, enquanto que no de escolha há a seleção de uma ação.

Após a fase de tomada de decisão, é necessário que a ação escolhida seja implementada e é neste estágio que a solução é colocada em prática. Para verificar se os resultados foram atingidos, o tomador da decisão deve acompanhar o processo, monitorando-o. Deste monitoramento é possível que o processo sofra ajustes, ou seja, que ele venha a ser alterado, como consequência da realimentação recebida. Além disso, o acompanhamento do processo permite ao decisor aprender com o *feedback* (STAIR; REYNOLDS, 2002).

Laudon e Laudon (1999) consideram que no processo decisório, o tomador de decisão, normalmente, deve analisar os objetivos a serem alcançados com as suas ações, a situação que envolve o problema, levando em conta os recursos disponíveis, e a consequência decorrente da decisão adotada.

Desta maneira, todo problema cuja solução é baseada num processo de tomada de decisão pode ser planejado usando a experiência e os resultados de outros casos com características semelhantes. Uma base de dados que disponibilize as estratégias adotadas em cada caso, pode auxiliar no processo decisório nas suas diversas perspectivas e melhorar a qualidade da informação. Nos casos em que, eventualmente, não haja informação na base de dados, deve existir tanto a

possibilidade de se inserir novos dados quanto a de se modificar a base de dados, melhorando o modelo.

Assim, tomar uma decisão sobre um determinado assunto requer que o indivíduo, ou um grupo de pessoas, busque quais são as informações que já possui sobre o assunto, verifique se surgiram novas informações, reúna tais informações para poder analisá-las e compará-las e, então, tentar chegar à solução do problema em questão.

Outros modelos de busca da solução do problema são tratados em Stair e Reynolds (2002), que dependem de decisões programadas ou não-programadas. As primeiras são dirigidas por regras, procedimentos ou métodos quantitativos. São decisões de fácil implementação nos sistemas de informação tradicionais, pois provêm de problemas rotineiros e bem definidos ou estruturados. Decisões não-programadas são difíceis de quantificar e são exigidas em situações excepcionais ou incomuns. Nem sempre a aplicação de regras ou de procedimentos é clara, uma vez que os relacionamentos não são bem definidos, característica dos problemas desestruturados.

Modelos de decisão nas organizações que tratam de otimização, convencional e heurística para a obtenção da solução de um problema, também são considerados por Stair e Reynolds (2002).

No modelo de otimização busca-se a melhor solução do problema para que a organização alcance as metas planejadas. Por exemplo, como atingir as metas de lucro, otimizando a quantidade a ser produzida de um determinado produto.

O modelo convencional é usado quando não é possível obter uma decisão otimizada, por ser complexa ou difícil, mas procura uma boa solução dentre algumas possíveis, e que gere bons resultados. A escolha da localização para uma nova fábrica pode levar a um local que satisfaça às necessidades da empresa, mas que pode não ser um ótimo local, uma vez que pesquisar todas as alternativas possíveis é muito difícil.

O tratamento heurístico está relacionado aos princípios básicos da organização, cujas diretrizes ou procedimentos são aceitos e que, em geral, levam a uma boa solução (STAIR; REYNOLDS, 2002). Estes princípios têm como base regras ou normas práticas que tendem a produzir bons resultados, independentemente de justificativas formais. Se uma empresa adota o princípio básico de que não falte um produto no estoque, esta heurística empregada no negócio a levará a adquirir uma determinada quantidade do produto em um intervalo de tempo, de tal maneira que o nível de estoque não fique abaixo de uma quantidade mínima.

Para Herbert Simon, o modo mais adequado para se estudar a resolução de problemas seria através da simulação da situação com recursos computacionais, idéia defendida já na década de 50, segundo as pesquisas de Balestrin (2002).

De acordo com Pidd (1998), nas ciências administrativas o uso de modelos que representam os processos decisórios, implementados em forma computacional, podem constituir uma maneira de controlar e gerenciar as conseqüências de uma decisão. Estes sistemas podem ser baseados na idéia de realimentação, conforme os dados disponíveis e o desempenho obtido no processo. Os sistemas são realimentados permitindo que o tomador da decisão tenha maior controle do processo e melhore o seu desempenho.

Para agilizar a obtenção da solução do problema, as organizações podem contar com vários sistemas de informação, apoiando os vários estágios do processo. Estes sistemas podem auxiliar no início do processo na obtenção de informações, seguido pela criação de modelos de tomada de decisão usados para explorar e analisar alternativas, apoiando-se na escolha da decisão e no monitoramento da solução implementada.

As organizações podem contar também com os sistemas de apoio à decisão que permitem executar vários serviços, como no acesso à base de dados corporativos e na simulação de problemas específicos (BINDER, 1994). Desta forma, é possível criar ambientes que propiciam a análise e a avaliação das alternativas de solução em procedimentos de tomada de decisão, buscando a melhor solução e procurando minimizar os erros.

As ferramentas computacionais, disponíveis nas organizações, também têm como objetivo fornecer diferentes tipos de informações, tanto quantitativos quanto qualitativos, que estão presentes nos modelos de decisão e que influenciam nos processos decisórios (TRUCK; AKDAG, 2005). Tais ferramentas devem ser capazes de tratar informações que podem ser mensuradas ou quantificadas, tais como as que envolvem valores monetários, bem como informações qualitativas, que são difíceis de quantificar ou medir, como os efeitos que um produto pode causar na qualidade do meio ambiente.

3.3 RECURSOS COMPUTACIONAIS DE APOIO À DECISÃO

O nível de tomada de decisão nas organizações depende das necessidades de informação dos tomadores de decisão e, segundo O'Brien (2004), os níveis de decisões podem ser divididos em não-estruturados, semi-estruturados e estruturados.

O'Brien (2004) considera decisões estruturadas aquelas em que as situações levam a um processo de decisão já conhecido, ao contrário das decisões não-estruturadas, em que os procedimentos não estão ainda especificados. O que ocorre na maioria das situações de decisão, são aquelas do tipo semi-estruturadas, para as quais parte do processo segue caminhos pré-determinados, mas não são suficientes para levar a uma decisão definida.

Os sistemas de informação, existentes no mercado, possibilitam a obtenção de uma variedade de conjuntos de informações para atender às diferentes necessidades dos tomadores de decisão, tendo em vista os diversos níveis de decisão. Nesse sentido, podem ser destacados os sistemas direcionados às decisões estruturadas, que envolvem aspectos operacionais e rotineiros, tais como SIG (Sistema de Informação Gerencial) e Olap (*On-line analytical processing* ou *Processamento Analítico Online*). Para decisões semi-estruturadas ou não-estruturadas, os sistemas de apoio à

decisão SAD e os baseados na Inteligência Artificial podem resolver problemas complexos e dar suporte a decisões difíceis.

A seguir, são tratadas características gerais de alguns destes sistemas computacionais, com o objetivo de apresentar o seu uso em aplicações na tomada de decisão.

3.3.1 SIG e OLAP

SIG foram os primeiros sistemas de apoio gerencial que surgiram e que têm sua importância em situações de decisões mais estruturadas. Os tomadores de decisão, geralmente, utilizam o SIG para acessar os bancos de dados disponíveis para consultas e análises de dados para, então, executar as atividades de tomada de decisão.

Segundo Stair e Reynolds (2002), o principal fator de desenvolvimento dos SIG é satisfazer às necessidades dos gerentes e dos tomadores de decisão. Abrange uma coleção organizada de pessoas, procedimentos, software, banco de dados e dispositivos que fornecem informações rotineiras aos gerentes e tomadores de decisão.

Um SIG tem como foco a eficiência operacional. Provê aos gerentes não só informações e suporte para a efetiva tomada de decisão, bem como resposta às operações diárias, agregando, assim, valor aos processos da organização.

As principais características de um SIG, de acordo com Stair e Reynolds (2002), permitem aos usuários produzirem seus próprios relatórios, impressos ou em tela, com formatos fixos e padronizados, que podem ser analisados por diferentes áreas da empresa para propósitos diversos. Permitem ainda utilizar dados de fontes internas e externas armazenados em banco de dados, filtrando-os para melhor compreensão das informações.

Em determinadas situações de decisão, os responsáveis pela mesma precisam extrair dados detalhados e consolidá-los para analisar padrões, tendências ou situações incomuns, de forma interativa e constante.

Quanto ao Olap, pode ser uma alternativa computacional para em tempo real e dinâmico gerar respostas rápidas às consultas dos tomadores de decisão (O'BRIEN, 2004), oferecendo recursos para operações analíticas básicas como:

- consolidação: recurso que reúne dados que se inter-relacionam;
- *drill-down* (desagregação): mostra em detalhe os dados que estão consolidados;
- *slicing and dicing* ("fatiar em cubos"): permite que os bancos de dados sejam analisados sob diferentes pontos de vista; geralmente, é executado ao longo de um intervalo de tempo, a fim de se descobrir padrões e analisar tendências.

Desta forma, Olap permite explorar dados corporativos dentro de várias perspectivas, além de permitir a análise de dados usando múltiplas dimensões, onde os valores agregados aos dados possibilitam hierarquizá-los e visualizá-los (STAIR; REYNOLDS, 2002).

3.3.2 Sistemas de Apoio à Decisão (SAD)

Sistemas SAD fornecem informações de forma interativa aos tomadores de decisão. São fundamentados em modelos de referência, os quais consistem de modelos utilizados em rotinas computacionais e analíticas, e expressam matematicamente relações entre as variáveis do problema de decisão (O'BRIEN, 2004).

Com isto, a partir das rotinas de modelagem analítica e das combinações de seus elementos, possibilitam a criação de novos modelos que integrados servem de apoio a casos específicos de decisões. Além desses recursos, os sistemas SAD utilizam bancos de dados especializados, bem como as próprias percepções e julgamentos do tomador de decisão.

Desta forma, SAD se diferenciam de outros sistemas na maneira como o processo de interação se dá com o usuário. Ao introduzir alterações hipotéticas no sistema, uma seqüência de respostas é apresentada ao usuário, que, por sua vez, pode efetuar outras mudanças e explorar as alternativas possíveis.

Para Stair e Reynolds (2002), um SAD vai além do SIG tradicional, pois pode fornecer assistência imediata na solução de problemas complexos não suportados por um SIG. Um SAD, geralmente, é usado para tomada de decisão em problemas empresariais desestruturados ou semi-estruturados, onde o relacionamento dos dados nem sempre está claro.

Em um SAD são encontrados alguns tipos de modelagem analítica, que podem ser úteis no processo de decisão, segundo O'Brien (2004) e Stair e Reynolds (2002). Podem-se destacar os seguintes tipos:

- análise do tipo “e-se” (*what-if*): o usuário efetua alterações nas variáveis ou busca novas relações entre as variáveis e verifica como elas afetam os valores de outras variáveis; a análise dos resultados pode levar o usuário a repetir o processo de mudança nas variáveis, até que os resultados mostrem os melhores efeitos das possíveis decisões a serem tomadas;
- análise de sensibilidade: processo de se introduzir mudanças hipotéticas nos dados do problema e observar o impacto nos resultados; envolve repetidas mudanças em apenas uma variável de cada vez; é considerada um caso particular da análise *what-if* e é usada quando o tomador de decisão deseja verificar se as premissas adotadas na estimativa do valor de determinadas variáveis consideradas chave estão corretas ou não;
- análise de busca de metas (*goal seeking*): procura os valores que as variáveis devem assumir para que uma meta ou valor-alvo fixado para uma variável seja atingido;
- análise de otimização: é uma extensão da análise de busca de metas, porque não fixa apenas um valor específico para uma variável, mas procura o melhor valor para uma ou mais variáveis-alvo, dentro de certas limitações; o processo consiste em alterar uma ou diversas das outras variáveis repetidas vezes, até que os melhores valores levem aos valores das variáveis-alvo.

Os recursos de um SAD, portanto, permitem manipular volume considerável de dados de diferentes fontes, estejam eles armazenados em computadores ou em redes distintas (STAIR; REYNOLDS, 2002). Além disto, fornecem diferentes tipos de relatórios e gráficos que relacionam dados necessários para análise dos tomadores de decisão.

3.3.3 Técnicas de Inteligência Artificial nos Negócios

A Inteligência Artificial (IA) é um campo da ciência e da tecnologia de abrangência multidisciplinar, pois envolve disciplinas como psicologia, biologia, lingüística, engenharia, matemática e informática, e conforme a aplicação, outras mais são envolvidas (O'BRIEN, 2004). Muitos estudos e pesquisas estão sendo desenvolvidos na área de IA para apoiar na solução de problemas.

Uma técnica que possibilita extrair informações de base de dados armazenados é o *Data Mining*, que procura identificar fatores e tendências nos padrões das atividades de negócio, auxiliando na tomada de decisão sobre mudanças estratégicas da empresa, que visa atuar com vantagens competitivas no mercado (O'BRIEN, 2004; STAIR; REYNOLDS, 2002).

O *Data Mining* utiliza algoritmos avançados de reconhecimento de padrões e técnicas matemáticas e estatísticas para buscar tendências e correlações entre os dados. Em conseqüência, permite realizar regressões, elaborar árvores de decisão, gerar cadeias neurais ou encontrar grupos de dados específicos.

Diferentemente de outras ferramentas de consulta, nas quais os usuários formulam e testam uma hipótese específica, Stair e Reynolds (2002) observam que o *Data Mining* além dos recursos de análise embutidos para gerar, automaticamente, hipóteses sobre padrões e situações diversas identificadas nos dados, ajuda a prever um comportamento futuro do negócio.

Segundo O'Brien (2004), as aplicações da IA podem ser classificadas nas seguintes áreas:

- ciência cognitiva: compreende os sistemas especialistas, sistemas de aprendizagem, lógica difusa, algoritmos genéticos, redes neurais e agentes inteligentes;
- robótica: produz robôs, cujos sistemas, por exemplo, destinam-se à percepção visual, tátil, habilidade no manuseio, capacidade física para se mover e para encontrar o caminho até um destino; envolve, desta maneira, o desenvolvimento de máquinas que realizam tarefas complexas e consideradas perigosas para os humanos, ou em tarefas rotineiras ou entediadas (STAIR; REYNOLDS, 2002);
- interfaces naturais: aborda o estudo de linguagens naturais, o reconhecimento de discurso, interfaces multissensoriais e realidade virtual.

Dada a variedade de áreas de atuação da IA e como este trabalho se concentra nas aplicações voltadas aos processos de tomada de decisão, em especial à área de negócios, são destacados a seguir alguns aspectos dos sistemas da área cognitiva.

Em sistemas baseados nas redes neurais, as pesquisas e os estudos se concentram no funcionamento do cérebro humano. O cérebro humano pode ser considerado um processador composto por bilhões de neurônios. Todas as funções e movimentos do organismo estão relacionados ao funcionamento destas pequenas células. Os neurônios estão conectados uns aos outros através de sinapses, e juntos formam uma grande rede, chamada rede neural. As sinapses, que são as conexões entre os neurônios, transmitem estímulos e o resultado disto pode ser estendido por todo o corpo humano. Esta rede proporciona uma grande capacidade de processamento e armazenamento de informação (O'BRIEN, 2004).

As redes neurais artificiais consistem em um método de solucionar problemas de inteligência artificial, construindo um sistema que tenha circuitos que simulem o cérebro humano, inclusive seu comportamento, ou seja, aprendendo, errando e fazendo descobertas (KASABOV, 1996). São técnicas computacionais que apresentam um modelo inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência (O'BRIEN, 2004). Uma rede neural artificial pode ter centenas ou milhares de unidades de processamento.

A propriedade mais importante das redes neurais é a habilidade de aprender de seu ambiente e, com isso, melhorar o desempenho, característica encontrada em outras tecnologias. Isso é feito através de um processo iterativo de ajustes durante o treinamento. O aprendizado ocorre quando a rede neural atinge uma solução generalizada para uma classe de problemas. Para Stair e Reynolds (2002) a rede neural permite ao computador reconhecer e atuar sobre padrões ou tendências.

Um algoritmo de aprendizado é um conjunto de regras bem definidas para a solução de um problema de aprendizado. Existem muitos tipos de algoritmos de aprendizado específicos para determinados modelos de redes neurais. Estes algoritmos diferem entre si principalmente pelo modo como as regras são combinadas com probabilidades (STAIR; REYNOLDS, 2002; KASABOV, 1996) e como os pesos são modificados.

A rede neural se baseia nos dados que recebe para deles extrair um modelo geral. Portanto, a fase de aprendizado deve ser rigorosa e verdadeira, a fim de se evitar modelos inadequados. Todo conhecimento de uma rede neural fica armazenado nas sinapses, ou seja, nos pesos atribuídos às conexões entre os neurônios. Dados são introduzidos para o treinamento da rede neural, dados estes escolhidos aleatoriamente, a fim de que a rede "aprenda" as regras e não "decore" exemplos. O restante dos dados só é apresentado à rede neural na fase de testes, a fim de que ela possa "deduzir" corretamente o inter-relacionamento entre os dados (O'BRIEN, 2004).

A rede neural pode aprender processando exemplos de problemas e suas soluções, e, à medida que reconhece padrões e relaciona os dados, pode começar a se programar para resolver esses problemas por si mesma. Aplicações de redes neurais são inúmeras, como aplicações no mercado financeiro na análise de risco no crédito, e nesse caso, o sistema pode avaliar os resultados dos empréstimos pretendidos.

Na área de IA, também são encontrados os sistemas de lógica difusa. Estes sistemas se baseiam em um método de raciocínio, que dá margem para valores e

inferências aproximados, por isso lógica difusa (*fuzzy logic*), e dados incompletos ou ambíguos ou difusos (O'BRIEN, 2004; KASABOV, 1996). Como a lógica difusa é deliberadamente imprecisa, os sistemas executam os processos mesmo com dados parciais e chegam a soluções aproximadas e aceitáveis para problemas complexos e difíceis de serem resolvidos por métodos convencionais ou tradicionais. A negociação de ações na bolsa de valores pode ser um exemplo de aplicação baseada em regras de lógica difusa.

O uso da lógica difusa, também denominada nebulosa (STAIR; REYNOLDS, 2002; KASABOV, 1996), ajuda os sistemas computacionais a avaliar as condições imperfeitas ou imprecisas do problema, e a realizar hipóteses com base na possibilidade e probabilidade de acerto na decisão. Esta capacidade de avaliar uma situação pode ser considerada semelhante ao julgamento que uma pessoa faz quando avalia determinadas questões, diante de informações nem sempre precisas.

Outras técnicas que se destacam na área de IA utilizadas para apoiar decisões se utilizam dos conceitos de algoritmos genéticos, agentes inteligentes e sistemas especialistas.

De acordo com O'Brien (2004), os sistemas de algoritmos genéticos simulam um processo evolutivo que pode proporcionar soluções progressivamente melhores para um problema. São utilizadas regras de métodos matemáticos que especificam como as combinações de componentes ou etapas de processos devem ser formadas. Estas combinações podem ser aleatórias, e criar modificações e seleção de processos para gerar melhores soluções.

Um agente inteligente é um software, que utiliza a sua base de conhecimento armazenada e aprendida sobre uma pessoa ou processo, para tomar decisões e executar tarefas específicas de modo que realize as intenções do usuário (O'BRIEN, 2004). Os recursos deste tipo de sistema auxiliam na procura de informações desejadas e sugerem novos caminhos para a obtenção de dados que se ajustem às necessidades das empresas ou pessoais do usuário. São exemplos práticos do uso de agentes inteligentes: na comparação de preços de produtos específicos ou na

busca de informações sobre determinado assunto para fins de planejamento estratégico.

Para Stair e Reynolds (2002), um Sistema Especialista (SE) confere ao computador a capacidade de sugerir e agir como um especialista num campo em particular. Permite que as organizações absorvam e usem o conhecimento dos peritos e especialistas.

Complementando a definição anterior, um SE tem por objetivo atender a uma aplicação determinada e limitada do conhecimento de uma pessoa (O'BRIEN, 2004). Tem a capacidade de apresentar uma solução apoiada em conhecimento prévio, obtido a partir de uma base de informações, da mesma forma que um especialista de determinada área detém conhecimento sobre um assunto específico.

Um SE é baseado no conhecimento sobre uma área de aplicação específica e complexa, atuando como um consultor para o usuário. O sistema utiliza uma base de conhecimento sobre um determinado problema, para fazer inferências sobre o conhecimento e gerar respostas às questões do usuário sobre o problema.

Geralmente, a base de conhecimento é organizada por um especialista da área de aplicação. Esta base deve conter informações e fatos sobre a área específica e heurística que expresse o processo de raciocínio do especialista em relação ao assunto.

Segundo O'Brien (2004), a representação do conhecimento pode ser baseada em regras, cujas declarações assumem a forma de uma premissa e uma conclusão do tipo "*if (condição) then (conclusão)*". Outra maneira de representar o conhecimento é na forma de casos, com exemplos de desempenho, ocorrências e experiências. Ou, ainda, o conhecimento pode ser representado na forma de uma hierarquia ou rede de quadros que contém valores de dados que descrevem os atributos sobre o problema.

Desta maneira, de forma interativa com o usuário, o SE processa o conhecimento, tais como regras e fatos sobre o problema específico, e realiza associações e

inferências que o levam a indicar as ações possíveis que o usuário pode tomar, mostrando o processo de raciocínio percorrido.

De um modo geral, para tomar uma decisão sobre um determinado problema, baseado nos fatos que encontra, um SE formula suas hipóteses. Durante o processo de raciocínio, ele verifica qual a importância dos fatos que encontra, comparando-os com as informações já adquiridas sobre esses fatos e hipóteses. Novas hipóteses são formuladas e novos fatos são verificados, influenciando no processo de raciocínio.

Como esse processo de raciocínio é baseado no conhecimento prévio acumulado, podem ocorrer situações em que o SE não chegue a uma decisão, se os fatos de que dispõe para aplicar o seu conhecimento prévio não forem suficientes, podendo, inclusive, chegar a uma conclusão errada.

Os SE podem ser uma alternativa para problemas complexos, pois possuem o seu mecanismo apoiado em processos heurísticos. Além de inferir conclusões, podem ter a capacidade de aprender e, desse modo, melhorar o seu processo lógico e a qualidade de suas decisões, preservando o conhecimento de um especialista em uma determinada área.

O'Brien (2004) observa, porém, que alguns critérios devem ser identificados para que um determinado problema seja adequado às soluções do SE. Estes critérios de adequação abrangem aspectos como:

- conferir o domínio do problema, isto é, se a área do problema é bem definida;
- verificar a existência de um especialista que possa colaborar com o conhecimento, as técnicas de raciocínio e sua intuição para o desenvolvimento do SE para alcançar as soluções do problema;
- examinar a complexidade do problema, que exige processamento lógico de inferências;
- analisar dados mal-estruturados e imprecisos com uma situação do problema, que muda com o correr do tempo.

Várias áreas têm utilizado os SE, tais como a medicina, engenharia, ciências físicas e administração de empresas. Nesta última, são aplicações que podem avaliar situações estratégicas, ou no planejamento financeiro, ou na escolha de produtos, ou de processos que têm conjuntos amplos e complexos de alternativas, entre outras.

Contudo, muitas aplicações de SE, devido à sua complexidade, têm tido dificuldades em formalizar o conhecimento e, em conseqüência, em criar e atualizar a base de conhecimento, diante do seu volume e de sua difícil sistematização. Por isso, esforços têm sido feitos para desenvolver Sistemas Especialistas capazes de aprender sozinhos essas associações lógicas.

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS SISTEMAS COMPUTACIONAIS

Os sistemas apresentados anteriormente implementam algumas das tecnologias, que podem ser aplicadas em um sistema de gerenciamento de conhecimento, para auxiliar nos processos de decisão e estratégicos da organização.

A gestão do conhecimento é apoiada pela Tecnologia da Informação para coletar, organizar e compartilhar conhecimento dentro de uma empresa, o que implica, também, em administrar a aprendizagem organizacional e seu *know-how*. Os sistemas de gestão do conhecimento fornecem um *feedback* rápido aos especialistas da área e os auxiliam na criação, organização, disponibilização e disseminação do conhecimento, para integrá-lo em seus serviços, produtos e processos.

Deve-se ressaltar neste trabalho, que durante as pesquisas, vários estudos chamam a atenção quanto ao conceito de gestão do conhecimento nas empresas, assunto que não será discutido e está fora do escopo desta tese, mas observações de alguns pesquisadores sobre o tema são apresentadas na seqüência.

Os autores Krogh; Ichijo e Nonaka (2001) observam que em geral, a gestão do conhecimento é praticada nas empresas para selecionar informações de uma base de dados, armazená-las para uso futuro, combiná-las e transferi-las para outros meios e disponibilizá-las para aqueles que as necessitam. Desta maneira, o objetivo da gestão do conhecimento é assegurar que a informação certa chegue ao usuário certo, no momento certo.

Porém, os autores observam que, deve-se indagar se conhecimento é o mesmo que informação. No caso afirmativo, então a tecnologia da informação tem realizado o seu papel adequadamente. Entretanto, relegar a gestão do conhecimento a uma simples gestão de informação é subutilizá-la. Há muita confusão, advertem os autores, sobre o que é conhecimento e o que é informação, apesar de existirem muitas iniciativas de gestão de conhecimento.

Segundo Krogh; Ichijo e Nonaka (2001), informação é um conjunto de dados contextualizado e relaciona-se com outros dados. Dados são facilmente estruturados e transferidos por meio de sistemas. Informação tem a ver com significado e constitui a base do conhecimento, mas requer uma formatação adequada dos dados para fins de análise por parte das pessoas, e, também pode ser reunida e transferida eletronicamente. No entanto, o conhecimento abrange as crenças de grupos ou indivíduos, e se relaciona intimamente com a ação. Crenças, comprometimento e ações não são captados e representados da mesma maneira como as informações. Além disso, o conhecimento nem sempre é detectável; cria-se espontaneamente, por vezes de forma imprevisível. Portanto, para os autores é difícil estruturar e armazenar todo o conhecimento e transferi-lo por meio eletrônico de uma para outra parte da organização.

Deve-se reforçar, portanto, que estas observações devem ser levadas em consideração nos modelos adotados nos sistemas de informação e de conhecimento, principalmente nos processos decisórios, devido ao componente subjetivo relacionado a juízos de valores presentes nos tomadores de decisão.

Aliadas à essas ressalvas, pode-se observar que as características dos sistemas computacionais estudados fornecem uma visão do que é desejável e necessário em

um sistema de apoio à decisão, tais como oferecer recursos de interatividade, flexibilidade, ter comportamento dinâmico, auxiliar na coleta de informações e modelar as necessidades dos usuários. Deve também, facilitar a análise de um grande número de variáveis, para que seja possível ao decisor se posicionar diante do problema.

Os processos decisórios implementados em forma computacional, além de possibilitarem ao usuário o controle e o gerenciamento da escolha de uma decisão, devem prever novas necessidades de informações sobre a posição corrente do problema, como também informar sobre a situação seguinte de uma tomada de decisão.

Verifica-se que sistemas SIG servem, geralmente, às aplicações de decisões, cujas informações são acessadas de bancos de dados gerados pelas transações próprias de uma organização, portanto orientados aos dados já existentes, assim como as versões tradicionais dos Olap.

Por outro lado, os sistemas de apoio à decisão SAD e os classificados como inteligentes, tais como os que utilizam técnicas de Inteligência Artificial, possibilitam lidar com contextos dinâmicos, cujos cenários sofrem alterações constantes e, em alguns casos, difíceis de serem formalizadas. E, é nessa categoria que as pesquisas têm evoluído com o desenvolvimento de uma nova geração de sistemas de apoio à decisão, como aquelas baseadas nos métodos multicritério mencionados no Capítulo 1 desta tese, e nas técnicas adaptativas que podem servir como uma alternativa adicional (Neto, 2007).

Considerando a motivação e os objetivos deste trabalho, e dada a abrangência dos tipos de processos de tomada de decisão, a tese tem como foco os processos semi-estruturados. Esses processos envolvem decisões baseadas em conjuntos de regras do tipo “*if-then*”, com informações, muitas vezes, incompletas, o que justifica o uso do conceito de adaptatividade para a busca de soluções, com a utilização da Tabela de Decisão Adaptativa (ver cap. 2) como ferramenta de apoio à tomada de decisão, em particular às decisões que envolvem múltiplos critérios.

Para dar seqüência a este trabalho, é importante apresentar alguns métodos de tomada de decisão que dependem da complexidade do problema, de seus critérios e de suas alternativas de solução.

3.5 MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO

Os métodos multicritério utilizam técnicas que oferecem maior compreensão dos problemas de decisão com número finito de critérios e alternativas, e apóiam a decisão durante os processos decisórios, quando inseridos em contextos, geralmente, multidisciplinares (FÜLÖP, 2005).

Segundo Fülöp (2005), os métodos multicritério apóiam os processos de análise de decisão, conferindo-lhes consistência e confiabilidade nos julgamentos do decisor. De acordo com Roy (1996), dependendo de como o problema de decisão multicritério é formulado, existem métodos multicritério de escolha, classificação e ordenação das alternativas existentes no problema.

Métodos multicritério de escolha permitem que uma única alternativa seja selecionada de um subconjunto obtido do conjunto de opções disponíveis. Os métodos de classificação consistem em distribuir cada alternativa na categoria apropriada, de acordo com um valor associado à alternativa, obtido por funções de utilidade. Os métodos de ordenação estabelecem uma ordem de preferência das alternativas, segundo julgamentos dos decisores que atribuem níveis de importância a cada alternativa em relação aos objetivos do problema de decisão (ROY, 1996; FÜLÖP, 2005).

Dada a importância dos julgamentos dos decisores, os métodos de apoio às decisões multicritério procuram explorar e reduzir a subjetividade dos valores dos decisores, possibilitando maior clareza e eficiência nas decisões. Os métodos desenvolvidos têm origem em duas principais correntes: a da Escola Americana e a da Escola Européia ou Francesa (FÜLÖP, 2005).

A Escola Americana tem como base a Teoria da Utilidade Multiatributo proposta por Keeney e Raiffa (1976), na qual o valor de um critério ou de uma alternativa para um decisor depende da sua utilidade na decisão. Segundo a teoria da utilidade, podem-se aplicar funções de utilidade ao modelo matemático do problema de decisão, pelas quais se refletem a utilidade e preferências do decisor para cada critério em relação às alternativas possíveis (FÜLÖP, 2005; GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004). Seus métodos são conhecidos como métodos multicritério MAUT (*Multiple Attribute Utility Theory*), e entre eles se destacam:

- AHP (*Analytic Hierarchy Process*): propõe a decomposição do problema de decisão em níveis hierárquicos e através de julgamentos do decisor sobre os critérios e alternativas, obtém valores globais das alternativas, priorizando-as;
- SMART (*Simple Multi-Attribute Rating Technique*): tem como base o uso de função utilidade linear como a média algébrica ponderada para priorizar as alternativas;
- TODIM (Tomada de Decisão Interativa Multicritério): incorpora em sua formulação padrões de preferência dos decisores em presença de risco, baseado na Teoria dos Prospectos, que utiliza funções de valor para explicar a aversão e a propensão ao risco na tomada de decisão (RANGEL; GOMES, 2007); prospecto deve ser entendido como um jogo, no qual o decisor prefere ganhar menos, diante do risco de perder, ou, correr o risco de ganhar, na certeza de perder (CLEMEN; REILLY, 2001).

A Escola Européia tem origem na Escola Francesa, na qual pesquisadores franceses desenvolveram o primeiro método a aplicar o conceito de sobreclassificação, denominado método ELECTRE (FÜLÖP, 2005). Os métodos desta escola também são conhecidos como métodos MCDA (*Multiple Criteria Decision Aiding*). A sobreclassificação consiste na comparação entre pares de alternativas, na qual se procura estabelecer relações, tais como “*uma alternativa x é pelo menos tão boa quanto uma alternativa y*”, nas quais se diz que “*x sobreclassifica y*” (ROY, 1996; FÜLÖP, 2005). Esse método, denominado *Outranking* (Sobreclassificação ou Categorização) tem como objetivo: ou classificar as alternativas em categorias, ou ordenar as alternativas, ou obter a melhor alternativa, segundo os níveis de preferência do decisor. São exemplos de métodos *Outranking*:

- ELECTRE (*Elimination and Choice Translating Reality*): método que produz índices de concordância e de discordância para determinar relações de dominância entre as alternativas e categorizá-las (FÜLÖP, 2005);
- PROMETHEE (*Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation*): método que utiliza índices de preferência para determinar a intensidade global de preferência entre as alternativas, com o objetivo de se obter uma categorização parcial ou completa (FÜLÖP, 2005);
- TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*): consiste no método de ordenação de preferência por similaridade, baseado no princípio de que a melhor alternativa é aquela em que está mais próxima de uma solução ideal e mais distante de uma solução não desejada, segundo um coeficiente de similaridade, que mede a semelhança entre as alternativas (BRITES, 2008);
- MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical based Evaluation Technique*): é um método que agrega conceitos da escola americana e francesa (SALOMON, 2004), no qual modelos de problemas de programação linear são utilizados para descrever o grau de preferência das alternativas.

Considerando problemas de tomada de decisão com m critérios e p alternativas, representados pelos conjuntos de critérios $C = \{c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_m\}$ e de alternativas $\mathcal{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_p\}$, os métodos multicritério, basicamente, utilizam uma matriz de decisão com a disposição dos seus elementos mostrada na figura 5:

		ax_1	\dots	ax_j	\dots	ax_p
		a_1	\dots	a_j	\dots	a_p
w_1	C_1	$z_{1,1}$	\dots	$z_{1,j}$	\dots	$z_{1,p}$
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
w_i	C_i	$z_{i,1}$	\dots	$z_{i,j}$	\dots	$z_{i,p}$
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
w_m	C_m	$z_{m,1}$	\dots	$z_{m,j}$	\dots	$z_{m,p}$

Figura 5 – Matriz de decisão (Fülöp 2005)

Para a obtenção dessa matriz, de acordo com FÜLÖP (2005), primeiramente, os métodos multicritério exigem a atribuição de pesos a cada um dos critérios do problema. A seqüência de valores representada pelo vetor $w = (w_1, \dots, w_i, \dots, w_m)^T$,

indicam os pesos w_i atribuídos a cada um dos critérios c_i , segundo o julgamento do decisor. As funções para determinar os valores desses pesos variam de método para método, e devem refletir a importância relativa dos critérios no problema de decisão.

Em seguida, para cada alternativa é feita uma pontuação $z_{i,j}$ para descrever o desempenho da alternativa a_j em relação a cada critério c_i . A partir da matriz de pontuações $Z = (z_{i,j})_{m \times p}^T$ e do vetor w , cada método associará valores globais para cada uma das alternativas, que são avaliadas para a tomada da decisão.

Os valores globais formam o vetor $ax = (ax_1, \dots, ax_j, \dots, ax_p)^T$, no qual cada ax_j é associado à correspondente alternativa a_j , determinados pelo método multicritério de acordo com a classe a que pertencem.

Métodos pertencentes à classe baseada na Teoria da Utilidade Multiatributo utilizam funções de utilidade para agregar os pesos w_i dos critérios às pontuações $z_{i,j}$, para determinar os valores de utilidade ax_j que indicam o desempenho de cada alternativa a_j . Geralmente, o valor de utilidade mais alto leva a um desempenho melhor da alternativa correspondente (KEENEY; RAIFFA, 1976), o que pode apontar para uma solução do problema ou alternativa de ação.

Para os métodos da classe *Outranking*, os valores w_i e $z_{i,j}$ são usados para determinar a categorização de cada alternativa a_j . O conceito de categorização foi proposto por (ROY, 1968 *apud* FÜLÖP, 2005), e consiste em determinar: a preferência de uma alternativa a_i em relação à alternativa a_j , ou o nível de concordância, ou discordância, de uma em relação à outra, levando-se em conta os critérios do problema. Ao contrário dos métodos que usam funções de utilidade que indicam a melhor alternativa, os de categorização determinam um subconjunto de alternativas viáveis, reduzindo o conjunto inicial de alternativas, ou recomendando possíveis ações a serem tomadas.

Cabe observar aqui que, num processo de tomada de decisão, segundo Keeney e Raifa (1976), o decisor quando está diante de duas alternativas, por exemplo entre a_i e a_j , suas preferências de escolha envolvem relações binárias. Assim, em seguida, são apresentadas as propriedades de uma relação binária geral, que permitem uma melhor compreensão das preferências de escolha.

3.5.1 Preferências de escolha

Seja \mathcal{H} um conjunto e $\mathbf{R} \subseteq \mathcal{H} \times \mathcal{H}$ uma relação binária em \mathcal{H} . Em Lewis e Papadimitriou (1998), uma relação $\mathbf{R} \subseteq \mathcal{H} \times \mathcal{H}$ é dita:

- reflexiva, se $(h, h) \in \mathbf{R}$ para todo $h \in \mathcal{H}$;
- irreflexiva, se $(h, h) \notin \mathbf{R}$ para todo $h \in \mathcal{H}$;
- simétrica, se $(g, h) \in \mathbf{R}$, para $g, h \in \mathcal{H}$, sempre $(h, g) \in \mathbf{R}$;
- anti-simétrica, se $(g, h) \in \mathbf{R}$, $g \neq h$, então $(h, g) \notin \mathbf{R}$; que também pode ser compreendido por: se $(g, h) \in \mathbf{R}$ e $(h, g) \in \mathbf{R}$, então $g = h$;
- transitiva, se $(g, h) \in \mathbf{R}$ e $(h, i) \in \mathbf{R}$, então $(g, i) \in \mathbf{R}$, para $g, h, i \in \mathcal{H}$.

Um elemento de uma relação $(g, h) \in \mathbf{R}$ também é denotado por $g\mathbf{R}h$.

Deste modo, num processo de tomada de decisão, as preferências de escolha do decisor envolvem as seguintes expressões, onde \mathbf{P} denota a relação de preferência e \mathbf{I} a relação de indiferença entre duas alternativas (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004). Supondo-se que as alternativas sejam A_i , A_j e A_k , tem-se:

- o decisor prefere A_i a A_j ($A_i\mathbf{P}A_j$);
- para o decisor as alternativas A_i e A_j são indiferentes ($A_i\mathbf{I}A_j$);
- as expressões anteriores garantem, em geral, a transitividade da preferência, uma vez que se A_i é preferível a A_j e A_j é preferível a A_k , então A_i é preferível

a A_k ($A_i \mathbf{P} A_j$ e $A_j \mathbf{P} A_k \rightarrow A_i \mathbf{P} A_k$); esta é uma regra de inferência que garante a transitividade;

- também garantem a transitividade da indiferença, em que se A_i é indiferente a A_j e A_j é indiferente a A_k , então A_i é indiferente a A_k ($A_i \mathbf{I} A_j$ e $A_j \mathbf{I} A_k \rightarrow A_i \mathbf{I} A_k$);
- as expressões indicam a assimetria da preferência, pois se A_i é preferível a A_j , significa que A_j não pode ser preferível a A_i ($A_i \mathbf{P} A_j \nrightarrow A_j \mathbf{P} A_i$);
- para a indiferença, a simetria é garantida, pois se uma alternativa A_i é indiferente à outra A_j , a recíproca é verdadeira ($A_i \mathbf{I} A_j \rightarrow A_j \mathbf{I} A_i$);

As preferências do decisor que obedecem às expressões anteriores e uma função de utilidade $\mathbf{U}(A_i)$ que associe valores reais positivos de utilidade para as alternativas, apresentam as seguintes propriedades:

- se $A_i \mathbf{P} A_j$, então $\mathbf{U}(A_i) > \mathbf{U}(A_j)$, o que significa que a utilidade da alternativa A_i é maior do que a utilidade de A_j ;
- se $A_i \mathbf{I} A_j$, então $\mathbf{U}(A_i) = \mathbf{U}(A_j)$, os valores de utilidade das duas alternativas são equivalentes.

Os métodos multicritério MAUT, portanto, utilizam um sistema de valorização, simulando, por meio de funções de utilidade, a utilidade de cada possível alternativa, tendo como base as relações de preferência (**P** e **I**), de comparabilidade completa e transitiva (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004).

Já os métodos multicritério da família dos métodos *Outranking* apresentam um modelo de preferências diferente ao do MAUT. Neles são adotadas as preferências estrita (**E**), fraca (**F**), indiferença (**G**) e incomparabilidade (**S**), para que o decisor expresse sua preferência com outras possibilidades quando não dispõe de informações mais precisas ou completas sobre as alternativas do problema (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004). O sistema de preferências dos métodos *Outranking* segue as expressões:

- preferência estrita (**E**): as informações justificam a preferência de uma alternativa em relação à outra; $A_i \mathbf{E} A_j$ significa que A_i tem preferência forte em

relação à A_j ; é uma relação binária transitiva, assimétrica e irreflexiva, que caracteriza uma ordem parcial;

- preferência fraca (**F**): não há informações suficientes que justifiquem a preferência de uma alternativa em relação à outra, porém também não é indiferente às alternativas; $A_i \mathbf{F} A_j$ denota que A_i tem preferência fraca em relação à A_j ; é uma relação binária assimétrica, não transitiva e irreflexiva;
- indiferença (**G**): as informações disponíveis indicam que as alternativas são equivalentes; $A_i \mathbf{G} A_j$ significa que A_i e A_j são igualmente preferidas; é uma relação binária simétrica, transitiva e reflexiva, portanto, uma relação de equivalência;
- incomparabilidade (**S**): o decisor não dispõe de informações suficientes para definir qualquer tipo de relação de preferência; $A_i \mathbf{S} A_j$ indica que não há possibilidade de comparar o nível de preferência entre as alternativas; é uma relação binária simétrica, não transitiva e irreflexiva.

Fundamentalmente, os métodos de *Outranking* propõem selecionar, do conjunto total de alternativas, aquelas que são preferidas na maioria dos critérios. Desta forma, com base nas relações de ordem e equivalência, os métodos de *Outranking* podem selecionar o melhor conjunto de alternativas ou a melhor alternativa para a resolução do problema de decisão (FÜLÖP, 2005).

Esses métodos empregam índices de concordância e discordância para estabelecer uma ordem completa entre as alternativas. O índice de concordância, denotado como $CC(A_i, A_j)$, é uma medida ponderada dos critérios para os quais a alternativa A_i é preferida da A_j . Complementarmente, o índice de discordância $DC(A_i, A_j)$ mede quanto a escolha de A_i é prejudicial em relação A_j . Por exemplo, se a alternativa A_i é melhor que A_j em alguns dos critérios de avaliação e não pior que A_j em todos os demais, A_j pode ser eliminada, e nesse caso, pode-se dizer que A_j é dominada por A_i , pois possui desvantagens e nenhuma vantagem (HAMMOND; KEENEY; RAIFFA, 2002).

Desta maneira, o índice de concordância $CC(A_i, A_j)$ representa a proporção de peso para que a alternativa A_i seja preferível a A_j , indicando que A_i excede a classificação de A_j e que grande parte dos critérios de A_i desempenha-se, no mínimo, tão bem quanto os critérios de A_j . O índice de discordância $DC(A_i, A_j)$ mede a desvantagem relativa entre as duas alternativas A_i e A_j , indicando que apesar de um pior desempenho ainda são aceitáveis. Após determinar para cada par de alternativas, se uma excede a classificação de outra, essas avaliações são combinadas para uma classificação parcial ou completa. O objetivo do método é reduzir o número de alternativas para um subconjunto menor e melhor de alternativas, excluindo aquelas que não atendem os níveis de concordância (FÜLÖP, 2005).

Neste trabalho, não se propõe um estudo exaustivo e detalhado dos métodos multicritério, por isso, foi escolhido o método AHP, para ilustrar a aplicação da Tabela de Decisão Adaptativa, em processos de tomada de decisão multicritério.

A seguir, são apresentadas características do método AHP, que foi escolhido por representar um dos métodos mais pesquisados e utilizados nas empresas (ZUFFO, 1998; GOMES; MOREIRA, 1998; BERTOLI; BRAGLIA; CARMIGNANI, 2006). A importância do método AHP no apoio à tomada de decisão multicritério nas organizações, também é destacada, e justifica a sua escolha para esta tese. Os inúmeros trabalhos citados em artigo de Saaty (2008) mostram a sua importância. São exemplos de trabalhos:

- uso do AHP pela Comissão Reguladora Nuclear (NCR) dos Estados Unidos para alocar recursos de Tecnologia da Informação, reduzindo o tempo de decisão;
- o departamento de defesa dos Estados Unidos usa o AHP para apoiar a alocação de seus recursos nas suas diversas atividades;
- a Xerox Corporation e a IBM usaram o AHP para alocar recursos aos seus projetos de pesquisa, bem como no processo de avaliação dos projetos;
- diversas aplicações militares e políticas foram desenvolvidas com o auxílio do método AHP, como na análise da decisão de se criar, ou não, o NMD (National Missile Defence);

- AHP foi aplicado nos Estados Unidos em um conflito com a China, em questões de direitos de propriedade intelectual sobre música, vídeos, fitas e softwares copiados por chineses, envolvendo critérios sobre benefícios, custos e riscos.

Outros exemplos do uso do método AHP são encontrados no artigo do Saaty (2008), além da citação de inúmeros livros de autores diferentes que tratam sobre o processo.

3.5.2 Método AHP (Analytic Hierarchy Process)

O método AHP, em português Processo de Hierarquia Analítica, foi desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 70, para apoiar problemas de tomada de decisão com múltiplos critérios. Sua principal característica tem como base a decomposição hierárquica do problema, criando-se uma hierarquia de critérios (SAATY, 1991) e convertendo avaliações subjetivas de importância relativa em um conjunto de pontuações ou pesos gerais. A metodologia do modelo AHP consiste de três fases principais: estruturação do problema; julgamentos comparativos e análise das prioridades.

O método propõe ao decisor que o problema de decisão, primeiramente, seja estruturado ou decomposto em partes, representando as partes em níveis hierárquicos, para facilitar a sua compreensão e visualizar a sua estruturação através de um modelo formal. No nível mais alto da estrutura, no topo, é representado o objetivo da decisão, seguido pelos níveis de critérios e subcritérios, caso existam, e finalizando com o nível das alternativas, mostrando as relações entre os elementos, como ilustra a figura 6 de um problema de decisão com poucos níveis hierárquicos.

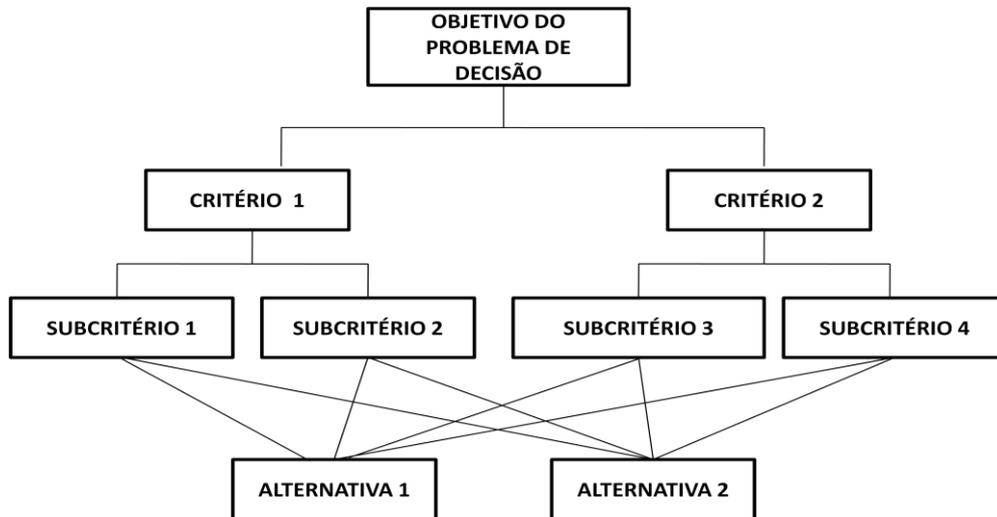


Figura 6 – Exemplo de hierarquia de um problema de decisão

Em seguida, são feitos os julgamentos comparativos entre os critérios, aos pares, dentro de cada nível. Segundo Saaty (1994), o decisor deve julgar de acordo com a intensidade de importância de cada critério c_i em relação a outro c_j , numa escala de valores definida pelo autor, gerando uma matriz de julgamentos (figura 7).

	c_1	...	c_i	c_j	...	c_m
c_1
...
c_i	$E_{i,i}$	$E_{i,j}$	...	...
c_j	$E_{j,i}$	$E_{j,j}$	...	...
...
c_m

Figura 7 – Matriz E de julgamentos aos pares entre os critérios

Para m critérios de um nível, são necessárias $m(m-1)/2$ comparações. A escala de julgamentos proposta por Saaty expressa a intensidade da preferência do decisor por um critério em relação a outro, conforme segue (tabela 10):

escala	significado
1	importância ou preferência igual: os critérios são igualmente importantes
3	importância ou preferência moderada por um em relação ao outro: um critério é um pouco mais importante que outro
5	importância ou preferência forte ou essencial: o julgamento favorece fortemente um critério em relação ao outro
7	importância ou preferência muito forte ou demonstrada: um critério é muito fortemente importante em relação ao outro
9	extrema importância ou preferência: um critério é extremamente preferível a outro
2, 4, 6, 8	valores usados em julgamentos intermediários

Tabela 10 – Escala Fundamental de Saaty (Fonte: Saaty, 1991)

A escala, denominada Escala Fundamental de Saaty, imposta pelo método possibilita traduzir em valores quantitativos as preferências do decisor, que normalmente são expressas de modo verbal quando usa adjetivos, e podem ser revistos quando os resultados apresentam algum conflito entre as preferências.

Na matriz da figura 7, denota-se por $E_{i,j}$ o valor de julgamento do decisor, de acordo com a escala de Saaty, obtido comparando-se o critério c_i com o critério c_j , então o recíproco do valor $1/E_{i,j}$ é estabelecido na comparação de c_j com c_i . Na comparação do critério c_i com ele mesmo, o julgamento de valor igual a 1 deve ser atribuído. Desta forma:

$$E_{i,j} = \text{valor de comparação entre } c_i \text{ e } c_j$$

$$E_{j,i} = \frac{1}{E_{i,j}} \text{ valor de comparação entre } c_j \text{ e } c_i \quad \text{e} \quad E_{i,i} = 1$$

A partir dessa matriz, os seus valores são normalizados, resultando no vetor w de importâncias relativas de cada critério. Antes de continuar com o processo, Saaty (1994) observa que é necessário verificar se os julgamentos são consistentes e aceitáveis, e para isso criou uma grandeza denominada razão de consistência (CR),

cujo valor de aceitação é de até 0.10, ou seja, de 10%. Se o valor CR ultrapassar o limite de aceitação, o decisor deve rever os seus julgamentos para que o índice seja reduzido (item 3.5.3).

Com procedimentos de julgamentos semelhantes aos critérios, as preferências pelas alternativas de \mathcal{A} em relação a cada critério de C devem ser estabelecidas (figura 8):

	c_1	c_2	...	c_j	...	c_m
a_1						
...						
a_i				$z_{i,j}$		
...						
a_p						

Figura 8 – Matriz Z de desempenho das alternativas em relação aos critérios

Com isso, é possível agregar as importâncias relativas dos critérios w_i e os níveis de preferência $z_{i,j}$ de cada alternativa em relação a cada critério, para obter o valor global ax_j de cada alternativa:

$$ax = Z \cdot w$$

A avaliação dos resultados vai determinar a alternativa com maior prioridade e recomendá-la como a melhor escolha.

3.5.3 Consistência dos julgamentos

A razão de consistência CR é melhor compreendida a partir da álgebra matricial (SAATY, 1991). Denotando-se por $E = (E_{i,j})_{m \times m}$ a matriz de julgamentos de c_i com c_j , o vetor w das importâncias normalizadas de cada critério, tem-se a expressão (1), onde w é definido como um autovetor de E e m como autovalor:

$$E \cdot w = m \cdot w \quad (1)$$

De acordo com Nicholson (2006), se $\lambda_1, \dots, \lambda_m$, números reais ou complexos, satisfazem a expressão (1), são definidos como autovalores de E , e se $E_{i,i} = 1$ para todo i , logo, a expressão (2) é válida:

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i = m \quad (2)$$

Portanto, se (1) é válida, então, todos os autovalores são zero, exceto um, que é m . Logo, no caso consistente, m será o maior autovalor de E ($\lambda_{max} = m$).

Outro resultado importante assume que se os elementos $E_{i,j}$ de uma matriz recíproca positiva E variarem em pequenos valores, então os autovalores também variarão por pequenas quantidades.

Combinando-se os dois resultados e considerando que os valores da diagonal principal $E_{i,i} = 1$ da matriz E , e se E for consistente, pequenas variações de $E_{i,j}$ manterão o autovalor λ_{max} próximo de m , e os autovalores restantes próximos de zero. O pequeno desvio de λ_m a partir de m é uma medida de consistência. Denotando por CI o índice de consistência, tem-se a expressão (3):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1} \quad (3)$$

Por outro lado, Saaty (1991) gerou uma tabela de índices que mede a consistência de matrizes recíprocas geradas aleatoriamente, baseadas na escala de 1 a 9, com recíprocas forçadas, para matrizes de ordem 1 até 15. Os índices encontrados na pesquisa, denominados índice de consistência aleatório ou randômico (ICR), são usados para determinar a razão de consistência CR , que determina a aceitação dos julgamentos do decisor (4):

$$CR = \frac{CI}{ICR} \quad (4)$$

Os valores dos índices *ICR* são apresentados na tabela 11:

<i>m</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>ICR</i>	---	---	0,58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Tabela 11 - Tabela de índices de consistência randômico (Fonte: Saaty, 1991)

Saaty (1991) observa que para matrizes de ordem menor que 3, os julgamentos são sempre consistentes, portanto, não há necessidade de apurar *CR*.

Segundo Saaty (2001), o número de critérios não deve superar a 7, por representar um bom limite prático, pelo menos em relação à consistência. Saaty parte, também, do pressuposto de que para quantidades superiores, os julgamentos tendem a se tornar inconsistentes pelas dificuldades de análise do próprio decisor.

A seguir, é apresentado um exemplo elementar de tomada de decisão baseado no método AHP.

3.5.4 Exemplo de aplicação do AHP

Para ilustrar o método AHP, considere uma empresa que inicie um processo de homologação de fornecedores de um determinado produto. Ela precisa decidir qual fornecedor A ou B deve escolher, tendo como critérios a qualidade dos serviços, a flexibilidade para a entrega dos produtos e a distância do fornecedor em relação à empresa.

Os elementos deste problema de decisão são descritos a seguir:

- objetivo do problema: selecionar um fornecedor para um produto específico;
- critérios:
 - C1: Qualidade dos serviços
 - C2: Flexibilidade na entrega

- C3: Distância
- alternativas de escolha:
 - A1: Fornecedor A
 - A2: Fornecedor B

Aplicando o método AHP, os níveis hierárquicos do problema são apresentados na figura 9:

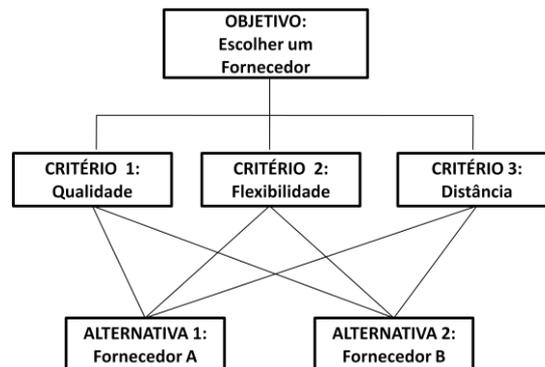


Figura 9 – Hierarquia do problema de decisão

A partir da definição do problema e supondo que o decisor julgue os critérios para a obtenção das importâncias relativas de cada um, a matriz de julgamento é mostrada na figura 10:

		C1	C2	C3
Qualidade	C1	1	4	3
Flexibilidade	C2	1/4	1	2
Distância	C3	1/3	1/2	1

Figura 10 – Matriz de julgamento

Após a normalização dos valores de julgamento, o vetor de pesos dos critérios é determinado: $w = (0.62, 0.23, 0.15)^T$, indicando as prioridades relativas de C_1 , C_2 e C_3 , respectivamente.

A verificação de consistência resulta em $\lambda_{max} = 3.11$, $CI = 0.05$ e $CR = 0.094$ que está dentro dos valores de aceitação ($CR < 0.10$).

Os valores de preferência das alternativas em relação aos critérios são consolidados e apresentados na matriz de desempenho (figura 11):

		C1	C2	C3
Fornecedor A	A1	0,89	0,86	0,8
Fornecedor B	A2	0,11	0,14	0,2

Figura 11 – Matriz de desempenho

Os valores globais das alternativas resultaram em $ax_1 = 0.87$ para A_1 e $ax_2 = 0.13$ para A_2 , indicando que a melhor decisão é contratar o Fornecedor A.

Os estudos sobre os sistemas de apoio a decisão, sobre os métodos multicritério apresentados neste capítulo e a formalização das Tabelas de Decisão Adaptativas (cap. 2), são elementos fundamentais para apresentar a extensão da Tabela de Decisão Adaptativa para apoiar processos de tomada de decisão que envolvem múltiplos critérios.

4 EXTENSÃO DA *TDA* PARA APOIAR DECISÕES MULTICRITÉRIO

A Tabela de Decisão Adaptativa (*TDA*), apresentada no Capítulo 2, é um dispositivo adaptativo dirigido por regras composto por uma tabela de decisão convencional subjacente. As regras de um processo na *TDA* são memorizadas e modificadas com a ajuda de um conjunto de funções adaptativas, responsáveis por sua automodificação, de forma independente, apresentando novas informações e novos resultados para o processo em execução.

Pela ampla aplicabilidade da *TDA*, neste capítulo é formalizada e descrita uma extensão da *TDA* que atua como elemento central de um procedimento de tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios, considerados simultaneamente. Esta formulação será denominada, neste texto, Tabela de Decisão Adaptativa Estendida (*TDAE*). Outro assunto tratado neste capítulo se refere ao estudo de exigência de espaço de memória e de tempo para a execução do algoritmo de tomada de decisão, que utiliza técnicas adaptativas.

A *TDAE* tem como objetivo apoiar por meio de uma formulação expressiva, processos decisórios de problemas semi-estruturados (ver cap. 3), com a aplicação de métodos multicritério, possibilitando ao decisor analisar o conjunto de regras, interagir com o sistema e assim obter soluções viáveis para os problemas. A *TDAE* dispõe de um conjunto de técnicas projetadas com o objetivo de suportar processos decisórios, tais como:

- permitir a modelagem de problemas de decisão semi-estruturados;
- permitir uma melhor compreensão do problema;
- proporcionar ao decisor condições para expressar seus julgamentos a cerca das informações do problema de decisão;
- permitir analisar os critérios impostos às regras do problema e suas combinações, além de apresentar alternativas de solução para situações não previstas anteriormente;
- incorporar algoritmos clássicos de métodos multicritério;

- usar técnicas adaptativas para que o sistema se automodifique, tanto na sua estrutura, como no seu comportamento, de forma autônoma, e gere respostas para o processo de tomada de decisão.

4.1 FORMULAÇÃO DA *TDÆ*

Tendo como base o formalismo geral da *TDA* definido no Capítulo 2 desta tese, a seguir é descrita a *TDÆ*, visando suportar aplicações de tomada de decisão multicritério. Trata-se de uma extensão do formalismo geral, e sua estrutura é mostrada na figura 12, na qual são apresentados seus elementos e sua organização.

		AÇÕES ADAPTATIVAS				REGRAS					
		...	\mathcal{AD}_s	...	r_1	...	r_j	...	r_n	E	
TABELA DE DECISÃO CONVENCIONAL	CRITÉRIOS	c_1 c_2 · c_i · c_m					Valores dos critérios $\hat{a}_{i,j}$				
	ALTERNATIVAS	a_1 a_2 · a_k · a_p					Ações a serem aplicadas $x_{k,j}$				
Conjunto de funções auxiliares	FUNÇÕES	FM_1					Funções auxiliares a serem chamadas				
		...									
CAMADA ADAPTATIVA	FUNÇÕES ADAPTATIVAS	FAD_1 FAD_2 ·					Ações adaptativas a serem executadas				
		FAD_s					Referências a FAD_s				
		· · FAD_{nf}									



 conjunto de ações adaptativas elementares que compõem FAD_s

Figura 12 – Estrutura geral da *TDÆ* para aplicações de decisões multicritério

Uma $TDAE$ que apóia processos de decisão multicritério pode ser definida formalmente com o emprego da tripla: $TDAE = (TDA, FM, M)$, onde TDA é a Tabela de Decisão Adaptativa clássica (ver cap. 2), FM é um conjunto de funções auxiliares que estabelece uma comunicação entre a camada adaptativa e o restante da tabela e M é o método multicritério a ser aplicado para um particular problema de decisão. O elemento M foi especificado para que a $TDAE$ resulte genérica, permitindo que a sua operação siga qualquer método multicritério definido pelo decisor.

Deve-se observar que, nesta formulação, M não está em evidência na estrutura, pois o método multicritério permeia e atua nos critérios, nas alternativas, nas funções auxiliares e nas ações adaptativas. O ideal seria que M fosse implementado pelo usuário, que utilizaria para isso alguma linguagem específica, que seria compilada automaticamente para a forma de critérios, alternativas e ações adaptativas.

Na extensão da $TDAE$ define-se o conjunto das funções auxiliares FM que, embora pudessem ser implementadas como funções adaptativas, devido à sua complexidade, exigiriam um repertório mais amplo de operações primitivas que as oferecidas no formalismo disponível na $TDAE$. Essas funções operam como uma interface entre a camada adaptativa e o restante da tabela, efetuando operações que seriam demasiadamente extensas se expressas na forma de funções adaptativas convencionais. Isto confere a essas funções a capacidade de calcular e alterar valores utilizados para avaliação das condições que determinam a aplicação das regras.

Note-se que as funções em FM devem ser executadas antes da aplicação da regra que a referencia, porque o funcionamento da $TDAE$ depende dos valores calculados por elas. A implementação das funções do conjunto FM , a exemplo do que acontece com as alternativas da tabela de decisão subjacente, é definida externamente e sua operação não é explicitada na tabela. Por outro lado, a operação das chamadas dessas funções ocorre de maneira similar ao de uma

chamada de função adaptativa, exceto pelo fato de as funções em \mathcal{FM} devem ser executadas em primeiro lugar.

Na formulação da $\mathcal{TDAE} = (\mathcal{TDA}, \mathcal{FM}, \mathcal{M})$, \mathcal{TDA} segue o mesmo formalismo definido no Capítulo 2, item 2.2.3.8. É formada pela dupla $\mathcal{TDA} = (\mathcal{TDN}, \mathcal{CA})$, onde \mathcal{TDN} representa a tabela de decisão subjacente (não adaptativa) e \mathcal{CA} o mecanismo adaptativo, que devem ser instanciados de forma tal que implemente de fato os procedimentos pertinentes do método \mathcal{M} escolhido de decisão multicritério.

Admitindo que o conjunto de critérios do problema de decisão seja $C = \{c_i, 1 \leq i \leq m\}$ finito, a tabela subjacente \mathcal{TDN} é definida por $\mathcal{TDN} = (\mathcal{CT}, \mathcal{R}, \mathcal{CV}, t_0, \mathcal{AT}, \mathcal{A})$, onde:

- \mathcal{CT} é o conjunto de todas as configurações possíveis da tabela de decisão;
- \mathcal{R} é o conjunto finito de regras de decisão: $\mathcal{R} = \{r_j, 1 \leq j \leq n\}$;
- cada regra $r_j \in \mathcal{R}$ é formada por $r_j = (d_{i,j}, x_{k,j})$, onde:
 - $d_{i,j}$: representa um valor para o critério c_i na regra r_j , onde $c_i \in C$;
 - $x_{k,j}$: é um valor que sinaliza a alternativa a_k para a regra r_j ;
- \mathcal{CV} é o conjunto finito dos valores $d_{i,j}$ válidos dos critérios c_i ;
- $t_0 \in \mathcal{CT}$ é a configuração inicial da tabela de decisão;
- $\mathcal{AT} \subseteq \mathcal{CT}$ é o subconjunto de configurações aceitas da tabela;
- \mathcal{A} é o conjunto finito de alternativas do problema: $\mathcal{A} = \{a_k, 1 \leq k \leq p\}$.

Neste trabalho, para tabelas de decisão, configuração significa a imagem da tabela em cada instante, mostrando todos os critérios, as alternativas, as regras e as combinações válidas de condições contidas no conjunto de regras. Os valores $d_{i,j}$ e $x_{k,j}$, neste trabalho, serão sempre binários.

O mecanismo adaptativo \mathcal{CA} é associado ao conjunto de regras \mathcal{R} e é definido na \mathcal{TDAE} pela dupla $\mathcal{CA} = (\mathcal{FA}, \mathcal{RA})$, onde:

- \mathcal{FA} é o conjunto de funções adaptativas: $\mathcal{FA} = \{\mathcal{FAD}_s, 1 \leq s \leq nf\}$, na qual cada função adaptativa \mathcal{FAD} quando instanciada e chamada com os respectivos argumentos, executa as ações adaptativas que a compõe;
- \mathcal{RA} é o conjunto de regras composto pelas regras da tabela de decisão subjacente e pelas chamadas adaptativas.

A figura 13 destaca um trecho da tabela, no qual se encontra a organização de cada uma das nf funções adaptativas, que definem a forma de automodificação da \mathcal{TDAE} .

Cada função adaptativa pode ser expressa por uma ênupla, dada pela expressão geral: $\mathcal{FAD} = (NF, P, V, G, \mathcal{BA}, \mathcal{AD}, \mathcal{AA})$.

Os elementos das funções \mathcal{FAD} representam, respectivamente:

- NF : identificação da função;
- P : conjunto de np parâmetros $P = \{p_i, 1 \leq i \leq np\}$;
- V : conjunto de nv variáveis $V = \{v_i, 1 \leq i \leq nv\}$;
- G : conjunto de ng geradores $G = \{g_i, 1 \leq i \leq ng\}$;
- \mathcal{BA} : é uma indicação de ação adaptativa anterior (opcional); $\mathcal{BA} \in \mathcal{AD}$;
- \mathcal{AD} : representa o corpo da função adaptativa e é composto por um conjunto de ações adaptativas elementares de consulta, inclusão e exclusão que modificam o conjunto corrente de regras da tabela de decisão subjacente;
- \mathcal{AA} : é uma indicação de ação adaptativa posterior (opcional); $\mathcal{AA} \in \mathcal{AD}$.

O corpo \mathcal{AD} de cada função adaptativa \mathcal{FAD} pode ser definido por mais de uma ação adaptativa elementar. Considerando $\mathcal{AD} = (\mathcal{AC}, \mathcal{AE}, \mathcal{AI})$ tem-se:

- \mathcal{AC} : ações adaptativas elementares de consulta (?);
- \mathcal{AE} : ações adaptativas elementares de exclusão (-);
- \mathcal{AI} : ações adaptativas elementares de inclusão (+).

tag	H	\mathcal{AD}				regra	r_j
		?	-	+	...		
...					
...	.					.	.
	.					.	.
	.					.	.
\mathcal{FAD}	nome da função	NF					
	anterior ou posterior						BA/AA
							...
	parâmetros	p_i					p_i
							...
	variáveis	v_i					v_i
							...
	geradores	g_i					g_i
						...	
.	.					.	.
.	.					.	.
.	.					.	.

Figura 13 – Estrutura de cada função adaptativa \mathcal{FAD} na tabela

O número de ações adaptativas, de cada um dos conjuntos \mathcal{AC} , \mathcal{AE} e \mathcal{AI} , pode variar de acordo com a definição da função adaptativa, podendo inclusive ser zero (conjunto vazio).

As ações adaptativas de \mathcal{AD} são associadas às regras da tabela subjacente e agem sobre o conjunto de regras \mathcal{R} , executando ações adaptativas elementares \mathcal{AC} de consulta às regras da tabela, \mathcal{AI} de inclusão de novas regras e \mathcal{AE} de exclusão de regras existentes. Essas associações formam na camada adaptativa \mathcal{CA} , o conjunto de regras composto por $\mathcal{RA} = \{ra_j, 1 \leq j \leq n\}$, onde ra_j é definida por (BA, r_j, AA) , sendo:

- $BA \in \mathcal{AD}$: se houver, indica ação adaptativa a ser executada antes de r_j ;
- r_j regra da tabela de decisão subjacente associada à ação adaptativa;
- $AA \in \mathcal{AD}$: se houver, é ação adaptativa executada depois de r_j .

É importante observar que, até duas ações adaptativas (opcionais) podem ser associadas a cada regra r_j para formar ra_j . Na regra escolhida pode-se especificar uma ação adaptativa (\mathcal{BA}) a ser executada antes que r_j seja realizada, e outra ação adaptativa (\mathcal{AA}) para ser aplicada após a execução de r_j , de acordo com a definição da função adaptativa. Quando ra_j é idêntica a r_j , significa que a regra r_j da tabela subjacente não sofre influência de ações adaptativas.

Esse formalismo da \mathcal{TDAE} , portanto, possibilita que para cada função adaptativa \mathcal{FAD} seja associada uma lista de ações adaptativas elementares \mathcal{AD} , que indicam as modificações a serem impostas ao conjunto de regras, de acordo com o método \mathcal{M} adotado para o processo decisório de problemas de decisão específicos:

- ação adaptativa elementar de consulta: permite examinar o conjunto de regras do dispositivo para encontrar regras que satisfaçam os critérios impostos pelo processo;
- ação adaptativa elementar de exclusão¹¹: permite eliminar do conjunto de regras alguma regra redundante¹² ou conflitante¹³ para o processo;
- ação adaptativa elementar de inclusão: permite o acréscimo de uma nova regra ao conjunto de regras.

Cabe observar que as funções auxiliares em \mathcal{FM} são executadas para determinar valores que estejam ausentes na regra procurada, como por exemplo, resultados que indiquem quais alternativas devem ser adotadas para a regra procurada. Os valores determinados, portanto, são utilizados na regra, para uma ação adaptativa de inclusão.

Desta forma, considerando o formalismo da \mathcal{TDAE} , a sua aplicação apoiada no algoritmo de tomada de decisão pode ser vista sob dois aspectos:

¹¹ Essa ação adaptativa leva em conta como as tabelas de decisão tradicionais fazem.

¹² Regras redundantes são aquelas que contêm “S” e “N” no(s) mesmo(s) critério(s) e que levam às mesmas alternativas de ação, o que caracteriza a não necessidade da verificação do(s) critério(s) nas respectivas regras. Nesses casos, convencionou-se deixar em branco ou colocar um traço (-) na posição correspondente.

¹³ Regras conflitantes são aquelas que possuem o mesmo conjunto de critérios, porém cada regra conduz a um conjunto diferente de alternativas de ação, o que representa uma potencial contradição.

- no primeiro aspecto, a *TDÆ* faz o papel de decisor, onde a solução do problema de decisão é apresentada pelo próprio dispositivo, ao final do processo decisório;
- sob outro aspecto, a *TDÆ* pode ser utilizada como um instrumento para consulta de decisões parciais, deixando que a decisão final seja tomada pelo decisor ou pelo especialista do particular problema de decisão; nesse sentido, o algoritmo pode apresentar um conjunto de possíveis soluções viáveis para o problema, segundo o método multicritério adotado.

4.2 OPERAÇÃO DA *TDÆ*

A *TDÆ* pode ser vista como um dispositivo adaptativo que, no início de sua operação, apresenta uma configuração fixa, predeterminada. Na configuração inicial, o dispositivo opera como uma tabela de decisão convencional, efetuando as buscas das regras procuradas pelo processo decisório, seguindo o método \mathcal{M} definido pelo especialista.

Essa tabela de decisão inicial é considerada como um conjunto de regras, que representam o conhecimento inicial contido na tabela de decisão, definido por um especialista do assunto. A partir dela, por meio do algoritmo de decisão, o sistema adaptativo deduz respostas a situações não previstas no início do processo, gerando outra configuração da tabela, incluindo a nova informação adquirida.

Os elementos da tabela de decisão inicial, critérios e alternativas, são submetidos ao método multicritério adotado, para julgamento e obtenção dos seus pesos e preferências. Esses valores são usados em funções de utilidade associadas às regras, gerando uma solução ou categorizando as regras iniciais, conforme o método escolhido.

Deve-se observar que os pesos dos critérios e as preferências das alternativas (ver cap. 3) também são usados pelas funções auxiliares de FM para determinar situações ainda não consideradas na tabela de decisão adaptativa.

Numa situação em que o decisor necessite procurar, na tabela de decisão adaptativa, regras que satisfaçam critérios específicos, é possível que ocorra, por exemplo, as seguintes situações:

- uma regra é encontrada no conjunto de regras, cujos valores dos critérios sejam coincidentes aos procurados; essa regra mostra como solução as alternativas de decisão correspondentes;
- quando a regra não é encontrada, uma função adaptativa é associada à regra especificada, e ações adaptativas são executadas; essas ações adaptativas são responsáveis pela alteração da estrutura da tabela de decisão adaptativa, modificando sua configuração.

A partir da configuração assim atingida, a $TDAE$ pode ser utilizada novamente para outras consultas.

É importante ressaltar que, devido à maneira como foram definidas as ações efetuadas pela $TDAE$ nos casos de não-determinismos, conflitos e redundâncias, a busca de regras é sempre determinística, não ocorrendo, portanto, situações de não-determinismo. Durante a execução, a $TDAE$ procura eliminar regras redundantes ou conflitantes, como por exemplo, regras que possuem os mesmos valores para todos os critérios, mas apresentam alternativas de solução diferentes.

No próximo item deste capítulo, é apresentado um algoritmo de tomada de decisão multicritério, que expressa a operação da $TDAE$. No entanto, cabe observar que, para se alcançar bons resultados na tomada de decisão, é importante que o decisor considere as etapas de análise do problema, que compreende todo o processo decisório multicritério:

- definir o problema: é necessário identificar e compreender claramente o problema de tomada de decisão;

- estabelecer os objetivos do problema: identificar quais são as finalidades ou soluções que devem ser alcançadas na resolução do problema de decisão;
- definir os critérios do problema: relacionar os fatores que influenciam as alternativas de solução do problema;
- levantar os requisitos de cada critério, para que as condições indiquem possíveis soluções que possam atender aos objetivos do problema;
- identificar as alternativas do problema: listar uma relação de possibilidades de solução, pois diferentes abordagens das condições podem alterar o conjunto de soluções viáveis;
- avaliar as alternativas em relação aos critérios, verificando se as regras especificadas atendem às necessidades do problema;
- escolher a ferramenta mais adequada para solucionar o problema, baseado nos objetivos e nos dados coletados, levando-se em consideração que a ferramenta tenha a capacidade de apresentar soluções alternativas para situações não previstas na análise;
- analisar e validar as soluções alcançadas pela ferramenta em relação aos objetivos e requisitos do problema de decisão.

4.3 ALGORITMO DE TOMADA DE DECISÃO DA *TDAE*

Neste item, é feita a descrição do algoritmo adotado para a tomada de decisão da *TDAE*, que é composto por três módulos principais:

- Módulo I – permite que o decisor defina a tabela de decisão subjacente, na qual são inseridos os critérios, as alternativas e as regras do problema de decisão, bem como o método multicritério adotado;
- Módulo II – cria a matriz de decisão, cujos valores representam os pesos e as preferências relativas dos critérios e das alternativas, em decorrência dos julgamentos do decisor;
- Módulo III – montagem da camada adaptativa e uso da *TDAE* para consultas.

Nos itens seguintes são apresentados os principais passos de cada módulo do algoritmo de tomada de decisão. O detalhamento de cada passo é descrito no item 4.4, acompanhado do estudo de espaço e tempo do algoritmo.

4.3.1 Passos principais do Módulo I da *TDAE*

A partir da identificação de um problema de decisão semi-estruturado, o decisor deve criar um modelo que sintetize e represente adequadamente as informações colhidas na análise prévia do problema.

O modelo pode ser representado numa tabela de decisão convencional, para atender as características padrão da metodologia de tomada de decisão de múltiplos critérios, onde cada uma das linhas se refere a um critério, e cada uma das colunas, às regras que estabelecem as alternativas a serem executadas para as diversas combinações possíveis de valores assumidos pelos critérios.

Considerando um problema de decisão com m critérios, p alternativas e n regras, a configuração inicial t_0 da tabela de decisão assume o formato mostrado na figura 14, onde o decisor deve preencher os valores $d_{i,j}$ de cada critério c_i na regra r_j , bem como assinalar as alternativas $x_{k,j}$ de ação para cada combinação dos critérios.

O modelo da *TDAE* deve ter como entrada dos valores $d_{i,j}$ limitados aos valores binários “S” ou “N”, representando a influência ou não, respectivamente, do critério c_i na regra r_j . Deve-se observar também que, caso uma alternativa a_k tenha que ser executada na regra r_j , o símbolo utilizado é a letra “X” para $x_{k,j}$, e nenhum símbolo deve ser usado no caso em que a alternativa não seja escolhida para aquela regra.

	Regras					
	r_1	r_2	...	r_j	...	r_n
Critério c_1						
Critério c_2						
...						
Critério c_i				$d_{i,j}$		
...						
Critério c_m						
Alternativa a_1						
Alternativa a_2						
...						
Alternativa a_k				$x_{k,j}$		
...						
Alternativa a_p						

Figura 14 – Tabela de decisão convencional

A partir da tabela de decisão, o processo decisório, apoiado pela *TDAE*, executa o algoritmo de tomada de decisão baseado em procedimentos de métodos multicritério e nas técnicas adaptativas. Deve-se observar que este algoritmo é geral, podendo suportar o método multicritério \mathcal{M} escolhido pelo decisor, conforme a formulação proposta para a *TDAE*.

O módulo I pode ser representado pela função *ATDA* ($C, \mathcal{A}, \mathcal{R}, \mathcal{M}$), cujos parâmetros devem ser interpretados de acordo com a definição no item 4.1. O algoritmo desta função é composto pelos seguintes passos principais.

Passo I.1: Inserção do conjunto C de m critérios.

Passo I.2: Inserção do conjunto \mathcal{A} de p alternativas.

Passo I.3: Inserção do conjunto \mathcal{R} de n regras iniciais.

Passo I.4: Inserção do valor de \mathcal{M} , indicando o método multicritério de decisão do caso particular de tomada de decisão.

Passo I.5: Retorno da função com a configuração inicial t_0 da *TDAE* criada.

4.3.2 Passos principais do Módulo II da *TDAE*

Os métodos multicritério, basicamente, utilizam, no início do processo decisório, a mesma matriz de decisão, mostrada na figura 5 do Capítulo 3, item 3.5. Aqui, a matriz de decisão (figura 15) é apresentada com os seus elementos detalhados:

- $w = (w_1, \dots, w_i, \dots, w_m)^T$ é o vetor dos pesos dos critérios;
- $ax = (ax_1, \dots, ax_j, \dots, ax_p)^T$ é o vetor dos valores globais das alternativas;
- $Z = (z_{i,j})^T_{m \times p}$ é a matriz de pontuações, que descreve o desempenho da alternativa a_j em relação a cada critério c_i .

Este módulo, portanto, tem por objetivo permitir que o decisor faça as comparações entre os critérios, aos pares, sobre as quais são aplicados os procedimentos de julgamento dos métodos multicritério e determinação dos pesos de cada critério. Em consequência, é possível ordenar os critérios de acordo com a sua importância relativa.

		ax_1	\dots	ax_j	\dots	ax_p
		a_1	\dots	a_j	\dots	a_p
w_1	c_1	$z_{1,1}$	\dots	$z_{1,j}$	\dots	$z_{1,p}$
	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
w_i	c_i	$z_{i,1}$	\dots	$z_{i,j}$	\dots	$z_{i,p}$
	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
w_m	c_m	$z_{m,1}$	\dots	$z_{m,j}$	\dots	$z_{m,p}$

Figura 15 – Matriz de decisão

Também neste módulo, é obtida a matriz de desempenho das alternativas em relação aos critérios. Essa matriz é resultado de julgamentos de preferência do decisor na comparação das alternativas, também aos pares, tendo como referência cada critério. Dessa matriz, os valores de preferência são consolidados, para determinação dos valores globais de cada alternativa.

Em ambas as situações de julgamento, tanto dos critérios comparados entre si, quanto das alternativas comparadas relativamente aos critérios, o algoritmo verifica a consistência dos julgamentos. No caso em que os julgamentos se mostrarem inconsistentes, o decisor deve revê-los.

Após a confirmação da consistência dos julgamentos, os pesos dos critérios e os valores globais das alternativas são submetidos ao método multicritério adotado pelo decisor para determinar a melhor solução ou conjunto de soluções viáveis do problema.

O módulo II pode ser representado pela função $BTDA(C, A, R, M, w, Z, ax)$, cujos parâmetros foram definidos anteriormente. Os principais passos que compõem a função são descritos a seguir.

Passo II.1: Inserção dos julgamentos do decisor para criação da matriz $E_{m \times m}$ de comparação entre os critérios.

Passo II.2: Normalização dos valores de julgamento dos critérios, para obtenção do vetor w dos pesos ou das importâncias relativas de cada critério.

Passo II.3: Verificação da consistência dos julgamentos dos critérios.

Passo II.4: Criação da matriz Z de desempenho de cada alternativa em relação ao conjunto de critérios.

Passo II.5: Determinação do vetor ax de valores globais ou de importância relativa das alternativas.

Passo II.6: Ordenação do vetor ax , da alternativa de maior importância para a de menor importância.

Passo II.7: Ordenação das regras da tabela de decisão, com o objetivo de mostrar as regras que apresentem melhores possibilidades de solução.

4.3.3 Passos principais do Módulo III da *TDAE*

Este módulo está dividido em duas fases distintas, a primeira corresponde à montagem da camada adaptativa da *TDAE*, e a segunda à utilização da *TDAE*.

Fase 1 – Montagem da camada adaptativa da *TDAE*

Passo III.1: Definição da camada adaptativa da *TDAE*.

Neste passo, a *TDAE* tem a sua camada adaptativa definida, ou por meio de uma implementação anterior, já prevista para o método multicritério escolhido, ou definida pelo decisor. Os passos principais para a sua definição:

- 1.1 Declaração das funções adaptativas.
- 1.2 Definição do corpo das funções adaptativas.
- 1.3 Definição das ações adaptativas elementares das funções adaptativas.

Fase 2 – Utilização da *TDAE*

Esta fase do módulo III destina-se ao processo de consulta à *TDAE*, cuja execução resulta na apresentação de uma resposta para a busca de uma regra solicitada pelo decisor. Este módulo é definido pela função *CONSULTA (TDAE, regra)*, cujos parâmetros da função representam:

- *TDAE*: tabela de decisão acrescida da camada adaptativa;
- regra: regra a ser consultada.

Um dos passos desta fase consiste na especificação de uma regra, que o decisor pretende buscar na *TDAE*.

Passo III.2: Entrada de uma regra específica que será procurada na *TDAE*.

Passo III.3: Uso da *TDAE* para busca de uma regra especificada.

A regra especificada, que deve ser procurada, é composta de elementos que representam uma combinação dos critérios. Uma busca dessa regra é inicialmente feita na *TDÆ*. Se na busca, é encontrada uma regra idêntica à procurada, o processo continua no passo seguinte. Se na busca, é encontrada a regra E (End – última regra da tabela), significa que a regra procurada não está na tabela.

No caso em que a regra procurada não se encontre na tabela, uma função auxiliar de *FM* é chamada na regra E, para determinar valores ausentes na regra procurada, baseada em técnicas do método multicritério adotado. A função determina as alternativas mais prováveis para a regra, usando funções de utilidade, tendo como fundamento os elementos existentes, tais como:

- os exemplos da tabela de decisão;
- os pesos w dos critérios, que estão ordenados de acordo com a sua importância relativa;
- os valores globais ax das alternativas, também ordenados.

Na seqüência, uma função adaptativa anterior é chamada para a execução de uma ação adaptativa de inclusão de regra. Nesse caso, as alternativas para a regra, já determinadas pelas funções auxiliares estão definidas, a regra é inserida numa posição da tabela de decisão.

Após a aplicação da ação adaptativa de inclusão, a *TDÆ* chama uma função adaptativa posterior e executa ações adaptativas de consulta, nas quais as regras da tabela de decisão são inspecionadas para verificação de regras redundantes. Essas regras são as que têm critérios que são indiferentes, ou seja, os critérios estando presentes (“S”), ou não (“N”), e levam às mesmas alternativas, não interferem nas regras. No caso em que essas regras sejam encontradas, ações adaptativas de exclusão excluem as regras, e uma regra combinada é gerada, com todos os elementos iguais, a menos dos critérios que são indiferentes, para os quais são atribuídos um traço “-” (ou branco). Uma ação adaptativa de inclusão é executada, para que essa regra combinada seja incluída na tabela. Dessa maneira, uma nova configuração da *TDÆ* é apresentada.

Passo III.4: A partir da configuração corrente da *TD $\mathcal{A}\mathcal{E}$* , novas consultas podem ser realizadas.

Passo III.5: Finalização do processo decisório.

Ao encerrar o processo decisório, as configurações, inicial e final, podem ser armazenadas para serem usadas para reiniciar novamente o processo ou permitir futuras consultas, a partir da última configuração da *TD $\mathcal{A}\mathcal{E}$* .

No próximo item deste trabalho, é apresentada uma avaliação sobre o espaço de memória e tempo empregado pelo algoritmo para a sua execução. O algoritmo de tomada de decisão, expresso pela *TD $\mathcal{A}\mathcal{E}$* , portanto, não é objeto de comparação com outros algoritmos de decisão clássicos e conhecidos, pois não é objetivo, neste trabalho, verificar qual é o melhor algoritmo, mas apresentar mais uma alternativa de algoritmo de decisão, que usa técnicas adaptativas.

4.4 AVALIAÇÃO DO ALGORITMO DE DECISÃO DA *TD $\mathcal{A}\mathcal{E}$*

Neste item é apresentada uma avaliação sobre o desempenho do algoritmo de decisão que orienta a Tabela de Decisão Adaptativa *TD $\mathcal{A}\mathcal{E}$* . A avaliação teórica independe de uma implementação, e fornece indicações de como o algoritmo irá se comportar para resolver um problema, em termos de desempenho, tanto no aspecto de ocupação de memória, quanto no aspecto de tempo de execução, que é medido pelo número de instruções executadas (LEWIS; PAPADIMITRIOU, 1998; COOK, 1983).

4.4.1 Avaliação das exigências de espaço

A estrutura geral da *TDAE* é formada por um conjunto de linhas e colunas, como apresentada nas figuras 12 e 13.

A estimativa sobre o total de linhas usadas na tabela é dada por:

- m linhas para os critérios;
- p linhas para as alternativas;
- q linhas para o conjunto de funções auxiliares;
- nf funções adaptativas, onde cada uma pode ocupar:
 - 1 linha para a identificação da função adaptativa;
 - 1 linha para indicação de ação adaptativa anterior ou posterior;
 - np linhas para os parâmetros;
 - nv linhas para as variáveis;
 - ng linhas para os geradores.

Logo, o total de linhas = $m + p + q + nf * (1 + 1 + np + nv + ng)$. Denotando por na o número médio de elementos de memória de cada função adaptativa, pois as funções adaptativas não têm o mesmo número de parâmetros, variáveis e geradores, tem-se:

$$\text{total de linhas} = m + p + q + \sum_{i=1}^{nf} (2 + na_i)$$

Estimando o total de colunas usadas na tabela:

- n colunas para as regras;
- nf funções adaptativas, onde para cada função adaptativa:
 - 1 coluna para o *header* da função adaptativa;
 - nc colunas para as ações adaptativas elementares (? + -).

Portanto, total de colunas = $n + \sum_{i=1}^{nf} (1 + nc_i)$, considerando nc um número médio para a quantidade de colunas das ações adaptativas elementares por função.

A estimativa de número máximo de colunas de regras pode ser dada por:

- $n_{\max} = 2^{m_{\max}}$ regras, pois cada um dos m critérios pode assumir valores binários (“S” ou “N”), o que possibilita gerar $2^{m_{\max}}$ regras combinadas, onde m_{\max} representa o número máximo de critérios.

A exigência de espaço total (te) do algoritmo de decisão pode ser estimada pela expressão:

te = total de linhas * total de colunas.

$$te = [m + p + q + \sum_{i=1}^{nf} (2 + na_i)] * [n + \sum_{i=1}^{nf} (1 + nc_i)]$$

4.4.2 Avaliação das exigências de tempo de processamento

No estudo do custo de tempo do algoritmo de decisão, foi estimado o tempo consumido pelas operações fundamentais, em função do tamanho da entrada. Os custos de operações, como atribuições, operações aritméticas, testes condicionais e outras, influenciam no desempenho do algoritmo e são representados por constantes.

4.4.2.1 Exigência de tempo do Módulo I

Geração da tabela de decisão subjacente

Função: $ATDA(C, \mathcal{A}, \mathcal{R}, \mathcal{M})$

Passo I.1: Inserção do conjunto C de m critérios.

Objetivo: Rotina para entrada dos critérios da tabela de decisão convencional.

Entrada: Critérios.

Saída: Critérios e quantidade de critérios.

```

i = 0
Enquanto houver critério a ser inserido faça
    i ++
    entrada do critério i
Fim do enquanto
m = i
retorna m

```

O tempo consumido neste passo do algoritmo, no qual m é a quantidade de critérios inseridos, resulta em:

- $tp_1 = \alpha + \beta * m$, onde α é o custo fixo das operações externas ao loop e β é a soma do custo de um incremento e de uma entrada, e de um teste de término do loop.

$$tp_1 = \alpha + \beta * m$$

Passo I.2: Inserção do conjunto \mathcal{A} de p alternativas.

Objetivo: Rotina para entrada das alternativas da tabela de decisão convencional.

Entrada: Alternativas.

Saída: Alternativas e quantidade de alternativas.

```

i = 0
Enquanto houver alternativa a ser inserida faça
    i ++
    entrada da alternativa i
Fim do enquanto
p = i
retorna p

```

De maneira análoga à avaliação do passo anterior, o tempo necessário para execução deste passo resulta em:

- $tp_2 = \alpha + \beta * p$, onde p representa a quantidade de alternativas inseridas e α e β são constantes.

$$tp_2 = \alpha + \beta * p$$

Passo I.3: Inserção do conjunto \mathcal{R} de n regras iniciais.

Objetivo: Rotina para preenchimento das regras iniciais da tabela de decisão convencional.

Entrada: Regras.

Saída: Regras e quantidade de regras.

```

k = 0 // k1 representa o custo de uma atribuição
Enquanto houver regra a ser inserida faça // executa teste
    k++ // k2 custo de uma atribuição
    Para i = 1 até m // executa teste
        entrada de "S" ou "N" // entrada
        // valores booleanos: verdadeiro ou falso
        // para a regra k na linha do critério i
    Fim para
    Para j = 1 até p // executa teste
        entrada do valor "X" na alternativa ou branco // entrada
        // indicação da alternativa j
    Fim para
Fim do enquanto
n = k // k3 custo de uma atribuição
retorna n // k4 custo de um retorno

```

O tempo consumido neste passo resulta em:

$$\begin{aligned}
 tp_3 &= k_1 + k_3 + k_4 + n * [k_2 + m * (\text{teste} + \text{entrada}) + p * (\text{teste} + \text{entrada})] = \\
 &= \gamma + n * k_2 + n * (m + p) * \delta, \text{ com } \gamma = k_1 + k_3 + k_4 \text{ e } \delta = \text{teste} + \text{entrada}, \\
 &\text{constantes.}
 \end{aligned}$$

Logo, $tp_3 = \gamma + n * k_2 + n * (m + p) * \delta$, no qual n representa a quantidade de regras inseridas e, para cada regra, são inseridos os valores dos m critérios e das p alternativas.

$$tp_3 = \gamma + n * k2 + n * (m + p) * \delta$$

Passo I.4: Inserção do valor de \mathcal{M} , indicando o método multicritério de decisão do caso particular de tomada de decisão.

Objetivo: Rotina para entrada do método de tomada de decisão.

Entrada: Código do método de decisão.

Saída: Código do método de decisão.

entrada de \mathcal{M} (código do método de tomada de decisão)

retorna \mathcal{M}

Tempo consumido é constante.

$$tp_4 = k1$$

Passo I.5: Saída da função com a configuração inicial t_0 da \mathcal{TDAE} criada.

Os resultados dos tempos de cada passo do módulo I permitem concluir que o tempo total aproximado é dado por:

$$tp_{MI} = tp_1 + tp_2 + tp_3 + tp_4$$

$$tp_{MI} = \alpha + \beta * m + \alpha + \beta * p + \gamma + n * k2 + n * (m + p) * \delta + k1$$

Denotando por α_1 a soma das constantes, tem-se:

$$tp_{MI} = \alpha_1 + (\beta + n) * (m + p) + n * (k2 + (m + p) * \delta)$$

4.4.2.2 Avaliação do tempo do Módulo II

Função $BTDA(C, \mathcal{A}, R, \mathcal{M}, w, Z, ax)$

Passo II.1: Inserção dos julgamentos do decisor para criação da matriz de comparação entre os critérios (figura 16).

	c_1		c_i	c_j		c_m
c_1	...		...	...		...
c_i			$E_{i,i}$	$E_{i,j}$		
c_j			$E_{j,i}$	$E_{j,j}$		
c_m			...	...

Figura 16 – Matriz E de comparação entre os critérios

Objetivo: Montar uma matriz de comparação $E_{m \times m}$ entre os critérios, em que o decisor atribui valores de importância relativa para cada critério.

Entrada: Valores de julgamento entre os critérios.

Saída: Matriz de comparação.

No julgamento entre os critérios, aos pares, o decisor faz a entrada dos valores $E_{i,j}$, segundo a Escala Fundamental de Saaty (1994), apresentada na Tabela 10 (cap. 3), que indicam a intensidade de importância de cada critério em relação a outro (ver cap. 3), onde:

$E_{i,j}$ = valor de comparação entre c_i e c_j

$E_{j,i} = \frac{1}{E_{i,j}}$ valor de comparação entre c_j e c_i

$E_{i,i} = 1$ para $i = 1, \dots, m$ e $j = 1, \dots, m$

Para $i = 1$ até m

$E_{i,i} = 1$

// k1 custo de atribuição

Fim para

Para $i = 1$ até m

Para $j = 1$ até m

se $i \neq j$, então $E_{i,j}$ = valor de julgamento; $E_{j,i} = 1/E_{i,j}$

// k2 custo de atribuição e transposição

Fim para

Fim para

Tempo consumido:

- atribuição do valor 1 na diagonal principal da matriz $(E_{i,i})$, o que equivale a executar $(k1 * m)$ passos;
- atribuição dos valores $(E_{i,j})$ e transposição $(E_{j,i})$, são executadas $(m^2 - m)/2$ atribuições e transposições, com $k2$ para os custos, resultando:
 $k2 * (m^2 - m)/2$.

Portanto, $tp_5 = (k1 * m) + k2 * (m^2 - m)/2$.

$$tp_5 = \alpha_2 * m + \alpha_3 * m^2$$

Passo II.2: Normalização dos pesos dos critérios, para obtenção do vetor w das importâncias relativas de cada critério.

Objetivo: Obter o vetor w dos pesos, ou importância relativa, de cada critério.

Entrada: Matriz E de comparação entre os critérios.

Saída: Vetor w dos pesos dos critérios.

Após o julgamento, os valores da matriz de comparação devem ser normalizados (ver cap. 3), efetuando-se a divisão de cada elemento $E_{k,i}$ pelo $total_i$, que é a soma dos elementos da coluna a que pertencem:

$$total_i = \sum_{k=1}^m E_{k,i} \quad i = 1, \dots, m$$

$$E'_{k,i} = \frac{E_{k,i}}{total_i} \quad \text{com } 0 < E'_{k,i} < 1 \text{ para } i = 1, \dots, m \text{ e } k = 1, \dots, m$$

A partir da matriz de comparação normalizada, o valor w_i de cada critério c_i é obtido pela média aritmética dos valores normalizados $E'_{i,j}$ que pertencem à linha do critério. Os valores w_i formam o vetor de importâncias relativas de cada critério:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^m E'_{ij}}{m} \quad i = 1, \dots, m$$

Normalização da matriz de comparações E :

Para $i = 1$ até m

$total_i = 0$ // k1 custo de atribuição

Para $k = 1$ até m

$total_i = total_i + E_{k,i}$ // k2 custo da soma

Fim para

Para $k = 1$ até m

$E'_{k,i} = E_{k,i} / total_i$ // k3 custo da divisão

Fim para

Fim para

Obtenção do vetor w de importância ou dos pesos dos critérios:

Para $i = 1$ até m

soma = 0

Para $j = 1$ até m

soma = soma + $E'_{i,j}$ // k4 custo da soma

Fim para

$w_i = soma / m$

// k5 custo da divisão

Fim para

Exigência de tempo:

- normalização da matriz de comparação: considerando k1 o custo da atribuição, k2 o custo da soma e k3 custo da divisão, tem-se:
 $(k1 * m + k2 + k3 * m) * m = k1 * m^2 + k2 * m + k3 * m^2$;
- obtenção do vetor w : da mesma forma, tem-se $(k4 * m + k5) * m = k4 * m^2 + k5 * m$, com k4 e k5 custos constantes de soma e divisão.

Logo, $tp_6 = k1 * m^2 + k2 * m + k3 * m^2 + k4 * m^2 + k5 * m$.

$$tp_6 = \alpha_4 * m^2 + \alpha_5 * m$$

Passo II.3: Verificação da consistência dos julgamentos dos critérios.

Objetivo: No caso de consistência dos julgamentos dos critérios, ordenar o vetor w dos pesos dos critérios.

Entrada: Vetor w dos pesos dos critérios.

Saída: Vetor w ordenado.

Os valores w_i são submetidos à verificação de consistência para serem aceitos ou não. No caso em que o julgamento tenha resultado inconsistente, a matriz de comparação deve ser revista.

Para verificar o nível de consistência no julgamento dos critérios devem ser determinados em seqüência (ver cap. 3):

- a) vetor $pe_{m \times 1}$ dos pesos que é obtido pelo produto da matriz de comparação $E_{m \times m}$ dos critérios pelo vetor de importâncias relativas $w_{m \times 1}$:

$$pe = E \cdot w$$

- b) vetor de consistência cs , onde cada elemento cs_i é calculado pela operação:

$$cs_i = \frac{pe_i}{w_i} \quad i = 1, \dots, m$$

- c) o autovalor λ_{max} é obtido pela média aritmética dos elementos do vetor de consistência cs_i :

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^m cs_i}{m}$$

- d) índice de consistência CI é obtido pela expressão:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1}$$

- e) razão de consistência CR é calculado a partir de CI e ICR , que é o índice de consistência tabelado (Tabela 11, cap. 3) referente a um grande número de comparações paritárias efetuadas por Saaty (1994):

$$CR = \frac{CI}{ICR}$$

- f) o valor CR de aceitação é de até 0.10 (cap. 3), ou seja, de 10%; caso o valor CR ultrapasse o limite de aceitação, o decisor deve rever os seus julgamentos para que o índice seja reduzido;
- g) quando as importâncias relativas w_i são aceitáveis, quanto maior o peso w_i , mais importante é o critério c_i para o decisor.

Os pesos w_i permitem a obtenção de uma nova estrutura da tabela de decisão, com a ordenação das linhas dos critérios, de acordo com a sua importância relativa.

Neste passo do algoritmo, optou-se pela omissão do pseudocódigo de cada rotina, pois foram detalhadas em cada item acima. O tempo de cada item resulta em:

- a) vetor pe dos pesos: $k1 * (m^2 + m)$;
- b) vetor de consistência: $k2 * m$;
- c) autovalor: $k3 * m$;
- d) índice de consistência: $k4$;
- e) razão de consistência: $k5$;
- f) ordenação do vetor w : existem estudos clássicos sobre o tempo consumido dos diversos algoritmos de ordenação, cujos resultados podem ser encontrados na literatura sobre o assunto; de acordo com Cormen et al. (2001), o tempo é de $k6 * m^2$ no pior caso, quando os pesos estão em ordem inversa à desejada e $k7 * m$ ou $k8 * (m \log m)$ no melhor caso.

O tempo total deste passo é dado pela soma dos tempos de cada item e considerando $k6 * m^2$ seja o tempo adotado para a ordenação do vetor w , tem-se:

$$tp_7 = k1 * (m^2 + m) + k2 * m + k3 * m + k4 + k5 + k6 * m^2$$

$tp_7 = \alpha_6 * m^2 + \alpha_7 * m + \alpha_8$

Passo II.4: Criação da matriz Z de desempenho de cada alternativa em relação ao conjunto de critérios.

Objetivo: Obter a matriz Z de desempenho das alternativas.

Entrada: Alternativas e critérios.

Saída: Matriz $Z_{p \times m}$ com o desempenho das alternativas, como mostra a figura 17.

	c_1	c_2	...	c_j	...	c_m
a_1						
...						
...						
a_i				z_{ij}		
...						
...						
a_p						

Figura 17 – Matriz Z de desempenho das alternativas em relação aos critérios

As referências para os próximos itens do algoritmo podem ser encontradas no Capítulo 3:

- a) Primeiramente, são obtidas m matrizes de comparação MC_i entre as alternativas em relação a cada critério, cada uma conforme a tabela (figura 18). Para isto, o decisor julga cada alternativa a_j em relação à a_k , diante de um critério c_i , seguindo procedimentos semelhantes aos adotados no Passo II.1.

c_i	a_1	a_2		a_k		a_p
a_1						
a_j						
a_p						

Figura 18 – Matriz de comparação MC_i

- b) Cada uma das matrizes obtidas MC_i deve ser normalizada, de forma semelhante ao Passo II.2, gerando as matrizes Q_i , assim como deve ser verificada a consistência dos julgamentos das alternativas em relação aos critérios.
- c) Com os julgamentos aceitos, a partir de cada matriz Q_i , são obtidas as pontuações de cada alternativa em relação ao critério c_i . Essas pontuações

são denominadas prioridades relativas $z_{i,j}$ da matriz Z (figura 17), e indicam o desempenho da alternativa a_j em relação ao critério c_i . O valor de $z_{i,j}$ é calculado pela média aritmética de cada linha da matriz normalizada:

$$z_{i,j} = \frac{soma_k}{m}, \quad \text{onde } soma_k = \sum_{i=1}^p q_{k,i} \text{ para } k = 1, \dots, p$$

para $j = 1, \dots, p$ e $i = 1, \dots, m$

Também o pseudocódigo do algoritmo de cada item foi omitido. A exigência de tempo para cada passo resultou em:

- a) $k_1 * (m * p^2)$, pois são geradas m matrizes de comparações MC, cada uma de ordem $p * p$;
- b) $k_2 * (m * p^2) + k_3 * p^2$, corresponde ao tempo para a normalização das matrizes de comparação e à verificação da consistência dos julgamentos;
- c) $k_4 * (m * p^2)$, para obter os elementos da matriz Z .

O tempo total para o passo II.4 é de:

$$tp_8 = k_1 * (m * p^2) + k_2 * (m * p^2) + k_3 * p^2 + k_4 * (m * p^2)$$

$$tp_8 = \alpha_9 * (m * p^2) + k_3 * p^2$$

Passo II.5: Determinação do vetor ax de importância relativa das alternativas.

Objetivo: Obtenção do vetor ax de importância relativa das alternativas.

Entrada: Matriz Z de desempenho das alternativas e vetor w dos pesos dos critérios.

Saída: Vetor ax das alternativas.

Da matriz de desempenho obtém-se o vetor de categorização das alternativas, onde cada elemento ax_j é associado à alternativa a_j e equivale ao valor de importância relativa da alternativa. Esse vetor é determinado pelo produto da matriz $Z_{p \times m}$ de desempenho pelo vetor de importância relativa $w_{m \times 1}$ dos critérios.

$$ax = Z \cdot w$$

Exigência de tempo:

$$tp_9 = \alpha_{10} * (p^2 + p)$$

Passo II.6: Ordenação do vetor ax , da alternativa de maior importância para a de menor valor.

Tempo necessário para a ordenação:

$$tp_{10} = \alpha_{11} * p^2$$

Passo II.7: Ordenação das regras da tabela de decisão, com o objetivo de mostrar as regras que apresentem melhores possibilidades de solução.

Objetivo: Ordenar as regras da tabela de decisão.

Entrada: Regras da tabela de decisão na configuração atual, vetor w dos pesos dos critérios e vetor ax de importância relativa das alternativas.

Saída: Nova configuração da tabela de decisão, com as regras ordenadas.

A partir dos pesos w_i dos critérios e os valores de categorização ax_j das alternativas, a $TDAE$ ordena as regras da tabela de decisão.

Para ordenar as regras da tabela de decisão, são obtidos os valores Y_k associados a cada regra r_k :

$$Y_k = \left(\sum_{i=1}^m pr_{i,k} \right) * ax_j \quad k = 1, \dots, n$$

sendo:

- $pr_{i,k} = w_i$, quando $c_i = \text{"S"}$ na regra r_k ;
- $pr_{i,k} = 0$, quando $c_i = \text{"N"}$ na regra r_k ;

- αx_j é o valor de categorização da alternativa a_j marcada na regra r_k .

Os valores Y_k são ordenados em ordem decrescente, indicando a nova ordem das regras na tabela de decisão. O objetivo de ordenar as regras visa melhorar o desempenho do processo de tomada de decisão.

A exigência de tempo deste passo do algoritmo é composta por:

- determinação dos pesos de cada regra Y_k , para obter o vetor Y : $\alpha_{12} * (n * m)$, para n regras, uma somatória de m valores, e um produto da soma pelo valor de categorização de uma alternativa;
- ordenação do vetor Y : $\alpha_{13} * n^2$.

O total de tempo para este passo:

$$tp_{11} = \alpha_{12} * (n * m) + \alpha_{13} * n^2$$

Após a avaliação do tempo de cada passo do módulo II, o tempo total é dado por:

$$tp_{MII} = tp_5 + tp_6 + tp_7 + tp_8 + tp_9 + tp_{10} + tp_{11}$$

$$tp_{MII} = \alpha_2 * m + \alpha_3 * m^2 + \alpha_4 * m^2 + \alpha_5 * m + \alpha_6 * m^2 + \alpha_7 * m + \alpha_8 + \alpha_9 * (m * p^2) + k3 * p^2 + \alpha_{10} * (p^2 + p) + \alpha_{11} * p^2 + \alpha_{12} * (n * m) + \alpha_{13} * n^2$$

$$tp_{MII} = \alpha_{13} * n^2 + \alpha_{14} * m^2 + \alpha_{15} * p^2 + \alpha_9 * (m * p^2) + \alpha_{10} * p + \alpha_{12} * (n * m) + \alpha_8$$

4.4.2.3 Avaliação do tempo do Módulo III

Este módulo é composto por duas fases distintas:

Fase 1 – Montagem da *TDAE* antes de sua utilização;

Fase 2 – Utilização da *TDAE* montada.

Fase 1 – Montagem da *TDAE* antes de sua utilização.

Esta fase é constituída pela definição da camada adaptativa da *TDAE*, na qual são especificadas as funções adaptativas e o corpo das ações adaptativas elementares de cada função.

Passo III.1: Definição da camada adaptativa da *TDAE*.

Objetivo: Rotina para a geração da parte da tabela correspondente à camada adaptativa que compreende as especificações das funções adaptativas e do corpo das funções adaptativas.

1.1 Declaração das funções adaptativas.

Objetivo: Inclusão das linhas da tabela correspondentes à definição das funções adaptativas.

Entrada: Dados para a declaração da função adaptativa.

Saída: Funções adaptativas declaradas.

```
k = 0
```

```
Enquanto houver declaração de função adaptativa a ser inserida faça
```

```
    k++
```

```
    entrada do nome da função;
```

```
    entrada de parâmetros (np), associados à função adaptativa em questão;
```

```
    entrada de variáveis (nv), associados à função adaptativa em questão;
```

```
    entrada de geradores (ng), associados à função adaptativa em questão;
```

```
Fim do enquanto
```

```
nf = k // número de funções adaptativas
```

```
retorna nf
```

Exigência de tempo:

- $tp_{12} = \alpha_{16} * \sum_{i=1}^{nf} na_i$, onde nf é o número de funções adaptativas e na é o número médio de elementos de cada função, pois $(np + nv + ng)$ é variável para cada função adaptativa;

Na prática, dificilmente alguma função (adaptativa ou não) possui uma imensidão de argumentos. Pode-se adotar um número arbitrário para na_{max} , que seja adequado para as funções adaptativas. Na tese de Livre-Docência de Neto (1993) podem ser encontradas algumas funções adaptativas com mais de 10 argumentos, porém a média está entre 4 ou 5 elementos.

$$tp_{12} = \alpha_{16} * \sum_{i=1}^{nf} na_i$$

1.2 Definição do corpo das funções adaptativas.

Objetivo: Rotina para a definição do corpo das funções adaptativas, que são compostos pelas ações adaptativas elementares.

Entrada: Dados para a definição das ações adaptativas elementares.

Saída: Corpo das funções adaptativas.

Para $k = 1$ até nf

a) criar a coluna *header* da função adaptativa composta por:

marcação do nome da função;

marcação de um tag \mathcal{B} ou \mathcal{A} (anterior ou posterior);

b) criar as colunas das ações adaptativas elementares da função:

colunas referentes às ações adaptativas elementares de consulta, se houver;

colunas referentes às ações adaptativas elementares de inclusão, se houver;

colunas referentes às ações adaptativas elementares de exclusão, se houver;

Fim para

Retorna

Exigência de tempo:

a) para criar a coluna *header* de uma função adaptativa:

1 uma coluna para o header

1 para marcar nome

1 para marcar \mathcal{B} ou \mathcal{A}

$np + nv + ng = na$, com na igual a um número médio de elementos

b) $nc * na$, onde nc é o número médio de colunas criadas para representar o conjunto de ações adaptativas elementares que compõem o corpo da função adaptativa que se está definindo.

Para definir o corpo da função adaptativa tem-se o seguinte tempo gasto:

$$tp_{13} = 3 + \alpha_{17} * \sum_{i=1}^{nf} na_i + \alpha_{18} * \sum_{i=1}^{nf} (nc_i * na_i)$$

1.3 Definição das ações adaptativas elementares das funções adaptativas.

Denotando-se por *regrap*, o padrão (“*template*”) de uma coluna da \mathcal{TDAE} , que é constituído por uma seqüência de elementos do conjunto {"S", "N", " " } de comprimento igual ao número de linhas da \mathcal{TDAE} , conforme a formulação apresentada no item 4.1 A notação adotada para as ações adaptativas elementares é:

- ação adaptativa elementar de consulta: ? [*regrap*]
- ação adaptativa elementar de inclusão: + [*regrap*]
- ação adaptativa elementar de exclusão: - [*regrap*]

O custo de tempo para a definição das ações adaptativas elementares depende do tamanho da *regrap*, que é função do número de critérios, alternativas, parâmetros, variáveis, geradores definidos, e a soma desses custos devem ser multiplicados pelo número de colunas ? + - definidas para cada função adaptativa. A exigência de tempo resulta em:

$$tp_{ac} = \alpha_{19} * [\text{número de linhas da tabela} * \sum_{i=1}^{nf} (nc_i + 2)] + \alpha_{20}$$

O número de linhas da tabela é o equivalente ao obtido no item 4.4.1 e α_{20} é o custo de montagem de uma célula da tabela, logo, tem-se:

$$tp_{ac} = \alpha_{19} * [m + p + q + \sum_{i=1}^{nf} (2 + na_i) * \sum_{i=1}^{nf} (nc_i + 2)] + \alpha_{20}$$

O custo da montagem da infraestrutura (fase 1) para uso da *TDAE* é de:

$$tp_{fase1} = tp_{12} + tp_{13} + tp_{ac}$$

$$tp_{fase1} = \alpha_{16} * \sum_{i=1}^{nf} na_i + 3 + \alpha_{17} * \sum_{i=1}^{nf} na_i + \alpha_{18} * \sum_{i=1}^{nf} (nc_i * na_i) + \alpha_{19} * [m + p + q + \sum_{i=1}^{nf} (2 + na_i) * \sum_{i=1}^{nf} (nc_i + 2)] + \alpha_{20}$$

$$tp_{fase1} = \alpha_{21} * \sum_{i=1}^{nf} na_i + \alpha_{18} * \sum_{i=1}^{nf} (nc_i * na_i) + \alpha_{19} * (m + p + q) + \alpha_{19} * [\sum_{i=1}^{nf} (2 + na_i) * \sum_{i=1}^{nf} (nc_i + 2)] + \alpha_{22}$$

Fase 2 – Utilização da *TDAE*.

Após a especificação da *TDAE*, o usuário pode utilizá-la para realizar consultas às regras, procurando as alternativas de solução para elas. Para isto, a função *CONSULTA* (*TDAE*, regra), referente à fase de consulta, é descrita pelos seguintes passos.

Passo III.2: Entrada de uma regra específica que será procurada na *TDAE*.

Objetivo: Permitir ao usuário entrar com uma regra específica para ser buscada na *TDAE*.

Entrada: Dados que compõem a regra específica.

Saída: Regra específica.

Para $i = 1$ até m
 entrada do valor "S" ou "N" para a regra na linha do critério i
 Fim para
 retorna regra específica

Deve-se observar que esta rotina pode ser omitida, no caso em que haja um aplicativo que forneça, automaticamente, as regras a serem procuradas, evitando-se a entrada manual das mesmas. Nesta tese, a comprovação do funcionamento da *TDÆ* foi feita com o auxílio desta rotina de entrada manual da regra.

Exigência de tempo:

$$tp_{14} = \alpha_{23} * m$$

Passo III.3: Uso da *TDÆ* para busca de uma regra específica.

Objetivo: Rotina para buscar uma regra especificada, com o objetivo de se encontrar as alternativas da regra.

Entrada: Regra específica a ser buscada na *TDÆ*.

Saída: Apresentação das alternativas da regra buscada.

Busca da regra específica na *TDÆ*:

1. se achou a regra, executa as chamadas de função, se houver, e segue para o próximo passo;
2. se achou regra E (regra final) da tabela:
 - 2.1. executa uma das funções auxiliares de *FM* para determinar valores ausentes na regra específica;
 - 2.2. executa ação adaptativa de inclusão da regra específica na tabela de decisão;
 - 2.3. executa ações adaptativas de consulta:
 - 2.3.1. se houver regras redundantes, elas são excluídas por ações adaptativas de exclusão, e uma ação adaptativa de inclusão é executada para inserir uma regra que é a fusão das regras redundantes;
 - 2.3.2. se não houver regras redundantes, segue para o próximo passo.

Desta forma, a saída da função *CONSULTA* (*TDÆ*, regra) pode apresentar uma solução possível para o problema de decisão ou um conjunto de soluções, dependendo do método multicritério escolhido pelo decisor.

O custo de tempo para a execução da busca de regras na *TDÆ* pode ser estimado por:

- custo da busca da regra na tabela de decisão, que pode atingir até $n+1$ comparações (n número de regras + regra E), e para cada comparação, são comparados os valores dos m critérios da regra, o que resulta em:
 $\alpha_{24} * [(n+1) * m]$;
- t_{FM} custo da execução de uma função auxiliar *FM*, se houver;
- tp_{ad} custo das chamadas das funções adaptativas, que depende do método multicritério adotado.

O custo total da utilização da *TDÆ* na busca de regras específicas:

$$tp_{fase2} = tp_{14} + \alpha_{24} * [(n+1) * m] + t_{FM} + tp_{ad}$$

$$tp_{fase2} = \alpha_{25} * m + \alpha_{24} * (n * m) + t_{FM} + tp_{ad}$$

A exigência de tempo total para o módulo III é dado por:

$$tp_{MIII} = tp_{fase1} + tp_{fase2}$$

$$tp_{MIII} = \alpha_{21} * \sum_{i=1}^{nf} na_i + \alpha_{18} * \sum_{i=1}^{nf} (nc_i * na_i) + \alpha_{19} * (m + p + q) + \alpha_{19} * [\sum_{i=1}^{nf} (2 + na_i) * \sum_{i=1}^{nf} (nc_i + 2)] + \alpha_{22} + \alpha_{25} * m + \alpha_{24} * (n * m) + t_{FM} + tp_{ad}$$

Passo III.4: A partir da configuração corrente da *TDÆ*, novas consultas podem ser realizadas.

Passo III.5: Finalização do processo decisório.

Ao encerrar o processo decisório, as configurações, inicial e final, podem ser armazenadas para serem usadas para reiniciar novamente o processo ou permitir futuras consultas.

Um resumo do estudo de desempenho do algoritmo de tomada de decisão, expresso por uma \mathcal{TDAE} , é apresentado a seguir:

- exigência de espaço de memória:

$$te = [m + p + q + \sum_{i=1}^{nf} (2 + na_i)] * [n + \sum_{i=1}^{nf} (1 + nc_i)]$$

- exigência de tempo analisada módulo a módulo:

$$tp_{MI} = \alpha_1 + (\beta + n) * (m + p) + n * (k2 + (m + p) * \delta)$$

$$tp_{MII} = \alpha_{13} * n^2 + \alpha_{14} * m^2 + \alpha_{15} * p^2 + \alpha_9 * (m * p^2) + \alpha_{10} * p + \alpha_{12} * (n * m) + \alpha_8$$

$$\begin{aligned} tp_{MIII} = & \alpha_{21} * \sum_{i=1}^{nf} na_i + \alpha_{18} * \sum_{i=1}^{nf} (nc_i * na_i) + \alpha_{19} * (m + p + q) + \\ & \alpha_{19} * [\sum_{i=1}^{nf} (2 + na_i) * \sum_{i=1}^{nf} (nc_i + 2)] + \alpha_{22} + \alpha_{25} * m + \\ & \alpha_{24} * (n * m) + t_{FM} + tp_{ad} \end{aligned}$$

O tempo total exigido para a execução do algoritmo de tomada de decisão da \mathcal{TDAE} é dado pela soma: $t_{total} = tp_{MI} + tp_{MII} + tp_{MIII}$.

Os resultados mostram que o algoritmo de tomada de decisão, expresso pela \mathcal{TDAE} , tanto no custo de consumo de memória, quanto no tempo de execução, são dependentes das quantidades de critérios, alternativas, funções auxiliares, funções adaptativas e da escolha do método multicritério. Uma aplicação do algoritmo de decisão da \mathcal{TDAE} é apresentada no próximo capítulo, com o objetivo de avaliar o número de instruções executadas pelas ações adaptativas.

5 APLICAÇÃO DA *TDAE* EM DECISÕES MULTICRITÉRIO

O presente capítulo tem por objetivo mostrar a aplicabilidade do modelo da *TDAE*, usada como apoio à decisão multicritério. É apresentada uma aplicação, cujo algoritmo de tomada de decisão é baseado nas técnicas adaptativas e em procedimentos do método multicritério AHP, adotado para ilustrar o uso da *TDAE*. Também é feita uma análise da complexidade computacional do particular exemplo.

O processo AHP pode ser considerado um dos métodos mais amplamente empregado em problemas práticos de decisão (ver cap. 3), que envolvem diversos critérios, em razão da quantidade de estudos existentes e aplicações. O método permite modelar o problema, de forma hierárquica, de tal maneira que os objetivos a serem alcançados, os critérios envolvidos e as alternativas de solução sejam identificados e relacionados. Além disso, as técnicas de julgamento do AHP e as medidas de consistência tornam menos subjetivas as avaliações do decisor durante o processo de decisão.

O emprego da tabela de decisão tradicional, integrado aos procedimentos do método AHP e às técnicas adaptativas, permitem ao decisor utilizar a *TDAE* na modelagem e representação dos detalhes do problema de decisão, para uma melhor compreensão do problema e obtenção de uma solução satisfatória.

Para problemas de decisão multicritério de maior complexidade, o método AHP sugere uma divisão do problema em partes lógicas, o que facilita a construção de uma estrutura hierárquica. Como o objetivo deste capítulo é mostrar a aplicação da *TDAE*, o exemplo apresentado está limitado a três níveis de decisão, que apesar da restrição, não há nenhuma perda em termos do entendimento sobre o uso da *TDAE*. Contudo, para trabalhos futuros, sugere-se que cada um dos níveis da estrutura seja representado em uma tabela de decisão. Essas tabelas podem ser vinculadas, de acordo com uma seqüência lógica, a uma tabela de decisão principal, segundo regras pré-estabelecidas. Por exemplo, em uma regra da tabela principal

pode-se executar uma alternativa de ação para a chamada de outra tabela, cujos resultados retornam para a tabela que a chamou (ver cap. 2). As tabelas de decisão vinculadas podem ser estáticas, caso não se alterem durante o processo, ou adaptativas, o que possibilita mudanças nas regras de cada uma, de maneira autônoma.

A seguir é apresentado o uso da *TDÆ* aplicado a um problema de decisão, baseado no algoritmo descrito no item 4.3.

5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO

Como cada particular método multicritério, escolhido para a tomada de decisão, tem suas próprias características, e como cada uma exige da modelagem um tratamento diferenciado, torna-se difícil generalizar este trabalho. Por esta razão, este exemplo é apresentado aqui apenas como uma forma de orientar a elaboração de outros similares, mas sem a pretensão de cobrir exhaustivamente as possibilidades que podem se apresentar, que são inúmeras.

No exemplo de aplicação apresentado, também não houve uma preocupação de se contextualizar o problema de tomada de decisão e detalhar seus critérios e suas alternativas, portanto, foi simplificado. O mais importante é descrever a execução do algoritmo de decisão expresso pela *TDÆ*.

Este exemplo de aplicação, hipotético, tem como base um problema de tomada de decisão, sujeito a múltiplos critérios, cuja estrutura hierárquica é formada por três níveis:

- o primeiro nível representa o objetivo principal a ser alcançado com a resolução do problema;
- o segundo nível é constituído pelos critérios impostos ao problema;
- o terceiro nível apresenta as alternativas de ações viáveis, sobre as quais a escolha da melhor entre elas é a decisão a ser tomada.

Para efeito de ilustração, são considerados neste problema de decisão um objetivo principal, três critérios e duas alternativas, cuja estrutura hierárquica é apresentada na figura 19:

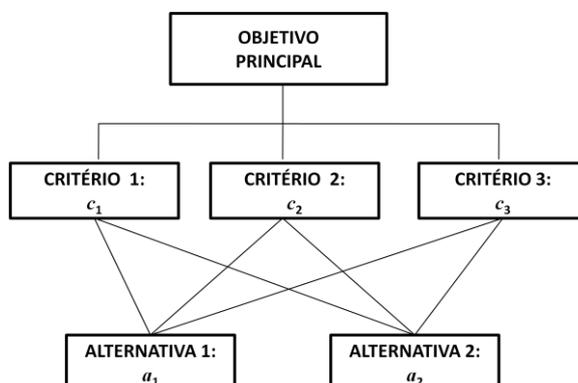


Figura 19 – Estrutura hierárquica do exemplo

- conjunto de critérios: $C = \{c_1, c_2, c_3\}$;
- conjunto de alternativas: $\mathcal{A} = \{a_1, a_2\}$.

5.2 ALGORITMO DE TOMADA DE DECISÃO DA APLICAÇÃO

Para esta aplicação, os passos dos módulos I, II e III do algoritmo da *TDAE* são apresentados a seguir, de forma detalhada.

5.2.1 Passos do Módulo I

O módulo I consiste na criação da tabela de decisão subjacente, a partir dos critérios, alternativas e regras escolhidos. Neste exemplo, são consideradas quatro regras, definidas pelo decisor. A figura 20 apresenta a configuração inicial t_0 da tabela.

	Regras			
	r_1	r_2	r_3	r_4
Critério c_1	S	N	N	S
Critério c_2	S	S	S	S
Critério c_3	S	N	S	N
Alternativa a_1	X			X
Alternativa a_2		X	X	

Figura 20 – Tabela de decisão subjacente do exemplo

5.2.2 Passos do Módulo II

O objetivo deste módulo é possibilitar a determinação dos julgamentos, para a criação da matriz de decisão, cujos valores representam os pesos e as preferências relativas dos critérios e das alternativas.

Passo II.1 – Obtenção da matriz de comparação entre os critérios.

O decisor julga os critérios, aos pares, expressando a sua preferência entre um critério e outro, de acordo com o seu conhecimento do problema de decisão e levando em consideração o objetivo principal a ser atingido. Por hipótese, suponha-se que o decisor julgue da seguinte forma:

- o critério c_1 tem preferência moderadamente superior em relação ao critério c_2 ;
- o critério c_1 tem preferência moderada em relação ao critério c_3 ;
- o critério c_2 tem preferência entre equivalente e moderada em relação ao critério c_3 .

A matriz de comparação E entre os critérios é apresentada na figura 21:

	c_1	c_2	c_3
c_1	1	4	3
c_2	1/4	1	2
c_3	1/3	1/2	1

Figura 21 – Matriz de comparação E entre os critérios

Passo II.2 – Normalização dos valores de julgamento dos critérios e obtenção do vetor w dos pesos de cada critério.

Para a normalização da matriz de comparação, são calculados os totais ou somas de cada uma das colunas da matriz. Em seguida, cada elemento da matriz é dividido pelo total da coluna correspondente, obtendo-se a matriz normalizada (figura 22):

	c_1	c_2	c_3
c_1	0.63	0.73	0.50
c_2	0.16	0.18	0.33
c_3	0.21	0.09	0.17

Figura 22 – Matriz de comparação normalizada (E)

O peso de cada critério, que representa a importância do critério em relação ao objetivo principal do problema, é determinado pela média aritmética dos valores da linha do critério, o que resulta no vetor w :

$$w = (w_1, w_2, w_3)^T = (0.62, 0.22, 0.16)^T.$$

Passo II.3 – Verificação da consistência dos julgamentos dos critérios.

A matriz de comparação entre os critérios da figura 21 é avaliada para a verificação do grau de consistência dos julgamentos, que é dada pela razão de consistência (CR), em função da ordem da matriz:

- vetor dos pesos $pe = (1.98, 0.69, 0.47)^T$
- vetor de consistência $cs = (3.20, 3.08, 3.04)^T$
- autovalor $\lambda_{max} = 3.11$
- índice de consistência $CI = 0.05$
- razão de consistência $CR = 0.09$

O valor de $CR = 0.09$ sinaliza que os julgamentos são consistentes e aceitáveis, pois $CR < 10\%$, caso contrário, seria necessário revê-los.

Passo II.4 – Geração da matriz de desempenho das alternativas.

- São criadas as matrizes de comparação MC_1 , MC_2 e MC_3 , onde as alternativas são julgadas aos pares, tendo como referência cada um dos critérios.

Na matriz MC_1 (figura 23), o decisor julga que a alternativa a_1 tem um desempenho ou nível de preferência muito forte em relação à alternativa a_2 , diante do critério c_1 .

c_1	a_1	a_2
a_1	1	8
a_2	1/8	1

Figura 23 – Matriz MC_1

Essa matriz também é normalizada, para obter o desempenho de cada alternativa em relação ao critério c_1 , que compõe os elementos da matriz Z :

$$z_{1,1} = 0.89 \text{ e } z_{2,1} = 0.11.$$

Os mesmos procedimentos são realizados para a obtenção da matriz MC_2 (figura 24), na qual a alternativa a_1 tem preferência forte em relação à alternativa a_2 , diante do critério c_2 :

c_2	a_1	a_2
a_1	1	6
a_2	1/6	1

Figura 24 – Matriz MC_2

Após a normalização de MC_2 , são obtidos os desempenhos das alternativas em relação ao critério c_2 :

$$z_{1,2} = 0.86 \text{ e } z_{2,2} = 0.14.$$

Repete-se o processo de comparação das alternativas, em relação ao critério c_3 , para obter a matriz MC_3 (figura 25):

c_3	a_1	a_2
a_1	1	4
a_2	1/4	1

Figura 25 – Matriz MC_3

Na matriz MC_3 , o decisor julga que a alternativa a_1 tem preferência moderadamente superior à alternativa a_2 , diante do critério c_3 . Com a normalização de MC_3 , são obtidos os desempenhos das alternativas:

$$z_{1,3} = 0.80 \text{ e } z_{2,3} = 0.20.$$

b) As matrizes MC_1 , MC_2 e MC_3 são avaliadas para a verificação de consistência dos julgamentos. No exemplo, as matrizes recíprocas são de ordem 2, portanto, podem ser consideradas consistentes (cap. 3).

c) A matriz Z de desempenho é apresentada na figura 26:

	c_1	c_2	c_3
a_1	0.89	0.86	0.80
a_2	0.11	0.14	0.20

Figura 26 – Matriz Z de desempenho das alternativas

Passo II.5 – Determinação do vetor ax de importância relativa das alternativas.

A determinação do vetor ax resulta: $ax_1 = 0.87$ e $ax_2 = 0.13$, indicando a importância da alternativa a_1 e da a_2 , respectivamente, diante do objetivo do problema.

Passo II.6 – O vetor ax é ordenado, para indicar as alternativas de melhor desempenho para o problema.

No exemplo, a alternativa a_1 tem melhor desempenho que a alternativa a_2 , o que sugere a interpretação de que a_1 é uma boa solução para o problema.

Passo II.7 – Neste passo, as regras da tabela de decisão subjacente são ordenadas, com base na avaliação dos critérios e alternativas realizada nos passos anteriores, com o objetivo de apresentar uma ordenação para as regras, de acordo com a sua importância relativa.

No exemplo deste capítulo, a partir da configuração inicial t_0 (figura 20), os valores Y_1 , Y_2 , Y_3 e Y_4 associados às regras r_1 , r_2 , r_3 e r_4 , respectivamente, são determinados: $Y_1 = 0.87$, $Y_2 = 0.03$, $Y_3 = 0.05$ e $Y_4 = 0.73$.

Desta forma, as regras da tabela subjacente são reordenadas, apresentando uma nova configuração da tabela t_1 (figura 27).

	Regras			
	r_1	r_4	r_3	r_2
Critério c_1	S	S	N	N
Critério c_2	S	S	S	S
Critério c_3	S	N	S	N
Alternativa a_1	X	X		
Alternativa a_2			X	X

Figura 27 – Configuração t_1 da tabela de decisão do exemplo

Até o passo anterior, os procedimentos do método AHP foram aplicados, e a partir deste passo, a tabela de decisão subjacente pode ser usada pelo decisor para fazer consultas às regras da tabela.

5.2.3 Passos do Módulo III

Este módulo é dividido em duas fases, que são descritos a seguir.

5.2.3.1 Fase 1 - Montagem da camada adaptativa da $TDAE$

Passo III.1: Definição da camada adaptativa da $TDAE$.

Para a aplicação deste exemplo, duas funções adaptativas \mathcal{F}_1 e \mathcal{F}_2 são declaradas.

A função adaptativa \mathcal{F}_1 é definida por:

- \mathcal{F}_1 é a identificação da função adaptativa;

- $p_1, p_2, p_3, v_1, v_2, g$ são os elementos da função adaptativa, composta por parâmetros, variáveis e geradores;
- ações adaptativas elementares, na qual *regrap* representa um padrão (“*template*”) de regra:
 - ação adaptativa elementar de consulta: ? [*regrap*]
 - ação adaptativa elementar de inclusão: + [*regrap*]

A função adaptativa \mathcal{F}_2 é definida por:

- \mathcal{F}_2 é a identificação da função adaptativa;
- $p_4, p_5, p_6, v_3, v_4, g$ são os elementos da função adaptativa, composta por parâmetros, variáveis e geradores;
- ações adaptativas elementares:
 - ação adaptativa elementar de consulta: ? [*regrap*]
 - ação adaptativa elementar de consulta: ? [*regrap*]
 - ação adaptativa elementar de exclusão: – [*regrap*]

5.2.3.2 Fase 2 - Uso da *TDÆ* para consultas

Passo III.2: Inserção dos parâmetros da regra a ser consultada.

Para efeito de ilustração, suponha que o decisor entre com a regra a ser procurada na tabela de decisão, que é representada por *rcc* (figura 28), ressaltando que os outros elementos da regra estão indefinidos:

	<i>rcc</i>
c_1	S
c_2	N
c_3	S

Figura 28 – Regra *rcc* a ser consultada

Passo III.3: Busca da regra na \mathcal{TDAE} .

A partir dos critérios da regra rcc , é feita uma busca na \mathcal{TDAE} . No exemplo, rcc não é encontrada, logo, na regra E (final) há uma chamada para uma função auxiliar em \mathcal{FM} .

A função auxiliar em \mathcal{FM} determina os valores ausentes na regra rcc . Neste exemplo, a função auxiliar determina um valor que indica qual alternativa a_1 ou a_2 será atribuída à regra, e também calcula o peso da regra, usando para isso, os pesos dos critérios (vetor w) e das alternativas (vetor ax), obtidos pelo método multicritério AHP.

A função auxiliar em \mathcal{FM} determina o valor Y_{rcc} , que é o peso da regra rcc , e por meio dele é possível definir a posição de rcc na \mathcal{TDAE} , uma vez que as suas regras estão ordenadas de acordo com os seus pesos. A regra rcc pode ser incluída na \mathcal{TDAE} por meio de uma ação adaptativa de inclusão, com a chamada da função adaptativa $\mathcal{F}1$. Essa ação adaptativa gera um número (ou nome) em g , que permite o acréscimo de uma coluna na \mathcal{TDAE} , que será ocupada por rcc .

Neste instante a \mathcal{TDAE} se apresenta numa nova configuração, e a função adaptativa $\mathcal{F}2$ é chamada, para que a ação adaptativa de consulta seja executada. Essa ação adaptativa de consulta é executada duas vezes, com o objetivo de procurar regras redundantes. Ao encontrar regras redundantes, elas são assinaladas para posterior exclusão.

As regras redundantes são combinadas, para gerar apenas uma regra. Essa operação é realizada por uma das funções auxiliares em \mathcal{FM} .

Em seguida, as regras redundantes são excluídas da \mathcal{TDAE} por duas execuções da ação adaptativa de exclusão de $\mathcal{F}2$, e a regra combinada é incluída pela ação

adaptativa de inclusão, pela chamada da função adaptativa $\mathcal{F}1$, gerando uma nova configuração da \mathcal{TDAE} .

Deve-se observar que regras combinadas, resultantes da fusão de regras redundantes, reduzem a quantidade de regras da tabela de decisão, melhorando o desempenho do algoritmo de decisão durante a busca de regras.

Opcionalmente, a ação adaptativa de exclusão de regras pode ser usada no início do algoritmo de decisão, após a conclusão do módulo I. A execução desta ação adaptativa pode verificar a existência de regras redundantes ou conflitantes, já na configuração inicial t_0 da tabela de decisão, introduzida pelo decisor.

Neste exemplo, a execução dos passos para a busca da regra r_{cc} (figura 28) resulta em:

- a função auxiliar em \mathcal{FM} determina que a alternativa a_1 é a alternativa da regra r_{cc} e o peso da regra calculado é $Y_{r_{cc}} = 0.67$;
- a ação adaptativa de inclusão de r_{cc} é executada: a regra é identificada por r_5 , que é incluída numa coluna da \mathcal{TDAE} , cuja posição é dependente do peso da regra, gerando a nova configuração t_1 da tabela (figura 29):

	Regras				
	r_1	r_4	r_5	r_3	r_2
Critério c_1	S	S	S	N	N
Critério c_2	S	S	N	S	S
Critério c_3	S	N	S	S	N
Alternativa a_1	X	X	X		
Alternativa a_2				X	X

Figura 29 – Configuração t_1 da \mathcal{TDAE} do exemplo

Ações adaptativas de consulta de regras são executadas, tendo como entrada a configuração t_1 da \mathcal{TDAE} , encontrando as regras r_1 , r_4 e r_5 redundantes entre si, e as regras redundantes r_3 e r_2 . Uma função auxiliar em \mathcal{FM} gera uma única regra combinada r_6 para r_1 , r_4 e r_5 , e uma regra r_7 , para r_3 e r_2 . As regras r_1 , r_2 , r_3 , r_4 e r_5 são excluídas por ações adaptativas de exclusão de regras, e uma nova

configuração t_2 da $TDAE$ (figura 30) é apresentada, após a execução de ações adaptativas de inclusão das regras r_6 e r_7 .

	Regras	
	r_6	r_7
Critério c_1	S	N
Critério c_2		S
Critério c_3		
Alternativa a_1	X	
Alternativa a_2		X

Figura 30 – Configuração t_2 da $TDAE$ do exemplo

Passo III.4: A partir da configuração corrente da $TDAE$, novas consultas podem ser realizadas para outras regras.

Passo III.5: Finalização do processo decisório.

Cabe ressaltar que as funções auxiliares de FM sofrem influência do método multicritério empregado, pois os mesmos podem, por exemplo, classificar as regras e agrupá-las.

Na seqüência desta tese, é feita uma avaliação de espaço e tempo exigidos para a execução do algoritmo de decisão da $TDAE$, para o exemplo de aplicação particular apresentado.

5.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO ALGORITMO DE DECISÃO

O estudo das exigências de espaço e de tempo do algoritmo de tomada de decisão da $TDAE$, feito no Capítulo 4 desta tese, é a base para a avaliação do exemplo.

Na aplicação foram apresentados na configuração t_0 do exemplo, os seguintes elementos da $TDAE$:

- $m = 3$ critérios;
- $p = 2$ alternativas;
- $n = 4$ regras na tabela de decisão subjacente;
- $q = 2$ funções auxiliares em \mathcal{FM} ;
- $nf = 2$ funções adaptativas foram definidas:
- $\mathcal{F}1$ e $\mathcal{F}2$ cada uma com $na = 6$ elementos;
- $\mathcal{F}1$ com $nc = 2$ ações adaptativas elementares e $\mathcal{F}2$ com $nc = 3$.

O consumo de memória necessário para a construção da $TDAE$ (ver 4.4), inicialmente, é de:

$$te = [m + p + q + \sum_{i=1}^{nf} (2 + na_i)] * [n + \sum_{i=1}^{nf} (1 + nc_i)]$$

No exemplo, $te = 23 * 11$, indicando que é uma matriz composta de 23 linhas e 11 colunas.

Durante a execução do algoritmo de decisão da $TDAE$, uma avaliação simples de consumo de memória indica que:

- uma matriz $E_{3 \times 3}$ é criada para que o decisor faça os julgamentos entre os critérios;
- outras 3 matrizes $MC_{2 \times 2}$ são criadas para os julgamentos das alternativas em relação aos critérios, para gerar os elementos da matriz $Z_{2 \times 3}$ de desempenho das alternativas;
- vetores w e ax armazenam os pesos dos 3 critérios e das 2 alternativas do problema;
- outros vetores e valores auxiliares são exigidos para a execução das funções auxiliares.

Essa avaliação indica que o consumo de espaço de memória, mais significativo, exigido para a execução do algoritmo da $TDAE$, depende da quantidade de

critérios e de alternativas e do número de regras. O número de colunas da *TDAE* é modificado por ações adaptativas de inclusão e exclusão de regras, o que pode ocasionar em um aumento, de até 2^m , ou redução de espaço de memória.

A avaliação do tempo de execução do algoritmo de tomada de decisão da *TDAE* é apresentada a seguir.

No exemplo dado, o tempo dos passos dos módulos I e II não sofre modificação em relação ao estudo feito no item 4.4.2, uma vez que dependem dos valores de m , n e p . Logo, os tempos de cada módulo são dados por:

módulo I: $tp_{MI} = \alpha_1 + (\beta + n) * (m + p) + n * (k2 + (m + p) * \delta)$, na qual $m = 3$, $n = 4$ e $p=2$, resultando em uma constante, acrescida dos custos fixos:

$$tp_{MI} = 20 + \alpha_1 + 5\beta + 4k2 + 20\delta.$$

módulo II: $tp_{MII} = \alpha_{13} * n^2 + \alpha_{14} * m^2 + \alpha_{15} * p^2 + \alpha_9 * (m * p^2) + \alpha_{10} * p + \alpha_{12} * (n * m) + \alpha_8$:

$$tp_{MII} = \alpha_8 + 12(\alpha_9 + \alpha_{12}) + 2\alpha_{10} + 16\alpha_{13} + 9\alpha_{14} + 4\alpha_{15}.$$

A avaliação do número de instruções para a entrada da regra a ser consultada, passo III.2, também não sofre alteração no tempo, pois depende do número de critérios: $\alpha_{23} * m$, ou proporcional a $m = 3$.

Contudo, o módulo III é avaliado a seguir, pois o número de instruções de cada um dos passos dos algoritmos deste módulo pode se alterar, em razão do método multicritério adotado.

No exemplo dado, no passo III.1 foram definidas duas funções adaptativas, cujo espaço de memória já foi avaliado, anteriormente.

O tempo estimado para a montagem da camada adaptativa da *TDAE* é dado por:

$$tp_{fase1} = \alpha_{21} * \sum_{i=1}^{nf} na_i + \alpha_{18} * \sum_{i=1}^{nf} (nc_i * na_i) + \alpha_{19} * (m + p + q) + \alpha_{19} * [\sum_{i=1}^{nf} (2 + na_i) * \sum_{i=1}^{nf} (nc_i + 2)] + \alpha_{22}$$

$$t_{\text{fase1}} = 30\alpha_{18} + 151\alpha_{19} + 12\alpha_{21} + \alpha_{22}.$$

A exigência de tempo para a execução do algoritmo para o uso da *TDAE* é estimada na seqüência.

Neste exemplo, o algoritmo da primeira função auxiliar em *FM* foi executado, conforme descrito a seguir.

Atribuição dos pesos w_i aos critérios da regra *rcc*:

Para $i = 1$ até m (nº de critérios)

para p_i $\left\{ \begin{array}{l} \text{associa-se o peso } w_i, \text{ se } p_i = \text{"S"} \\ \text{associa-se o valor } 0, \text{ se } p_i = \text{"N"} \end{array} \right.$

Fim para

Cálculo da soma (sp) dos pesos associados.

Determinação da alternativa para a regra *rcc*:

Para $j = 1$ até p (nº de alternativas)

cálculo do valor Y_{rcc} associado à regra, obtido pelo produto $sp * ax_j$ (valor de categorização da alternativa a_j)

// para obter qual alternativa atribuir para a regra

Fim para

O valor Y_{rcc} é obtido, indicando o peso da regra *rcc*, e, simultaneamente, a alternativa a_j associada à expressão é escolhida para a regra.

O tempo necessário estimado para a função auxiliar é dado por:

$$t_{FM1} = \beta_1 * m + \beta_2 * (\text{soma dos pesos}) + \beta_3 * p + \beta_4 = (\beta_1 + \beta_2) * m + \beta_3 * p + \beta_4$$

$$t_{FM1} = \beta_5 * m + \beta_3 * p + \beta_4$$

$$t_{FM1} = 3\beta_5 + 2\beta_3 + \beta_4.$$

Uma segunda função auxiliar em \mathcal{FM} combina regras redundantes para gerar apenas uma regra, cujo algoritmo é descrito:

Criação de uma única regra para regras assinaladas como redundantes:

- verificação dos critérios indiferentes, para atribuir “-“ ou branco;
- para os outros critérios, atribuir o valor existente;
- atribuição dos outros elementos da regra, tais como suas alternativas.

O tempo necessário estimado para esta função auxiliar é dado por:

$$t_{FM2} = \beta_6 * (\text{no máximo } m-1 \text{ critérios indiferentes}) + \beta_7 * (\text{no mínimo } 1 \text{ critério}) \\ + \beta_8 * (\text{linhas restantes}).$$

No exemplo, a segunda função auxiliar foi executada duas vezes, logo a estimativa de tempo t_{FM2} resulta:

$$t_{FM2} = 4\beta_6 + 2\beta_7 + 4\beta_8.$$

Há uma terceira função auxiliar de \mathcal{FM} chamada para reordenar a \mathcal{TDAE} , segundo os pesos das regras.

Na configuração t_0 da tabela:

- ordena-se o vetor dos pesos Y das regras da tabela, quando os pesos foram calculados no início do processo;
- ordenam-se as regras da \mathcal{TDAE} , de acordo com a ordenação de Y .

Antes da inclusão de uma nova regra:

- pesquisa-se Y_{rcc} no vetor Y que contém os pesos das regras da tabela, para determinar a posição da regra rcc a ser inserida;
- encontrada a posição, deslocam-se os elementos do vetor Y para inserção de Y_{rcc} no vetor;
- as regras da tabela de decisão, também sofrem deslocamentos para a inserção da regra rcc .

Tempo consumido para a execução da terceira função auxiliar:

- ordenação do vetor Y e das regras da $TDAE$: $\beta_9 * n^2$, considerando o pior caso; estas ordenações são executadas apenas uma vez;
- pesquisa para encontrar a posição da nova regra: tempo consumido é de no máximo $\beta_{10} * n$, onde n é o número de regras;
- deslocamentos dos elementos do vetor Y e das regras da tabela: tempo exigido de $\beta_{11} * (n-i)$, onde $i+1$ é a posição.

Tem-se a seguinte expressão para o tempo da função auxiliar:

$$t_{FM3} = \beta_9 * n^2 \text{ (uma única vez)} + \beta_{10} * n + \beta_{11} * (n-i).$$

Neste exemplo, o tempo consumido para a terceira função auxiliar é de:

$$t_{FM3} = 16\beta_9 \text{ (para as ordenações iniciais)} + 4\beta_{10} + 2\beta_{11}.$$

O tempo total consumido para executar as três funções auxiliares é dado por:

$$t_{FM} = t_{FM1} + t_{FM2} + t_{FM3} = (3\beta_5 + 2\beta_3 + \beta_4) + (4\beta_6 + 2\beta_7 + 4\beta_8) + (16\beta_9 + 4\beta_{10} + 2\beta_{11}).$$

As próximas estimativas de tempo são relativas às ações adaptativas das funções adaptativas.

Ação adaptativa de consulta de regras

Verificação da existência de regras conflitantes:

Para $i = 1$ até $n-1$ (número de regras atuais da tabela)

 Para $j = i+1$ até n

 Para $k = 1$ até $m+p$

 verifica se os critérios das regras r_i e r_j são iguais

 verifica se as alternativas são diferentes

 Fim para

Caso sejam conflitantes:
 as regras são marcadas para serem excluídas;

Fim para

Fim para

Verificação de regras redundantes:

Para $i = 1$ até $n-1$ (número de regras atuais da tabela)

Para $j = i+1$ até n

Para $k = 1$ até $m+p$

verifica se os critérios das duas regras são indiferentes

verifica se as alternativas das regras r_i e r_j são iguais

Fim para

Se r_i e r_j são redundantes, então são marcadas como redundantes;

Fim para

Fim para

Na rotina da ação adaptativa de consulta à regra na *TDÆ*, o tempo exigido é dado pela verificação de regras conflitantes e redundantes: $\beta_{12} * (n-1) * (n-i-1) * (m+p)$.

Ação adaptativa de inclusão de regras

Um valor é gerado para g , para criar uma coluna na tabela.

Inclui a nova regra na tabela de decisão adaptativa.

Tempo para execução da ação adaptativa de inclusão: $\beta_{13} * (\text{inclusão de uma regra})$.

Ação adaptativa de exclusão de regras

Marcar a coluna da regra a ser excluída da tabela ou, opcionalmente, remover a coluna da tabela.

Tempo para execução da ação adaptativa de exclusão: $\beta_{14} * (\text{exclusão de uma regra})$.

O tempo total exigido para a execução das ações adaptativas, se houver, é dado por:

$$t_{ad} = [\beta_{12} * (n-1) * (n-i-1) * (m+p)] + [\beta_{13} * (\text{inclusão de uma regra})] + [\beta_{14} * (\text{exclusão de uma regra})].$$

Para o exemplo, o tempo de execução das ações adaptativas resulta:

$$t_{ad} = 15\beta_{12} + 3\beta_{13} + 5\beta_{14}.$$

Logo, o tempo consumido pela fase 2 (ver 4.4) para o uso da *TDAE* resulta em:

$$tp_{\text{fase2}} = \alpha_{23} * m + \alpha_{25} * m + \alpha_{24} * (n * m) + t_{FM} + tp_{ad}$$

$$tp_{\text{fase2}} = 3\alpha_{23} + 3\alpha_{25} + 12\alpha_{24} + t_{FM} + tp_{ad}.$$

Para o módulo III, o tempo de execução consumido é dado por:

$$tp_{MIII} = tp_{\text{fase1}} + tp_{\text{fase2}}$$

$$tp_{MIII} = (30\alpha_{18} + 151\alpha_{19} + 12\alpha_{21} + \alpha_{22}) + (3\alpha_{23} + 3\alpha_{25} + 12\alpha_{24} + t_{FM} + tp_{ad}).$$

As avaliações de tempo consumido, neste exemplo, mostram a ordem de grandeza aproximada do número de instruções de cada passo do algoritmo. Pode-se concluir que os tempos dependem das entradas, porém não há uma relação no comprimento entre o tamanho das entradas, e dependem do número de funções auxiliares e funções adaptativas utilizadas.

No próximo capítulo, é feita a descrição de uma implementação do software da *TDAE*.

6 IMPLEMENTAÇÃO DA *TDAE*

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma implementação de um protótipo da *TDAE*, para apoiar aplicações práticas em processos de tomada de decisão, que envolvam múltiplos critérios.

O projeto do software *TDAE*¹⁴ tem como alicerce a formulação da Tabela de Decisão Adaptativa Estendida e o algoritmo de tomada de decisão multicritério, definidos no Capítulo 4. O ambiente computacional inclui recursos para a execução dos módulos do algoritmo descrito, em uma única janela ou em várias telas expandidas. A figura 31 apresenta numa única tela, a interface da *TDAE* com seus principais componentes.

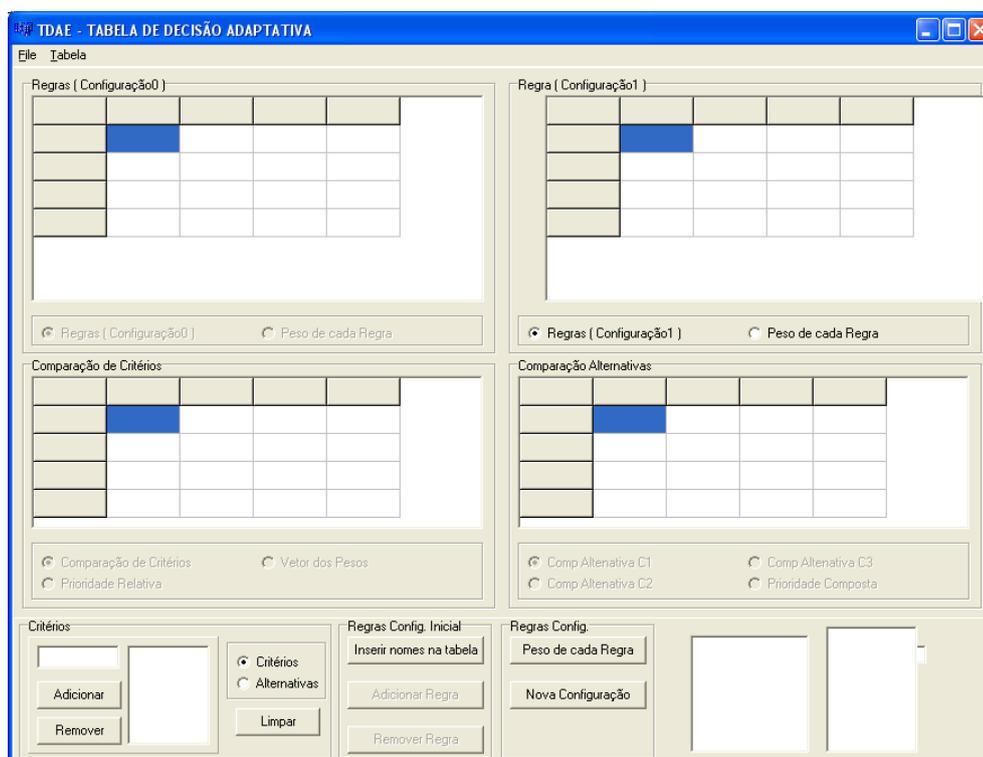


Figura 31 – Interface inicial da *TDAE*

¹⁴ O software *TDAE* foi implementado na linguagem C++ Builder, versão 6.0 da Borland Software Corporation.

Deve-se observar que na atual versão, por questões de simplificação e facilidade de operação para o usuário final, a camada adaptativa não é exibida.

A especificação do software *TDÆ* é apresentada na seqüência deste trabalho, e optou-se pela expansão das várias telas, para que as características das interfaces e da operação do software pudessem ser descritas de forma mais detalhada.

6.1 INTERFACE E EXECUÇÃO DA *TDÆ*

A interface do software *TDÆ* possibilita a visualização dos resultados mais relevantes do algoritmo de tomada de decisão. Essa característica permite ao decisor acompanhar, passo-a-passo, a execução dos módulos I, II e III, servindo como suporte ao processo decisório.

MÓDULO I

O módulo I, cuja interface inicial do software *TDÆ* é mostrada na figura 32, permite a entrada dos critérios e das alternativas do problema de tomada de decisão.

Ao escolher a opção **Critérios**, o decisor pode inserir cada um dos critérios que fazem parte do problema de decisão e adicionar na lista para visualizar as entradas. No caso em que deseje remover algum critério, basta selecioná-lo na lista e clicar no botão **Remover**. Da mesma maneira, o decisor pode inserir ou remover cada alternativa.

O método multicritério a ser adotado no algoritmo, também pode ser inserido pelo decisor. Na versão preliminar do software, o método multicritério escolhido foi o AHP.

O botão **Limpar Lista** possibilita ao decisor remover todos os critérios ou todas as alternativas inseridas.



Figura 32 - Tela para a entrada dos critérios e das alternativas

Ao clicar no botão **Inserir na TDAE**, uma nova janela (figura 33) é aberta mostrando a tabela de decisão subjacente, composta pelos critérios e pelas alternativas inseridas.



Figura 33 - Configuração inicial t_0 da tabela de decisão subjacente

Com os critérios e as alternativas na *TDAE*, o decisor insere as regras da tabela clicando no botão **Inserir Regras**.

Após a conclusão da inserção das regras, o módulo II do algoritmo é executado quando o decisor clica no botão **Comparações Paritárias**.

Módulo II

A tela da figura 34 permite que o decisor julgue os critérios aos pares, obedecendo a escala de Saaty (ver capítulo 4). Conforme a entrada dos valores de preferência, a matriz de julgamentos recíproca é criada.



Figura 34 - Tela para o decisor julgar os critérios

Ao clicar no botão **Peso dos critérios**, a matriz de julgamentos é normalizada, o vetor dos pesos dos critérios é determinado e a consistência dos julgamentos é executada. Caso haja alguma inconsistência, surge um aviso para que o decisor reveja os julgamentos. O vetor com os pesos é mostrado na mesma tela.

Em seguida, é possível fazer as comparações entre as alternativas, tendo como referência cada um dos critérios. Para isso, o decisor clica no botão **Comparações entre Alternativas** para que a tela da figura 35 seja mostrada. As opções de critérios, que aparecem na tela, dependem de quantos são no problema.

Para cada critério selecionado, uma nova matriz (janela) é mostrada, possibilitando ao usuário inserir os valores de preferência entre as alternativas.

TDAAE - TABELA DE DECISÃO ADAPTATIVA

COMPARAÇÃO ENTRE AS ALTERNATIVAS

EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO

C1

C2

C3

Desempenho Global

Figura 35 - Matriz de comparação das alternativas diante do critério escolhido

Após a inserção de todas as comparações, o decisor pode visualizar a matriz de desempenho das alternativas ao clicar o botão **Desempenho Global**.

A tela (figura 36) apresenta a matriz de desempenho de cada alternativa em relação ao conjunto de critérios, permitindo ao decisor visualizar os seus julgamentos, de forma resumida e no todo.

TDAAE - TABELA DE DECISÃO ADAPTATIVA

Matriz de desempenho das alternativas

Critérios

Alternativas				

Valores globais

Tabela de decisão

Figura 36– Matriz de desempenho das alternativas

A partir dessa matriz de desempenho, o valor global, que indica a importância relativa de cada alternativa, pode ser determinado ao se clicar no botão **Valores globais**. O vetor que contém os valores globais das alternativas é mostrado na mesma tela da figura 36.

Quando o decisor clica no botão **Tabela de decisão**, as regras da tabela de decisão são ordenadas, de acordo com o peso de cada uma. O peso de cada regra depende dos pesos dos critérios e dos valores globais das alternativas que a compõe. A partir dos pesos das regras, a *TDAE* apresenta uma nova configuração (figura 37) da tabela.



Figura 37 – Tabela de decisão com as regras ordenadas

Opcionalmente, o decisor pode clicar no botão **Peso das regras** para ver na tela os pesos de cada regra da *TDAE*.

O botão **Consulta** permite que o decisor faça consultas de regras (figura 38).



Figura 38 – Consulta a uma regra específica

Após a especificação dos critérios da regra a ser consultada, o botão **Procurar** pode ser clicado para que a regra seja procurada na *TDÆ*. O software executa uma busca na tabela para procurar a regra. Ao se clicar no botão **Posição**, caso a regra seja encontrada, uma mensagem mostra sua posição na tabela de decisão. No caso da regra não ser encontrada, a mensagem correspondente é exibida, e são executadas as ações adaptativas de inclusão e exclusão de regras. Ao se clicar no botão **Fechar consulta**, uma nova configuração da *TDÆ* é apresentada como a da figura 37. O botão **Limpar** possibilita ao usuário corrigir os dados da regra a ser consultada.

O conjunto das funções auxiliares *FM* é definido e implementado de acordo com o método multicritério adotado, e não é mostrado para o usuário.

O software *TDÆ* também possui opção para salvar a tabela de decisão na sua configuração inicial, para que o decisor possa reavaliar os critérios e as alternativas do problema de decisão multicritério. A última configuração da tabela pode ser salva para que outras consultas possam ser realizadas, a partir dela.

6.2 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO SOFTWARE *TDÆ*

Para ilustrar a operação do software *TDÆ*, o seguinte exemplo foi extraído e adaptado de Saaty (1991, p. 32), que trata de um problema de decisão de seleção de uma escola.

Três escolas secundárias A, B e C são analisadas, segundo os julgamentos de um decisor, de acordo com a satisfação proporcionada aos alunos. Seis critérios independentes foram selecionados para comparação:

C1 – Aprendizado; C2 – Colegas; C3 – Vida escolar; C4 – Treinamento vocacional; C5 – Preparação universitária e C6 – Aulas de música.

Aplicando o método AHP, a figura 39 apresenta os elementos que compõem os níveis da estrutura hierárquica do problema de decisão multicritério.

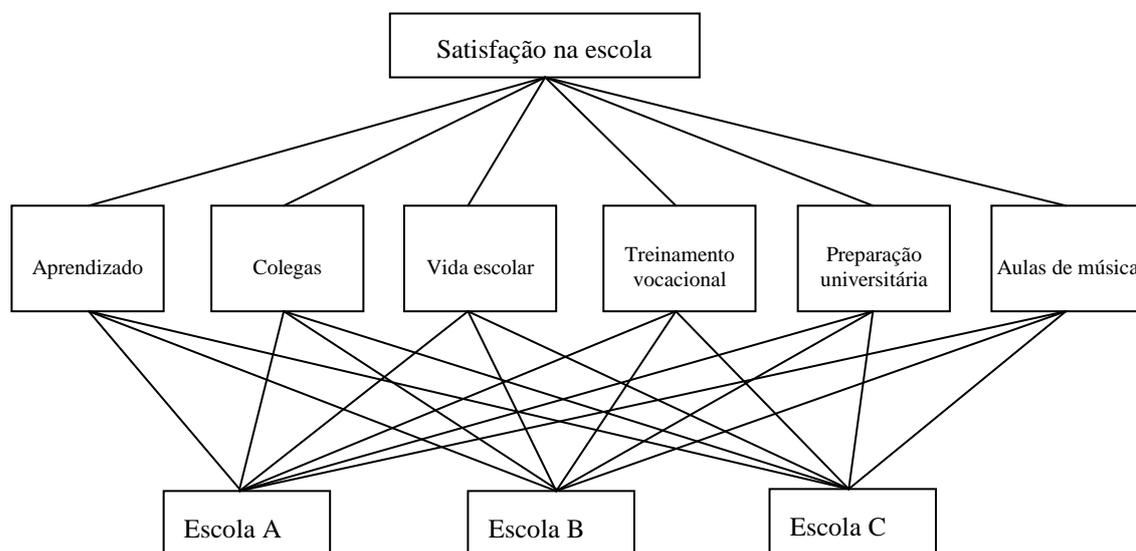


Figura 39 – Hierarquia da satisfação na escola (Fonte: Saaty, 1991)

Os critérios e as alternativas do problema podem ser implementados no software *TDAE*, a partir da interface inicial mostrada na figura 40:

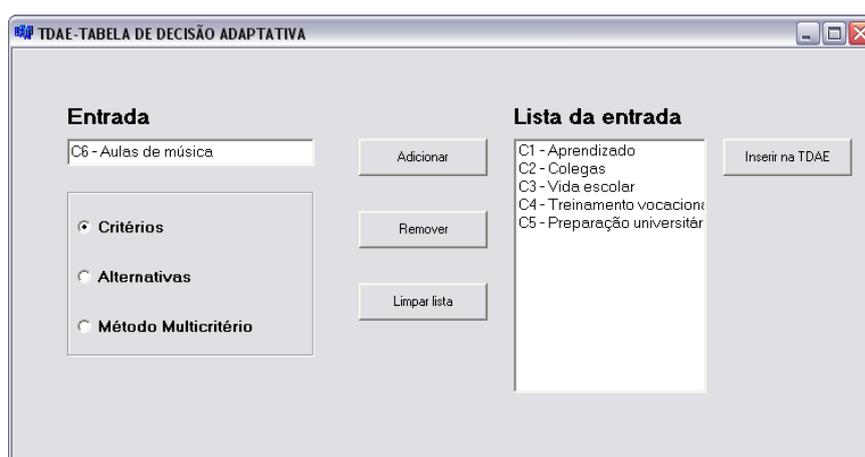


Figura 40 – Entrada dos critérios e das alternativas do problema

Após a inserção dos dados do problema de decisão, uma tabela de decisão composta por um conjunto de regras pode ser criada pelo decisor, como por exemplo, a mostrada na figura 41:

		R1	R2	R3	R4	R5	R6
Critério	C1 - Aprendizagem	S	S	N	N	S	S
	C2 - Colegas	S	S	S	S	N	S
	C3 - Vida escolar	S	N	S	N	S	N
	C4 - Treinamento	S	N	S	N	S	S
	C5 - Preparação	N	S	N	N	S	N
	C6 - Aulas de reforço	N	S	S	S	N	S
Alternativa	A1 - Escola A	X					X
	A2 - Escola B		X			X	
	A3 - Escola C			X	X		

Figura 41 – Tabela de decisão subjacente inicial

Concluídos os passos do módulo I do algoritmo com a geração da tabela de decisão, são executados os passos do módulo II, que consistem nos julgamentos e obtenção dos pesos dos critérios e valores de desempenho das alternativas.

Neste exemplo, as comparações entre os critérios são mostradas na figura 42, na qual o decisor julga os critérios aos pares, obtendo a matriz de julgamentos recíproca.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	7	7	5	1	9
C2	0,1428571428571	1	3	0,2	0,1666666666666	3
C3	0,1428571428571	0,3333333333333	1	0,25	0,2	3
C4	0,2	5	4	1	0,2	5
C5	1	6	5	5	1	9
C6	0,1111111111111	0,3333333333333	0,3333333333333	0,2	0,1111111111111	1

Figura 42 – Matriz de julgamentos entre os critérios

Após a verificação da consistência dos valores de julgamento, os pesos de cada critério são calculados e apresentados (figura 43), junto à matriz de julgamentos normalizada.

TDAA-TABELA DE DECISÃO ADAPTATIVA

COMPARAÇÃO ENTRE CRITÉRIOS

	C1	C2	C3	C4	C5	C6		
C1	1	7	7	5	1	9		
C2	0,1428571428571	1	3	0,2	0,1666666666666	3		
C3	0,1428571428571	0,3333333333333	1	0,25	0,2	3		
C4	0,2	5	4	1	0,2	5		
C5	1	6	5	5	1	9		
C6	0,1111111111111	0,3333333333333	0,3333333333333	0,2	0,1111111111111	1		
Total	2,5968255996704	19,666666030883	20,333333969116	11,649999618530	2,6777777671814	30		
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Prio Relativa	Vet
C1	0,3850855444920	0,3559322148963	0,3442622843175	0,4291845634095	0,3734439848802	0,3	0,3646514415740	2,5
C2	0,0550122206417	0,0508474592709	0,1475409789932	0,0171673825363	0,0622406641467	0,1	0,0721347828706	0,4
C3	0,0550122206417	0,0169491530903	0,0491803263310	0,0214592281704	0,0746887969760	0,1	0,0528816183408	0,3
C4	0,0770171088984	0,2542372963545	0,1967213053243	0,0858369126819	0,0746887969760	0,1666666666666	0,1425280074278	0,9
C5	0,3850855444920	0,3050847556254	0,2459016316554	0,4291845634095	0,3734439848802	0,3	0,3397834300994	2,3

Peso dos critérios

Comparações entre Alternativas

Exibir/Ocultar Vetor dos Pesos

Figura 43 – Matriz de julgamentos normalizada e pesos dos critérios

De acordo com o julgamento do decisor, o vetor com os pesos de cada critério representa a importância relativa de cada um. Neste exemplo, os pesos resultantes indicam que os critérios relacionados ao aprendizado e à preparação universitária têm maior importância em relação aos outros:

Aprendizado: 0.364651 – Colegas: 0.072135 – Vida escolar: 0.052882 –
 Treinamento vocacional: 0.142528 – Preparação universitária: 0.339783 – Aulas de
 música: 0.028021.

De acordo com o método AHP, em seguida, as alternativas são comparadas aos pares, tendo como referência cada um dos critérios. As comparações feitas pelo decisor, no exemplo, são apresentadas na figura 44:

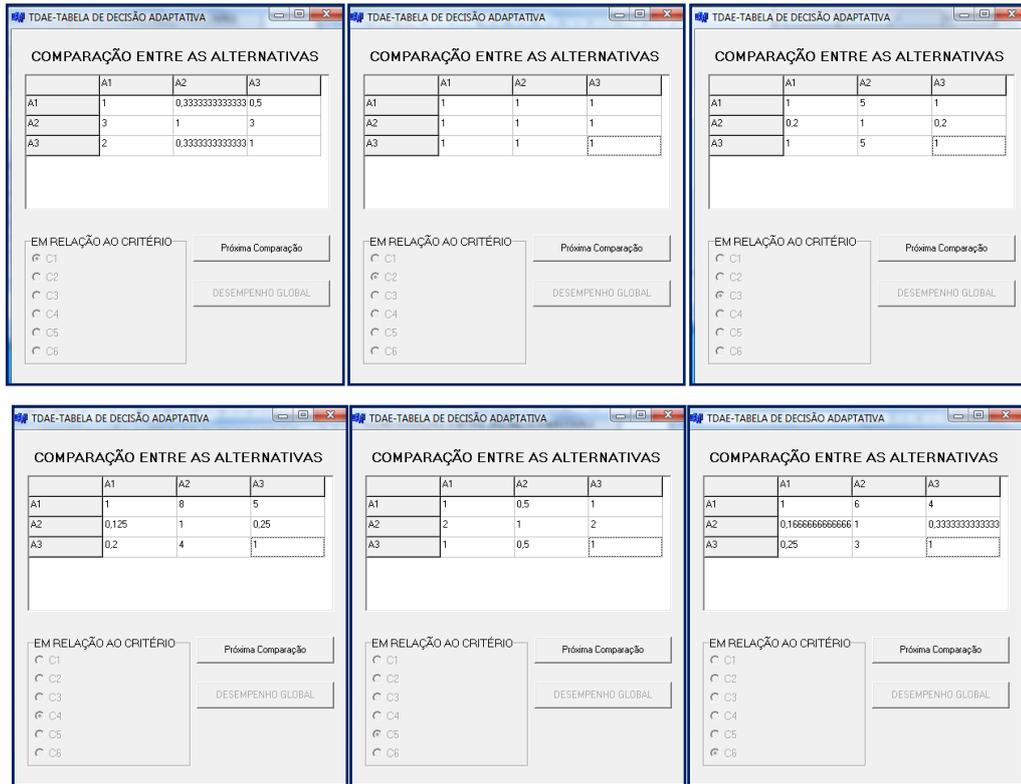


Figura 44 – Matrizes de comparação das alternativas em relação a cada um dos critérios

O software *TDAE* permite que o decisor obtenha o desempenho global de cada alternativa (figura 45):

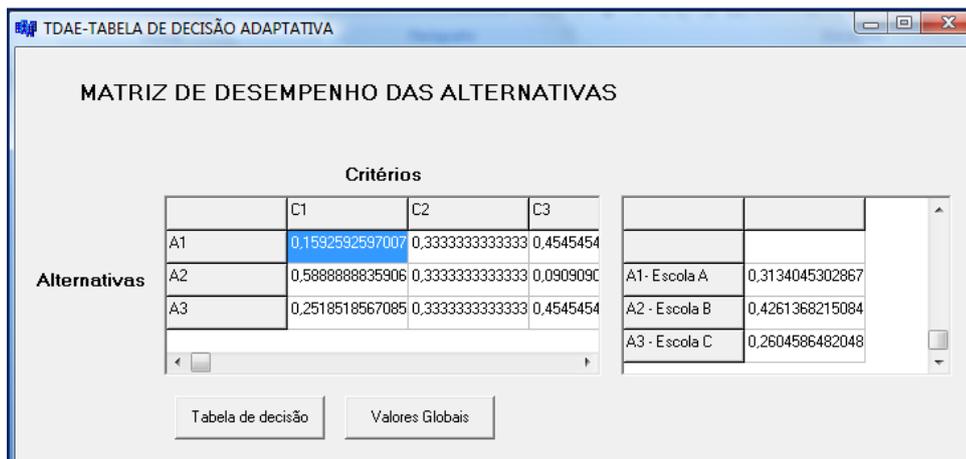


Figura 45 – Matriz de desempenho das alternativas

Os valores globais das alternativas indicam a ordem de importância ou preferência relativa de cada uma. No exemplo, a Escola B é a que tem maior importância para o

decisor, seguida pela Escola A e pela Escola C, representadas pelos valores globais: Escola A: 0.3134045 – Escola B: 0.4261368 – Escola C: 0.2604586.

A partir dos pesos dos critérios e dos valores globais das alternativas, são determinados os pesos de cada uma das regras da tabela de decisão subjacente inicial, que permitem ordená-las. A figura 46 mostra a tabela de decisão com as regras ordenadas.

		R5	R2	R1	R6	R3	R4
Critério	C1 - Aprendizado	S	S	S	S	N	N
	C2 - Colegas	N	S	S	S	S	S
	C3 - Vida escolar	S	N	S	N	S	N
	C4 - Treinamento	S	N	S	S	S	N
	C5 - Preparação u	S	S	N	N	N	N
	C6 - Aulas de mús	N	S	N	S	S	S
Alternativa	A1 - Escola A			X	X		
	A2 - Escola B	X	X				
	A3 - Escola C					X	X

Figura 46 – Regras ordenadas na tabela de decisão

Opcionalmente, o decisor pode visualizar os pesos das regras (figura 47):

	R5	R2	R1	R6	R3	R4
C1 - Aprendizado	0,3646514415740	0,3646514415740	0,3646514415740	0,3646514415740	0	0
C2 - Colegas	0	0,0721347828706	0,0721347828706	0,0721347828706	0,0721347828706	0,0721347828706
C3 - Vida escolar	0,0528816183408	0	0,0528816183408	0	0,0528816183408	0
C4 - Treinamento	0,1425280074278	0	0,1425280074278	0,1425280074278	0,1425280074278	0
C5 - Preparação u	0,3397834300994	0,3397834300994	0	0	0	0
C6 - Aulas de mús	0	0,0280207296212	0	0,0280207296212	0,0280207296212	0,0280207296212
	0,8998445272445	0,8045904040336	0,6321958893497	0,6073349714279	0,2955651581287	0,1001555174589
A1 - Escola A	0	0	0,1981330559389	0,1903415314471	0	0
A2 - Escola B	0,3834568866917	0,3428655973910	0	0	0	0
A3 - Escola C	0	0	0	0	0,0769825015426	0,0260863706876

Figura 47 – Pesos das regras ordenadas na tabela de decisão

O módulo III do algoritmo que possibilita ao decisor fazer consultas na tabela de decisão, pode ser executado no software *TDAE* por meio da janela de consulta, na

qual o decisor introduz os parâmetros da regra a ser consultada (figura 48), por exemplo:

The screenshot shows a window titled "TDAE - TABELA DE DECISÃO ADAPTATIVA" with a sub-window titled "REGRA A CONSULTAR". It contains two tables of criteria and alternatives, and buttons for "Procurar", "Peso", "Limpar", and "Fechar consulta".

REGRA A CONSULTAR	
C1 - Aprendizado	N
C2 - Colegas	N
C3 - Vida escolar	S
C4 - Treinamento	S
C5 - Preparação u	N
C6 - Aulas de mús	S
A1 - Escola A	
A2 - Escola B	
A3 - Escola C	

Figura 48 – Regra a ser consultada na tabela de decisão

O software *TDAE* busca a regra na tabela de decisão e não a encontrando, apresenta uma janela com a mensagem correspondente (figura 49):

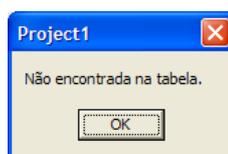


Figura 49 – Mensagem de regra não encontrada

A partir dos pesos dos critérios e dos valores globais das alternativas, uma função auxiliar é executada para determinar a alternativa mais provável para a regra procurada, cuja resposta é apresentada pelo software *TDAE* (figura 50):

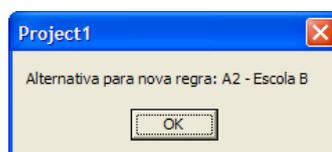


Figura 50 – Alternativa para a nova regra

Uma ação adaptativa de inclusão de regra é executada e uma nova configuração da tabela de decisão é apresentada (figura 51):

TABELA DE DECISÃO ORDENADA

		R7	R5	R2	R1	R6	R3	R4
Critério	C1 - Aprendizado	N	S	S	S	S	N	N
	C2 - Colegas	N	N	S	S	S	S	S
	C3 - Vida escolar	S	S	N	S	N	S	N
	C4 - Treinamento	S	S	N	S	S	S	N
	C5 - Preparação u	N	S	S	N	N	N	N
	C6 - Aulas de mús	S	N	S	N	S	S	S
Alternativa	A1 - Escola A				X	X		
	A2 - Escola B	X	X	X				
	A3 - Escola C							

Buttons: Peso das Regras, Consulta, Tabela Simplificada, Config. Inicial, Sair

Figura 51 – Nova configuração da tabela de decisão

Em seguida, *TDAE* executa outra ação adaptativa de consulta para verificar a existência de regras redundantes, que são excluídas por meio da execução de ações adaptativas de exclusão de regras. Uma função auxiliar cria uma nova regra, resultante da combinação das regras redundantes, que é inserida na tabela de decisão pela execução de uma ação adaptativa de inclusão de regras (figura 52):

TABELA DE DECISÃO ORDENADA E SIMPLIFICADA

		R7+R5	R2	R1+R6	R3+R4
Critério	C1 - Aprendizado	-	S	S	N
	C2 - Colegas	N	S	S	S
	C3 - Vida escolar	S	N	-	-
	C4 - Treinamento	S	N	S	-
	C5 - Preparação u	-	S	N	N
	C6 - Aulas de mús	-	S	-	S
Alternativa	A1 - Escola A			X	
	A2 - Escola B	X	X		
	A3 - Escola C				X

Buttons: Fechar Janela, Sair

Figura 52 – Configuração da tabela de decisão simplificada

A partir da nova configuração da tabela de decisão, o decisor pode executar outras consultas ou encerrar o processo, salvando a tabela de decisão final.

6.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O SOFTWARE *TDÆ*

O software *TDÆ* foi implementado para ser utilizado por um decisor, ou especialista do problema de decisão multicritério particular, não necessitando dele algum conhecimento sobre técnicas adaptativas. É uma ferramenta que emprega tabelas de decisão convencionais, que facilita a estruturação e a compreensão do problema de tomada de decisão.

Na versão apresentada, o método multicritério que apóia o algoritmo de decisão é o AHP, implementado no software, para efeito de ilustração. Essa versão, no entanto, está limitada a três níveis de decisão. Apesar dessa restrição, o software pode ser útil como ferramenta de apoio ao ensino e aprendizagem de processos decisórios multicritério e de dispositivos adaptativos.

Novas versões do software podem ser desenvolvidas, por exemplo, para possibilitar a integração da *TDÆ* com outro software que gere automaticamente a tabela de decisão subjacente inicial, e apresente os critérios de um problema particular de decisão, obtidos por algum processo de reconhecimento de padrões numa base de dados de uma organização.

Na formulação original da *TDÆ*, o método multicritério pode ser especificado pelo usuário e nesse caso, por exemplo, uma solução para a sua implementação no software *TDÆ* seria a concepção de uma linguagem específica, que poderia ser compilada automaticamente e integrada às ações adaptativas, e, opcionalmente, a ferramenta poderia exibir o mecanismo adaptativo para o usuário.

No capítulo seguinte, são apresentadas as conclusões da tese e sugestões para futuros trabalhos.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho é apresentada a formulação de uma extensão das tabelas de decisão adaptativas. O dispositivo *TDÆ* é originado pela combinação de tabelas de decisão convencionais, métodos multicritério e técnicas adaptativas. Mostra como esse dispositivo adaptativo, pelo seu caráter genérico e com aplicabilidade na tomada de decisão, pode representar mais uma alternativa de dispositivo para apoiar o processo decisório de problemas de decisão multicritério.

O algoritmo de tomada de decisão multicritério da *TDÆ* integra o uso de métodos multicritério e técnicas adaptativas que, por meio das regras iniciais, apresentam o conhecimento nelas contidas. Para situações não previstas, no caso de regras não encontradas na tabela, a *TDÆ* procura apresentar soluções para elas, a partir dos dados existentes, da execução da lógica interna e das novas informações.

Deve-se observar que a formulação da *TDÆ* possui limitações para determinados problemas de decisão. As ações adaptativas na *TDÆ* atuam sobre o conjunto de regras, alterando o número de regras, agindo, portanto, nas colunas da tabela de decisão adaptativa. Existem, porém, problemas de tomada de decisão e métodos multicritério, por exemplo, ELECTRE e PROMETHEE, até mesmo o AHP, que exigem que critérios e/ou alternativas sejam excluídos do conjunto original, e novos critérios e novas alternativas sejam incluídos (DAGDEVIREN, 2008). A adaptatividade da *TDÆ* formulada permite apenas operações envolvendo regras (colunas) e não considera modificações sobre as linhas da tabela de decisão subjacente. Outros tipos de operações desejados não estão diretamente disponíveis na formulação da *TDÆ* e devem ser simulados usando apenas operações básicas sobre as colunas.

Cabe ressaltar também, que o uso de métodos multicritério apresenta um comportamento que impõe restrições quanto à quantidade de critérios e alternativas do problema de decisão, pois o número de comparações entre eles, aos pares, pode crescer muito rapidamente com o tamanho das matrizes, influenciando na resposta

do algoritmo proposto no tempo e no espaço. Além disso, a adição ou eliminação de algum critério ou alternativa pode afetar significativamente os julgamentos do decisor, e em consequência os pesos e a ordem de preferência dos mesmos.

Este trabalho traz contribuições nos aspectos teóricos da Tecnologia Adaptativa e no incremento de aplicações práticas de soluções adaptativas, que são apresentadas no próximo item.

7.1 CONTRIBUIÇÕES

A formulação da *TDÆ* aplicada para decisões multicritério pode ser considerada multidisciplinar, por integrar fundamentos adaptativos, métodos de tomada de decisão multicritério e modelos tradicionais, tais como as tabelas de decisão, o que contribui nos aspectos teóricos dessas áreas. Em particular, para a área da Tecnologia Adaptativa, este trabalho contribui, principalmente, no fato de que representa um importante estudo do uso de técnicas adaptativas em aplicações envolvendo problemas de tomada de decisão multicritério.

A *TDÆ* estabelece a consistência entre os conceitos teóricos envolvidos, ao incorporar métodos multicritério para o apoio à decisão e o conceito de adaptatividade para os ajustes necessários na busca de soluções para novas regras de um problema de decisão. A *TDÆ* se mostra como uma alternativa prática de especificação e análise de problemas de decisão, cujo comportamento é dinâmico e varia no decorrer de sua operação.

Do ponto de vista de implementação, uma interessante contribuição pragmática pode ser identificada na inclusão do conceito de funções auxiliares, que operam como interface entre a implementação conceitual das tabelas de decisão adaptativas originais e os programas de tomada de decisão nelas baseadas. Isto é feito permitindo-se a substituição de trabalhosos algoritmos envolvendo elementos básicos da tabela de decisão adaptativa (regras) por algoritmos equivalentes mais

eficientes, externamente implementados (simulados) usando linguagens de programação convencionais, e a integração de tais algoritmos ao mecanismo de decisão e de automodificação das tabelas de decisão adaptativas.

Na área da Tecnologia Adaptativa, a *TDAE* mostra que as tabelas de decisão adaptativas, originalmente definidas por Neto (2001), podem ser estendidas de várias maneiras com vantagens práticas, tornando-se viáveis para outras aplicações de problemas de decisão que envolvam ou não múltiplos critérios. Por exemplo, para problemas de otimização, as tabelas de decisão adaptativas podem sugerir interessantes modificações na forma de resolução do problema, por meio da incorporação de técnicas adaptativas às funções tradicionais, e podendo alterar, tanto a quantidade de variáveis, quanto o seu conjunto de restrições, de forma autônoma e dinâmica.

Outra contribuição conceitual está contida no Capítulo 4, no qual se faz um breve estudo do desempenho do algoritmo de tomada de decisão usando a *TDAE*, do qual resultaram expressões analíticas, representando o tempo de processamento e a quantidade de espaço necessário para a execução do algoritmo proposto.

No aspecto prático, o software *TDAE*, implementado na versão mais simples, procura aproveitar os recursos das tabelas de decisão convencionais, para facilitar o seu uso por um usuário não especializado em computação ou nas técnicas adaptativas, e procura enfatizar a flexibilidade e a adaptabilidade de acomodar mudanças durante o processo decisório.

Uma contribuição adicional tecnológica consiste na disponibilização de uma ferramenta para ensaio de tabelas de decisão adaptativas, bem como dos correspondentes programas que a constituem, que podem ser acoplados de maneira relativamente simples a outros programas.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

A *TDÆ*, que tem como objetivo aplicações nos processos de tomada de decisão multicritério, possibilita a ampliação de sua utilização em várias áreas do conhecimento, como por exemplo, na área da educação para avaliação do processo de ensino-aprendizagem.

Uma sugestão de proposta de continuidade deste trabalho é o da incorporação do conceito de adaptatividade multicamada. Assim, camadas adicionais de adaptatividade poderiam ser anexadas ao dispositivo, ou seja, uma ou mais camadas adaptativas poderiam ser adicionadas sobre a já existente na *TDÆ*, para permitir que, por exemplo, ações adaptativas reduzam ou aumentem o número de critérios e de alternativas, agindo neste caso sobre a quantidade de linhas da *TDÆ*.

Em razão da restrição imposta à *TDÆ* para aplicações de problemas limitados a três níveis de decisão, é interessante que trabalhos futuros considerem estruturas hierárquicas de vários níveis, seguindo a metodologia do método multicritério AHP. É possível representar os diferentes níveis de decisão em tabelas de decisão individuais. Essas tabelas podem ser vinculadas e controladas por meio de uma tabela de decisão principal, na qual existiriam regras cujas condições executariam as chamadas de tabelas de decisão de níveis subseqüentes. As tabelas de decisão vinculadas poderiam ser estáticas, logo, não se alterariam durante o processo, ou adaptativas, para que de forma independente se automodificassem, mudando as regras de cada uma.

Para completar o estudo do desempenho do algoritmo de decisão da *TDÆ*, realizado neste trabalho, mostra-se adequado prosseguir nesta investigação, com a finalidade de comparar o algoritmo da *TDÆ* com algoritmos de decisão existentes, já consolidados e amplamente utilizados, para verificar computacionalmente a sua eficiência, tanto na sua especificação quanto na aplicação prática.

A formulação da *TDAE* pode ser estendida e sua camada adaptativa modificada para suportar decisões em grupo. De acordo com Fülöp (2005), uma decisão em grupo envolve diversos decisores com habilidades, experiências e conhecimentos individuais, e o método multicritério deve sintetizar as decisões do grupo, levando em consideração os diferentes perfis de cada um. Os vários métodos multicritérios, tais como AHP, ELECTRE e PROMETHEE, já possuem estudos estendidos para suportar decisões em grupo, e as pesquisas nessa área buscam formas de medição, que sintetizem e possam representar, o mais próximo possível, os julgamentos dos decisores. Seria interessante que estudos com uso de técnicas adaptativas pudessem, também, seguir nessa linha de pesquisa, pois parece ser bastante promissora.

Com relação ao software *TDAE*, novas versões podem ser geradas, por exemplo, para apoiar problemas de tomada de decisão, que apresentem estruturas hierárquicas de vários níveis, e a implementação de uma linguagem específica que facilite a escolha do método de decisão multicritério adotado na *TDAE*, que ao ser compilada, associa-se aos critérios, às alternativas, às regras e às ações adaptativas.

REFERÊNCIAS

BALESTRIN, A. Uma análise da contribuição de Hebert Simon às Teorias Organizacionais. **Revista de Administração do PPGA**, UFRGS, 2002.

BERTOLI, M.; BRAGLIA, M.; CARMIGNANI, G. Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract. **International Journal of Project Management**, 24 v. Issue 5, p.422-430, 2006.

BINDER, F. V. **Sistemas de Apoio à Decisão**. São Paulo: Érica, 1994.

BÖHM, C., JACOPINI, G. Flow diagrams, turing machines and languages with only two formation rules. **Communications of the ACM**, 9 v. Issue 5, p.366-371, 1966.

BRITES, C. R. C. **Abordagem multiobjetivo na seleção de sistemas de reuso de água em irrigação paisagística no Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado), Publicação PTARH.DM – 112/08, Universidade de Brasília, DF, 2008.

CAMOLESI, A. R. **Proposta de Um Gerador de Ambientes para Modelagem de Aplicações Usando Tecnologia Adaptativa**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da USP, 2007.

CERTO, S. C. **Modern management: diversity, quality, ethics and the global environment**. New Jersey: Prentice Hall, 2000.

CLEMEN, R. T.; REILLY, T. **Making Hard Decisions with Decisions Tools**. California: Duxbury, 2. ed., 2001.

COOK, S. An Overview of Computational Complexity. **Communications of the ACM**, 26 v. Issue 6, p.400-408, 1983.

CORMEN, H. T.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Introduction to Algorithms**. Massachusetts: McGraw-Hill, 2001.

DAGDEVIREN, M. Decision making in equipment selection: an integrated approach with AHP and PROMETHEE. **Springer Netherlands: Journal of Intelligent Manufacturing**, 19 v., n. 4, 2008.

FÜLÖP, J. Introduction to Decision Making Methods. **Laboratory of Operations Research and Decision Systems**, Computer and Automation Institute. Hungarian: Academy of Sciences, 2005.

GILDERSLEEVE, T. R. **Decision tables and their practical application in data processing**. Englewood Cliffs, N. J., Prentice Hall: 1970.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisões em cenários complexos**. São Paulo, Pioneira Thomson Learning, 2004.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S.; ALMEIDA, A. T. **Tomada de decisão gerencial – enfoque multicritério**. São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, L. F. A. M.; MOREIRA, A. M. M. Da informação à tomada de decisão: agregando valor através dos métodos multicritério. **Revista de Ciência e Tecnologia RECITEC**, Recife, 2 v., n. 2, p.117-139, 1998.

HAMMOND, J. S.; KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. **Decisiones Inteligentes**. Barcelona: Ediciones Gestión, 2002.

HARRIS, R. **Introduction to Decision Making**. VirtualSalt, 1998. Disponível em: <<http://www.virtualsalt.com/crebook5.htm>>. Acesso em 13 out 2005.

HUGHES, M. L.; SHANK, R. M.; STEIN, E. S. **Decision Tables**. Midi Publications, Management Development Institute, Divisions of Information, Industries, Inc., Wayne, Pennsylvania, 1968.

IWAI, M. K. **Um formalismo gramatical adaptativo para linguagens dependentes de contexto**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2000.

KASABOV, N. K. **Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering**. MIT Press, London, 1996.

KEENEY, R.; RAIFFA, H. **Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs**. New York: Willey, 1976.

KEEFER, D. L.; KIRKWOOD, C. W.; CORNER, J. L. Perspective on decision analysis applications, 1990-2001. **Decision Analysis 2004 Informs** – 1 v., nº 1, March 2004. p. 5-24.

KROGH, G. V.; ICHIJO, K.; NONAKA, I. **Reinventando a empresa com o poder da inovação contínua**. Trad. Afonso Celso da Cunha Serra. Rio de Janeiro: Campus, 2001.

LAUDON, K.; LAUDON, J. **Sistemas de informação com Internet**. Rio de Janeiro: LTC, 1999. 389 p.

LEWIS, H. R.; PAPADIMITRIOU, C. H. **Elements of the theory of computation**. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998.

NETO, J. J.; MAGALHÃES, M. E. S. Reconhecedores sintáticos – uma alternativa didática para uso em cursos de engenharia. **XIV Congresso Nacional de Informática**, São Paulo, pp.171-181, 1981.

NETO, J. J. **Introdução à Compilação**. Rio de Janeiro: LTC, 1987.

_____. **Contribuições à Metodologia de Construção de Compiladores**. Tese (Livre Docência), Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1993.

_____. Adaptive rule-driven devices – General formulation and case study. **Lecture notes in Computer Science**, Springer-Verlag, 2494 v., p. 234-250. Watson, B. W. and Wood, D (Eds.): Implementation and Application of Automata 6th International Conference, CIAA, 2001, Pretoria, South Africa, July 23-25, 2001.

_____. **Apresentação do LTA – Laboratório de Linguagens e Técnicas Adaptativas**, 2002. Disponível em: <www.pcs.usp.br/~lta>. Acesso em 20 março 2004.

_____. Adaptive rule-driven devices – general formulation and case study. **Revista de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais**, São Paulo, 1 v., n.1, p. 45-57, Nov 2003.

_____. Um levantamento da evolução da Adaptatividade e da Tecnologia Adaptativa. **IEEE Latin America Transactions**, 5 v., n. 7, Nov 2007.

NICHOLSON, W. K. **Álgebra Linear**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

O'BRIEN, J. A. **Sistemas de informação e as decisões gerenciais na era da Internet**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2004.

PARIENTE, C. A. B. **Gramáticas livres de contexto adaptativas com verificação de aparência**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2004.

PEDRAZZI, T. C. **Um Ambiente de Desenvolvimento baseado em Tabelas de Decisão Adaptativas**. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2007.

PEDRAZZI, T. C.; TCHEMRA, A. H.; ROCHA, R. L. A. **Adaptive decision tables: a case study of their application to decision-taking problems**. Proceeding of Internacional Conference on Adaptive and Natural Computing Algorithms ICANNGA 2005, Coimbra, March 21-23, 2005. Wien, New York: Springer, 2005.

PIDD, M. **Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão**. Trad. Gustavo Severo de Borba et al. Porto Alegre: Artes Médicas, 1998.

PISTORI, H. **Tecnología Adaptativa em Engenharia de Computação: estado da arte e aplicações**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da USP, 2003.

POMEROL, J. C.; ADAM, F. **On the legacy of Hebert Simon and his contribution to decision-making support systems and artificial intelligence**. Springer London, 2006.

RAGSDALE, C. T. **Spreadsheet modeling and decision analysis: a practical introduction to management science**. 3. ed. Ohio: South-Western College Pub. 2001.

RAIFFA, H. **Teoria da decisão: aulas introdutórias sobre escolhas em condições de incerteza**. São Paulo: Vozes, 1977.

RANGEL, L. A. D.; GOMES, L. F. A. M. Determinação do valor de referência do aluguel de imóveis residenciais empregando o método TODIM. **Pesquisa Operacional**, 27 v., n. 2, Rio de Janeiro, 2007.

ROY, B. **Multicriteria methodology goes decision aiding**. Kluwer Academic Publishers, 1996.

SAATY, T.L. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: McGraw – Hill, Makron, 1991.

_____. Fundamentals of decision making and priority theory with the Analytic Hierarchy Process. VI v. Pittsburgh: **RWS Publications**, 1994.

_____. Analytic Hierarchy Process. Decision Making for Leaders, II v. AHP Series, **RWS Publications**, 2001.

_____. Decision making with the analytic hierarchy process. **Int. J. Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.

SALOMON, V. A. P. **Desempenho da Modelagem do Auxílio à Decisão por Múltiplos Critérios na Análise do Planejamento e Controle da Produção**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da USP, 2004.

SIMON, H. A. **A gestão não é a arte de otimizar**. Disponível em: <<http://www.janelanaweb.com/digitais/simondigest.html>>. Acesso em 27 nov 2004.

STAIR, R. M.; REYNOLDS, G. W. **Princípios de Sistemas de Informação – Uma abordagem gerencial**. Trad. Alexandre M. Oliveira. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

TCHEMRA, A. H. Aplicação da Tecnologia Adaptativa em Sistemas de Tomada de Decisão. **Revista IEEE América Latina**. 5 v., n. 7, ISSN: 1548-0992, nov 2007.

THOMAZ, J. P. **Concepção de um modelo multicritério de apoio à decisão**. Dissertação (Mestrado). Universidade Lusíada. Lisboa, Portugal, 2000.

TRUCK, I.; AKDAG, H. Manipulation of qualitative degrees to handle uncertainty: formal models and applications. **Knowledge and Information Systems**, Springer-Verlag London Ltd, 2005.

ZUFFO, A. C. **Seleção e aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento ambiental de recursos hídricos**. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.