

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**UMA PROPOSTA LINGÜÍSTICA PARA A EDUCAÇÃO DOS
PARÂMETROS DE REDES BAYESIANAS-FUZZY NA
ESTIMAÇÃO DA PROBABILIDADE DE ERRO HUMANO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE
POR

ROMERO LUIZ MENDONÇA SALES FILHO

Orientador: Prof. Enrique López Droguett, Ph.D.

RECIFE, Abril / 2008

S163u

Sales Filho, Romero Luiz Mendonça

Uma proposta lingüística para a educação dos parâmetros de redes Bayesianas-Fuzzy na estimação da probabilidade de erro humano / Romero Luiz Mendonça Sales Filho. – Recife: O Autor, 2008.

xi, 99 f.; il., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2008.

Inclui Referências Bibliográficas.

1. Engenharia de Produção. 2. Teorema de Bayes. 3. Redes Bayesianas. 4. Teoria Fuzzy. 5. Redes Bayesianas-Fuzzy. 6. Confiabilidade Humana. 7. Métodos de Educação. I. Título.

658.5 CDD (22.ed.)

UFPE/BCTG/2008-106



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO ACADÊMICO DE

ROMERO LUIZ MENDONÇA SALES FILHO

***“Uma Proposta Lingüística para a Educação dos Parâmetros de Redes Bayesianas-Fuzzy
na Estimação da Probabilidade de Erro Humano”***

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera o candidato **ROMERO LUIZ MENDONÇA SALES FILHO APROVADO.**

Recife, 23 de abril de 2008.



Prof. ENRIQUE ANDRÉS LÓPEZ DROGUETT, PhD (UFPE)



Profª. DAYSE CAVALCANTI DE LEMOS DUARTE, PhD (UFPE)



Prof. ACIRES DIAS, Doutor (UFSC)

PÁGINA DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho Aos meus pais, Romero e Gilvanice Sales que fizeram por mim e por minha irmã tudo o que deixaram de fazer por eles mesmos. Tudo o que sou hoje, devo ao esforço, dedicação e amor incondicional que sempre tiveram por mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter estado comigo durante toda a minha vida e sempre me conduzir a grandes vitórias. Neste trabalho, em especial, agradeço pela inspiração e serenidade concedidas para o desenvolvimento das idéias desenvolvidas.

Aos meus pais, Romero e Gilvanice, pelos ensinamentos, palavras de incentivo e apoio nas horas difíceis.

A minha irmã Gimenna, pelo apoio, respeito e amizade.

A minha namorada, Desirré, pela compreensão nas horas em que precisei me ausentar, pelo companheirismo, pelo incentivo, pelos momentos de distração, e pelo amor presente em nossa relação.

A minha família, avôs e avós, tios e tias, primos e primas, por terem contribuído de alguma forma para a minha formação profissional e pessoal.

Ao professor e amigo Enrique López, por ter me aceitado como seu aluno, e me dado o apoio necessário desde o início até a conclusão do mestrado, mantendo sempre uma relação de lealdade e respeito para com todos os seus alunos.

Aos amigos do Riscotec, Paulo Renato, Márcio Moura, Rosana, Carlos Renato, Regilda, Cássia Vanessa, Andréa Pontual, Isis Didier, Paulo Estevão, Messias, Ricardo Ferreira, Sônia, Rhogi. Todos, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento intelectual.

Aos membros da banca, professores Acires Dias e Dayse Duarte, pelas valiosas contribuições adicionadas ao trabalho.

A todos os professores do PPGE, por serem partes fundamentais do meu processo de aprendizado.

Aos professores do departamento de Estatística, por estarem sempre presentes desde o início da minha vida acadêmica, em especial aos professores Sylvio, Cristina, Cristiano, Carla, Isaac, Getúlio, Cláudia, Manoel e Cysneiros.

Aos amigos conquistados no PPGE: Filipe, Savana, Raquel, Rodolpho, Régia, Fernando, Anderson, Carla, Cássia, Nidiana, Marina, Maisa, Raul, Renata, Ítalo, Ranieri.

Aos amigos: Hemílio, Marcelo, Leonardo, Abraão, Adriano, Juliana, Vanessa, Robinho, Claudyvan, Tadeu, Raul, por serem amigos de grandes vitórias e conquistas.

Aos voluntários que dedicaram um pouco do tempo deles para que fossem coletadas informações que levaram aos resultados apresentados neste trabalho.

RESUMO

Uma grande escassez de dados é notada quando se está trabalhando em uma análise probabilística de riscos (APR). Alguns métodos são propostos na literatura como forma de contornar esse grande problema. Tais métodos são chamados de métodos de educação da opinião do especialista. Nesses métodos o analista recorre a especialistas que têm grande conhecimento sobre o problema analisado. Os especialistas, por sua vez, fornecem opiniões sobre o parâmetro investigado e com isso o analista consegue obter uma estimativa sobre o valor desconhecido. Neste trabalho será proposto um método de educação capaz de trabalhar com variáveis lingüísticas, de forma que ao final do processo possa ser obtida uma estimativa *fuzzy* sobre determinado parâmetro. Especificamente neste trabalho a idéia é obter estimativas *fuzzy* sobre probabilidades condicionais as quais serão utilizadas em uma rede *bayesiana-fuzzy* para a estimação da probabilidade de erro humano. Um exemplo de aplicação envolvendo um eletricitista auxiliar presente na atividade de substituição de cadeias de isoladores em linhas de transmissão é discutido ao final do trabalho.

Palavras-chave: Teorema de Bayes, Redes Bayesianas, Teoria Fuzzy, Redes Bayesianas-Fuzzy, Confiabilidade Humana, Métodos de Educação.

ABSTRACT

A great data scarcity is noted when one is working on probabilistic risk analysis. Some methods are proposed in literature in an attempt to solve this difficult problem. These such methods are called methods of elicitation of the expert opinion. In these methods, the analyst turns to specialists who have great knowledge about the problem analyzed. The specialists, on the other hand, provide their opinions about the parameter under investigation and, all in all, the analyst can obtain an estimate about the unknown parameter. In this work, an elicitation method capable of working with linguistic variables will be proposed, in such a way that a fuzzy estimate of a certain parameter can be obtained at the end of the process. In this work in particular specifically, the idea is to obtain fuzzy estimates of conditional probabilities which will be used in a Bayesian-fuzzy network for the estimation of the human error probability. An application example involving an auxiliary eclecticism present in the activity of replacement of the isolators chain in transmission lines is discussed at the end of the work.

Keyword: Bayes' Theorem, Bayesian Networks, Fuzzy Theory, Bayesian-Fuzzy Networks, Human Reliability, Methods for eliciting.

SUMÁRIO

RESUMO.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ACRÔNIMOS.....	Erro! Indicador não definido.
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Estrutura do trabalho	2
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1 Teoria Fuzzy.....	3
2.1.1 Conjuntos Fuzzy	3
2.1.2 Operações Fuzzy	9
2.1.3 Variáveis Linguísticas	13
2.1.4 Números Fuzzy.....	14
2.1.5 Defuzzificação.....	17
2.1.6 Aritmética Fuzzy	20
2.2 Redes Bayesianas (RBs).....	21
2.2.1 Teorema de Bayes.....	22
2.2.2 Nós e Valores.....	22
2.2.3 Estrutura	23
2.2.4 Tabelas de Probabilidades Condicionais	23
2.2.5 Condição Markoviana.....	25
2.2.6 Atualização da Crença	26
2.2.7 Independência Condicional	27
2.2.8 d-separação	29
2.2.9 Distribuição de probabilidades correspondentes à rede	29
3 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA.....	30
3.1 Erro Humano.....	30

3.2	Confiabilidade Humana.....	30
3.3	Probabilidade de Erro Humano	31
3.4	Fatores de Desempenho	31
3.5	Métodos de ACH	33
3.6	ACH Via Redes Bayesianas.....	34
4	MÉTODOS DE EDUCAÇÃO	37
4.1	Introdução.....	37
4.2	Edução Segundo Firmino et al (2007)	37
4.3	Performance de Um Método de Educação	40
4.4	Calibração do Especialista	40
5	DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO	41
5.1	Introdução.....	41
5.2	Processo de Educação	41
5.3	Representação da Função de Probabilidade.....	46
5.4	Hibridismo entre a Teoria Fuzzy e as Redes Bayesianas.....	52
6	AValiação da Performance do Método de Educação.....	55
6.1	O Experimento	55
6.2	Calibração do Especialista	55
6.3	Resultados do Experimento.....	57
6.4	Conclusões Sobre o Método.....	69
7	APLICAÇÃO	71
7.1	Introdução.....	71
7.2	O Problema.....	71
7.3	Aplicação do Método e Resultados	72
8	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	92
8.1	Performance do Método de Educação	92
8.2	Aplicação nas Redes Bayesianas-Fuzzy.....	93

8.3	Comentário Geral.....	93
8.4	Perspectivas Futuras.....	93
	<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</i>	95

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 – Representação gráfica do conjunto crisp “quente”.</i>	4
<i>Figura 2.2 – Representação gráfica do conjunto fuzzy “quente”.</i>	5
<i>Figura 2.3 – Exemplo de representação do suporte e do supremum de um conjunto fuzzy.</i>	7
<i>Figura 2.4 – União de conjuntos fuzzy, $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$.</i>	10
<i>Figura 2.5 – Interseção de conjuntos fuzzy, $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$.</i>	11
<i>Figura 2.6 – Complementar do conjunto fuzzy A, $\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$.</i>	11
<i>Figura 2.7 – Funções de pertinência para a variável temperatura.</i>	13
<i>Figura 2.8 – Número Fuzzy Triangular</i>	15
<i>Figura 2.9 – Número Fuzzy Trapezoidal</i>	16
<i>Figura 2.10 – Número Fuzzy π</i>	16
<i>Figura 2.11 – Representação gráfica do CDG</i>	18
<i>Figura 2.12 – Representação gráfica do MDM.</i>	19
<i>Figura 2.13 – Representação gráfica do MDM em conjunto não convexo.</i>	19
<i>Figura 2.14 - Exemplo de uma Rede Bayesiana</i>	23
<i>Figura 2.15 - Exemplo de nó determinístico</i>	24
<i>Figura 2.16– Rede com nós conectados em série</i>	28
<i>Figura 2.17– Rede com nós conectados por causa comum</i>	28
<i>Figura 2.18 – Rede com nós conectados por efeito comum</i>	28
<i>Figura 3.1 – Exemplo de Rede Bayesiana aplicada a análise de confiabilidade humana.</i>	35
<i>Figura 4.1 – Construção da distribuição de probabilidade de acordo com a opinião do especialista.</i>	39
<i>Figura 5.1 - Conjuntos fuzzy para a variável lingüística probabilidade.</i>	41
<i>Figura 5.2 - Conjuntos fuzzy para a variável lingüística probabilidade – comprimento 1</i>	42
<i>Figura 5.3– Conjuntos fuzzy para a variável lingüística probabilidade de erro humano.</i>	44
<i>Figura 5.4 – Exemplo de distribuição de probabilidade obtida mediante o processo de educação proposto.</i>	46
<i>Figura 5.5– Distribuição de probabilidade da variável probabilidade de erro humano em termos de números fuzzy.</i>	49
<i>Figura 5.6- Representação gráfica da operação de adição entre dois números fuzzy triangulares.</i>	50
<i>Figura 5.7 - Representação gráfica da operação de subtração entre dois números fuzzy triangulares.</i>	51
<i>Figura 5.8 - Representação gráfica da operação de multiplicação de um escalar.</i>	51
<i>Figura 6.1 – Escala correspondente ao universo de discurso do especialista 1.</i>	57
<i>Figura 6.2 –Distribuição de probabilidade obtida pela educação do especialista 1 para a probabilidade de falha do sistema operando sobre demanda.</i>	58
<i>Figura 6.3- Representação dos conjuntos fuzzy para a variável lingüística probabilidade de falha em demanda (especialista 1).</i>	58
<i>Figura 6.4 – Escala correspondente ao universo de discurso do especialista 2.</i>	60
<i>Figura 6.5–Distribuição de probabilidade obtida pela educação do especialista 2 para a probabilidade de falha do sistema operando sobre demanda.</i>	60
<i>Figura 6.6 - Representação dos conjuntos fuzzy para a variável lingüística probabilidade de falha em demanda (especialista 2).</i>	61
<i>Figura 6.7– Escala correspondente ao universo de discurso do especialista 3.</i>	62
<i>Figura 6.8 –Distribuição de probabilidade obtida pela educação do especialista 3 para a probabilidade de falha do sistema operando sobre demanda.</i>	63
<i>Figura 6.9- Representação dos conjuntos fuzzy para a variável lingüística probabilidade de falha em demanda (especialista 3).</i>	63
<i>Figura 6.10 – Escala correspondente ao universo de discurso do especialista 4.</i>	65
<i>Figura 6.11–Distribuição de probabilidade obtida pela educação do especialista 4 para a probabilidade de falha do sistema operando sobre demanda.</i>	65
<i>Figura 6.12 - Representação dos conjuntos fuzzy para a variável lingüística probabilidade de falha em demanda (especialista 4).</i>	66
<i>Figura 6.13 – Escala correspondente ao universo de discurso do especialista 5.</i>	67
<i>Figura 6.14 –Distribuição de probabilidade obtida pela educação do especialista 5 para a probabilidade de falha do sistema operando sobre demanda.</i>	68
<i>Figura 6.15 - Representação dos conjuntos fuzzy para a variável lingüística probabilidade de falha em demanda (especialista 5).</i>	68
<i>Figura 7.1 – Rede Bayesiana para os FDs dos Eletricistas Auxiliares.</i>	72

<i>Figura 7.2 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 1.</i>	74
<i>Figura 7.3 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 1.</i>	74
<i>Figura 7.4 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 2.</i>	75
<i>Figura 7.5 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 2.</i>	75
<i>Figura 7.6 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 3.</i>	76
<i>Figura 7.7 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 3.</i>	76
<i>Figura 7.8 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 4.</i>	77
<i>Figura 7.9 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 4.</i>	77
<i>Figura 7.10 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 5.</i>	78
<i>Figura 7.11 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 5.</i>	78
<i>Figura 7.12 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 6.</i>	79
<i>Figura 7.13 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 6.</i>	79
<i>Figura 7.14 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 7.</i>	80
<i>Figura 7.15 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 7.</i>	80
<i>Figura 7.16 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 8.</i>	81
<i>Figura 7.17 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 8.</i>	81
<i>Figura 7.18 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 9.</i>	82
<i>Figura 7.19 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 9.</i>	82
<i>Figura 7.20 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 10.</i>	83
<i>Figura 7.21 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 10.</i>	83
<i>Figura 7.22 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 11.</i>	84
<i>Figura 7.23 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 11.</i>	84
<i>Figura 7.24 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 12.</i>	85
<i>Figura 7.25 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 12.</i>	85
<i>Figura 7.26 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 13.</i>	86
<i>Figura 7.27 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 13.</i>	86
<i>Figura 7.28 – Representação fuzzy para a probabilidade do eletricitista cometer um erro</i>	89
<i>Figura 7.29 – Representação fuzzy para a probabilidade do eletricitista cometer um erro considerando algumas evidências.</i>	91

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 – Principais operadores t-normas e t-conormas.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 2.2 – TPC referente ao exemplo apresentado sobre nó determinístico.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 2.3 - Ruído-OU.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 3.1 – Alguns FDs em sistemas homem-máquina (Swain & Guttman, 1983).....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 5.1 – Perguntas e respostas efetuadas na simulação do processo de educação.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 6.1– Resultados dos Testes de Calibração Aplicados aos Especialistas.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 6.2 – Perguntas e respostas durante o processo de educação do especialista 1.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 6.3 – Perguntas e respostas durante o processo de educação do especialista 2.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 6.4 – Perguntas e respostas durante o processo de educação do especialista 3.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 6.5 – Perguntas e respostas durante o processo de educação do especialista 4.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 6.6 – Perguntas e respostas durante o processo de educação do especialista 5.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 6.7 - Resumo dos resultados do experimento.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 7.1– Cenários em estudo.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 7.2– Resultados dos testes de calibração aplicados ao especialista.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 7.3: Questões feitas ao especialista sobre o cenário 1.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 7.4: Questões feitas ao especialista sobre o cenário 2.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 7.5: Questões feitas ao especialista sobre o cenário 3.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 7.6: Questões feitas ao especialista sobre o cenário 4.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 7.7 – Questões feitas ao especialista sobre o cenário 5.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 7.8– Questões feitas ao especialista sobre o cenário 6.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 7.9 – Questões feitas ao especialista sobre o cenário 7.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 7.10 – Questões feitas ao especialista sobre o cenário 8.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 7.11– Questões feitas ao especialista sobre o cenário 9.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 7.12 – Questões feitas ao especialista sobre o cenário 10.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 7.13 – Questões feitas ao especialista sobre o cenário 11.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 7.14 – Questões feitas ao especialista sobre o cenário 12.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 7.15 – Questões feitas ao especialista sobre o cenário 13.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 7.16 - TPC do Estado Emocional.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 7.17 - TPC da Carga de Trabalho.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 7.18 - TPC da Carga do Condicionamento Físico.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 7.19 - TPC do Eletricista.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 7.20 - TPC da Atenção.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 7.21 - TPC da Fadiga.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabela 7.22 – Valores Defuzificados.....</i>	<i>91</i>

LISTA DE ACRÔNIMOS

A – Alta
ACH - Análise de Confiabilidade Humana
AM - Alta Moderada
APR - Análise Probabilística de Riscos
B – Baixa
BM - baixa moderada
CDA - Centro da Área
CDG - Centro de Gravidade
CREAM - Cognitive Reliability and Error Analysis Method (Método de Análise de Erros e Confiabilidade Cognitiva)
DS – D-separação
FDs - Fatores de Desempenho
GAD - Grafo Acíclico Direcionado
LTs - Linhas de Transmissão
M - Moderada
MA - Muito Alta
Max – Máxima
MB - Muito Baixa
MDM - Meio dos Máximos
Min – Mínima
PEH - Probabilidade de Erro Humano
RBs - Redes Bayesianas
RBs *fuzzy* - Redes Bayesianas *Fuzzy*
T-conorma - Co-norma triangular
T-norma - Norma Triangular
TPC - Tabela de Probabilidades Condicionais

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O erro humano tem sido citado como a causa dominante de acidentes industriais na história recente. Isso provoca uma busca freqüente por parte dos gerentes industriais por alternativas que procurem minimizar tais erros. A análise de confiabilidade humana (ACH) é uma metodologia capaz de controlar esses erros já que ela estuda a execução apropriada das ações humanas em um determinado sistema considerando suas limitações e os fatores que influenciam no seu desempenho. O erro humano é a base para os estudos da confiabilidade humana, pois é através dele que um cenário é analisado quando uma ação humana é necessária. Neste trabalho serão utilizadas as redes *Bayesianas-fuzzy* (RBs *fuzzy*), uma metodologia que trata do hibridismo entre as Redes Bayesianas e a Teoria *Fuzzy* na qual para os parâmetros da rede são considerados valores *fuzzy*. As RBs *fuzzy* serão utilizadas como ferramenta para obtenção da estimativa da probabilidade de erro humano.

Na análise probabilística de risco (APR), é notada a grande dificuldade de se trabalhar quando da escassez ou total ausência de dados. Uma forma de se contornar esse problema é fazer uso de métodos de educação para coletar a informação necessária de pessoas que possuem grande conhecimento sobre o problema analisado, os chamados especialistas. Na literatura são relatados vários métodos de educação. Entretanto, uma das grandes dificuldades encontradas na aplicação desses métodos é a falta de familiaridade do especialista no tratamento com valores probabilísticos. Tradicionalmente as RBs *fuzzy* necessitam de respostas de especialistas sobre algum parâmetro que seja do seu domínio. Essas respostas são dadas de forma direta e são feitas por meio de variáveis lingüísticas ou números *fuzzy*. Neste trabalho, com o objetivo de reduzir a incerteza presente nas respostas dos especialistas, é proposta uma forma de educação da distribuição de probabilidade do parâmetro em estudo utilizando variáveis lingüísticas, reduzindo desta forma a dificuldade que a maioria dos especialistas apresenta ao tratar com variáveis numéricas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como principal objetivo sistematizar um método de educação para estimar a distribuição de probabilidade de um determinado parâmetro de acordo com a opinião de um especialista, utilizando para tanto questões baseadas em variáveis lingüísticas. A proposta é feita com o objetivo de criar uma alternativa para a quantificação de RBs *fuzzy* já que os valores *fuzzy* (probabilidades condicionais) referentes aos nós das redes serão estimados a partir da mediana *fuzzy*, que será proposta neste trabalho, obtida da distribuição de probabilidade do parâmetro em análise.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Fundamentar a teoria envolvida na elaboração do método de educação baseando-se em publicações e artigos científicos;
- Desenvolver o método de educação do conhecimento do especialista no contexto de confiabilidade humana.
- Analisar, através de um experimento, a performance do método de educação proposto;
- Aplicar o método proposto em um caso de interesse prático no qual seja observada a ação humana;
- Propor e desenvolver uma métrica para a representação da distribuição de probabilidade resultante da educação do especialista.

1.3 Estrutura do trabalho

A dissertação é composta por oito capítulos, incluindo este. O capítulo 2 apresenta toda a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do trabalho; o capítulo 3 discute as técnicas de análise de confiabilidade humana inclusive a utilização das Redes Bayesianas nesta área; o capítulo 4 aborda métodos de educação discutidos na literatura; o capítulo 5 trata do desenvolvimento do método de educação e do hibridismo entre Redes Bayesianas e teoria *fuzzy*; no capítulo 6 é feita uma análise da performance do método de educação proposto; uma aplicação do método é feita no capítulo 7 onde é utilizado um cenário real onde existe a ação humana e, portanto o erro humano é objeto de estudo; no capítulo 8 são feitas conclusões e algumas considerações sobre trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Teoria Fuzzy

A lógica de Aristóteles, filósofo grego (384 - 322 a.C.), trata sentenças classificando-as como verdadeiras ou falsas. Não obstante, muitas das experiências humanas não podem ser classificadas simplesmente como verdadeiras ou falsas, sim ou não, branco ou preto. A lógica difusa ou nebulosa (lógica *fuzzy*) é uma generalização da *lógica booleana* que admite valores lógicos intermediários entre a falsidade e a verdade. O conceito de dualidade, estabelecendo que algo pode e deve coexistir com o seu oposto, faz a lógica *fuzzy* parecer natural e até mesmo inevitável. O comportamento humano é o fator inspirador dessa lógica, ela é baseada na descrição e interpretação do mundo por meio de atributos lingüísticos considerando as incertezas existentes no ambiente. A partir de conjuntos não-nebulosos a criação de seus respectivos conjuntos nebulosos (fuzificação) é feita com a determinação do grau de pertinência de cada um dos elementos aos conjuntos. Segundo Klir e Yuan (1995) a pertinência em um conjunto *fuzzy* não é uma questão de afirmativo ou negativo, e sim o grau com que se pode afirmar algo. As funções de pertinência são baseadas na relação entre cada elemento e o(s) suporte(s) dos conjuntos. O uso de controle e sistemas *fuzzy* aumentou significativamente em sistemas industriais, principalmente onde o processo de decisão admite uma certa tolerância em sua decisão Borges (2003).

2.1.1 Conjuntos Fuzzy

Devido à necessidade de uma ferramenta matemática capaz de tratar informações de caráter vago ou impreciso L.A. Zadeh desenvolveu em 1965 a Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*. Os conjuntos clássicos (*crisp*) diferem dos conjuntos *fuzzy* no sentido de que os elementos que fazem parte deste primeiro tipo de conjunto pertencem ao conjunto em questão com grau de pertinência 1, já elementos que fazem parte de conjuntos *fuzzy* pertencem a seus conjuntos considerando um grau de pertinência variando entre 0 e 1. Para um melhor entendimento dos conjuntos *fuzzy* é necessário o total entendimento dos conjuntos clássicos. Para isso apresenta-se como exemplo a seguinte proposição: “o leite está quente”. Representa-se a temperatura do leite pela variável T que é chamada de universo de discurso (Klir e Yuan, 1995), o universo de discurso contém os possíveis valores que a variável T pode assumir. O conjunto A então é definido como sendo o conjunto de elementos do universo de discurso T para os quais a

condição “leite quente” seja aceita, por exemplo entre 50 e 80 graus centígrados. Tradicionalmente o conjunto A é chamado na literatura de conjunto *crisp* e, considerando-se o caso do leite quente, é possível definir este conjunto da seguinte maneira:

$$A \subseteq T, \text{ onde } A = \{x \mid x \in [50, 80]\}$$

Outra forma de definir um conjunto *crisp* é fazendo uso da função característica que pode ser expressa da seguinte forma:

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases} \quad (2.1)$$

A função característica é capaz de determinar se um elemento x pertence ou não a um conjunto A que está contido em um universo U .

Na figura 2.1, é possível observar a representação gráfica do conjunto *crisp* “quente”, para o exemplo discutido acima.

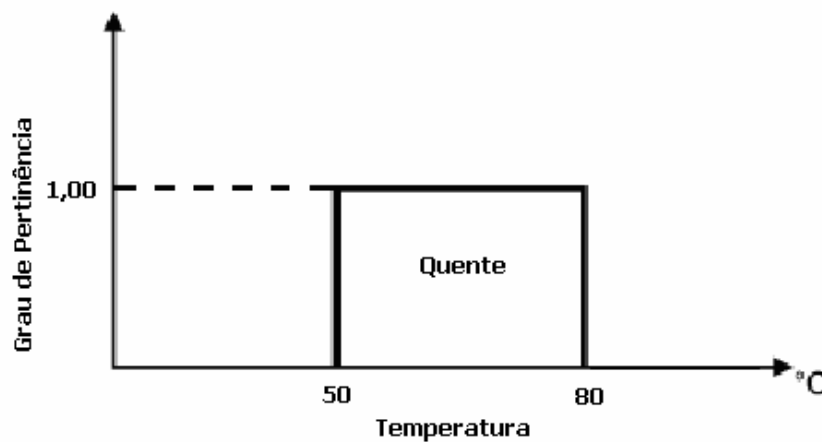


Figura 2.1 – Representação gráfica do conjunto *crisp* “quente”.

A função característica foi ampliada por Zadeh (1965) tornando-a capaz de assumir qualquer número pertencente ao intervalo $[0,1]$. Dessa forma um conjunto *fuzzy* é definido por um grupo de elementos de um universo de discurso U de forma que cada elemento faça parte do conjunto considerado levando em conta um grau de pertinência (Klir e Yuan, 1995). A função que define os graus de pertinência dos elementos é chamada de função de pertinência e é uma generalização da função característica da teoria clássica, uma vez que associa para todo elemento do universo de discurso um valor no intervalo $[0,1]$ ao invés do conjunto de apenas

dois elementos $\{0,1\}$ (Driankov *et al.*, 1993). Formalmente a função de pertinência é definida da seguinte forma:

$$\mu_A : U \rightarrow [0,1], \quad (2.2)$$

onde A é um subconjunto *fuzzy* e U é um universo de discurso.

Voltando ao exemplo do “leite quente”, uma possível representação gráfica do conjunto *fuzzy* “quente” é apresentada na figura 2.2. Observa-se que para o valor 60° a pertinência do elemento ao conjunto é máxima e após 60° a pertinência segue diminuindo, isso não se deve ao fato das temperaturas maiores que 60° deixarem de ser quentes, mas sim a possibilidade dessas temperaturas pertencerem a outro conjunto *fuzzy*, “muito quente”, por exemplo.

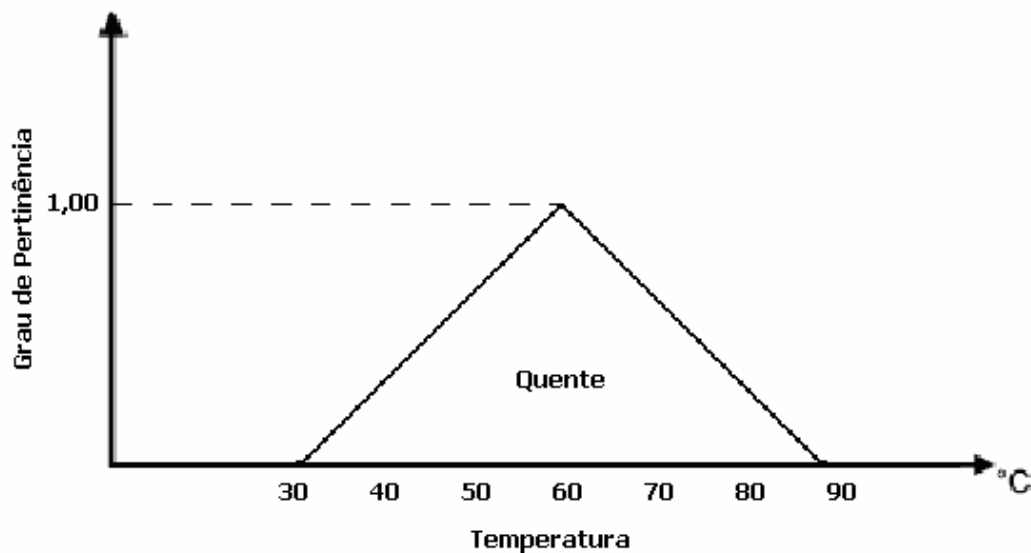


Figura 2.2 – Representação gráfica do conjunto *fuzzy* “quente”.

Com a possibilidade da pertinência parcial dos elementos, a teoria de Zadeh possui um escopo de aplicabilidade muito maior que a teoria clássica na solução de vários tipos de problemas reais (Kandel e Lee, 1979).

2.1.1.1 Representação de Conjuntos Fuzzy

Várias são as formas de representação dos conjuntos *fuzzy*, a seguir são expostas algumas dessas representações:

- **Elemento do conjunto fuzzy como par ordenado:**

Neste caso, o par ordenado $(x, \mu_A(x))$ representa um elemento do conjunto *fuzzy*, onde x é um elemento *crisp* do universo de discurso U , e $\mu_A(x)$ representa a pertinência do elemento x ao conjunto *fuzzy* A . Formalmente é possível escrever:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}. \quad (2.3)$$

- **Conjunto fuzzy como função de mapeamento do universo de discurso:**

É possível definir diretamente um conjunto *fuzzy* A como sendo a função de mapeamento do universo de discurso U no valor normalizado de pertinência (Klir e Yuan, 1995). Neste caso o conjunto *fuzzy* se confunde com a sua função de pertinência: $A: U \rightarrow [0,1]$

- **Elemento crisp/pertinência**

Outra forma utilizada é dispor os elementos *Crisps* e suas respectivas pertinências separados por barras:

$$A = \mu_A(x_1) / x_1 + \mu_A(x_2) / x_2 + \dots + \mu_A(x_n) / x_n. \quad (2.4)$$

Onde o símbolo “+” significa a união ao invés da soma aritmética.

Se A é um conjunto discreto, então é possível escrever:

$$A = \sum \mu_A(x_i) / x_i \quad (2.5)$$

Se A é um conjunto contínuo, então:

$$A = \int \mu_A(x_i) / x_i \quad (2.6)$$

2.1.1.2 Propriedades Básicas dos Conjuntos Fuzzy

Klir e Yuan (1995) descreveram algumas das propriedades mais importantes dos conjuntos *fuzzy*:

- **Conjunto suporte:**

Compreende os elementos pertencentes ao universo de discurso U para os quais a pertinência é maior que zero. Formalmente tem-se:

$$\text{supp}(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (2.7)$$

- **Supremum ou Altura:**

Refere-se ao maior grau de pertinência que um conjunto *fuzzy* pode assumir. Cabe aqui a observação de que quando o *supremum* de um conjunto *fuzzy* é igual a 1, esse conjunto é dito normal. Formalmente é possível escrever:

$$h(A) = \sup \mu_A(x). \quad (2.8)$$

A figura 2.3, mostra uma representação do suporte e do *supremum* (altura) de um conjunto *fuzzy*.

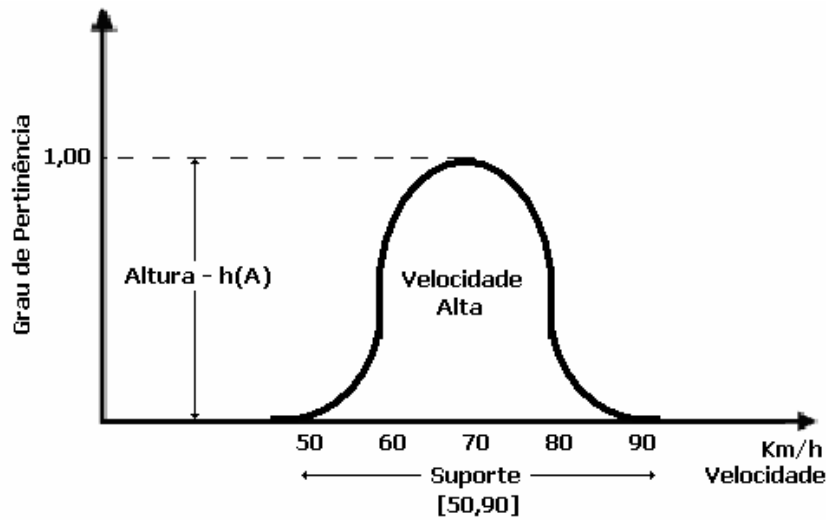


Figura 2.3 – Exemplo de representação do suporte e do supremum de um conjunto fuzzy.

- **α -cut**

Segundo Klir e Yuan, 1995, é muito comum a necessidade de se estabelecer limites de relevância mínima para os quais um conceito seja válido. O α -cut é bastante útil para funções que tendem a possuir valores muito baixos de $\mu_A(x)$ por um domínio extenso. Qualquer valor abaixo de α -cut torna-se zero. Mais formalmente, uma vez aplicado um α -cut num conjunto *fuzzy* A tem-se:

$$A_\alpha = \begin{cases} \mu(x), & \text{se } \mu(x) \geq \alpha \\ 0, & \text{se } \mu(x) < \alpha \end{cases} \quad (2.9)$$

Uma das implicações importantes da aplicação de um α -cut é a mudança do suporte (Klir e Yuan, 1995), que se torna menor que o suporte original.

- **Convexidade**

O conceito matemático de convexidade possui grande importância em várias questões de consistência matemática e é generalizado para a teoria dos conjuntos *fuzzy* fornecendo a base para várias formulações matemáticas bem como interpretações conceituais (Klir e Yuan, 1995).

Para um conjunto fuzzy A_α é dito que, dados: $(x_1, x_2) \in X$, $\lambda \in [0,1]$ e $\alpha \in (0,1]$, A_α é convexo se e somente se, para todo α -cut ,

$$A(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min[A(x_1), A(x_2)]. \quad (2.10)$$

A extensão do conceito de convexidade para os conjuntos *fuzzy* é interpretada da seguinte forma: “A pertinência entre dois elementos de um conjunto *fuzzy* deve ser maior ou igual que a menor pertinência entre estes dois elementos”. De um outro modo, pode-se ver a convexidade como a inexistência de máximos locais na função de pertinência.

- **Cardinalidade**

Para os conjuntos crisp a cardinalidade de um conjunto é definida como o número de elementos pertencentes ao conjunto. Cada elemento de um conjunto *fuzzy* possui um grau de pertinência associado. Desta forma, a cardinalidade escalar, de um conjunto *fuzzy* discreto A definido sobre U , seria:

$$|A| = \sum_{x \in U} \mu_A(x) \quad (2.11)$$

No caso de um conjunto contínuo, a cardinalidade é obtida por:

$$|A| = \int \mu_A(x) dx \quad (2.12)$$

A cardinalidade escalar é similar à área da curva de pertinência, contudo pode-se definir uma cardinalidade relativa ao universo de discurso U . Isto permite comparar a cardinalidade de conjuntos *fuzzy* independentemente.

A cardinalidade relativa $||A||$ representa a fração de elementos de U que estão em A , ponderados pelo grau de pertinência em A (Cosenza, 2003).

$$||A|| = |A|/|U|. \quad (2.13)$$

- **Grau de Inclusão**

Sejam A e B dois conjuntos *fuzzy* diferentes. Se os conjuntos A e B fazem parte de um universo finito, é possível medir o grau de inclusão do conjunto *fuzzy* A em B fazendo uso do modelo de Kosko (1992).

$$S(A, B) = \frac{1}{|A|} \left\{ |A| - \sum_{x \in U} \max\{0, A(x) - B(x)\} \right\} \quad (2.14)$$

2.1.2 Operações Fuzzy

Em 1965 Zadeh propôs as operações *fuzzy* baseado nas operações clássicas já conhecidas. As operações fundamentais dos conjuntos *fuzzy* são a interseção a união e o complemento. Tais operações, como já foi dito anteriormente, foram baseadas nos conjuntos *fuzzy* e por isso são consideradas extensões das operações já tradicionalmente conhecidas, desta forma, foram conservadas propriedades como idempotência, involução, absorção, Leis de Morgan, distributividade, comutatividade, associatividade, e identidade. No entanto, deve-se ressaltar que ao contrário do que acontece com os conjuntos clássicos, para conjuntos *fuzzy* tem-se que (Tanscheit, 2003):

$$A \cap \bar{A} \neq \emptyset \quad e \quad A \cup \bar{A} \neq U. \quad (2.15)$$

A interseção e a união, em se tratando de conjuntos *fuzzy*, são implementadas respectivamente através de famílias de operadores denominados *t-normas* e *t-conormas*. De acordo com Zimmerman (1991), quando aplicados a conjuntos *booleanos*, tais operadores se reduzem aos operadores clássicos de interseção e união.

2.1.2.1 Inclusão, Max-união, Min-interseção, Complemento

Sejam A e B dois conjuntos *fuzzy* no universo U (Bandemer e Näther, 1992), então:

É dito que A é um sub-conjunto de B , i.e. $A \subseteq B$ se:

$$\forall x \in U : \mu_A(x) \leq \mu_B(x). \quad (2.16)$$

A união e a interseção de A e B , podem ser representadas respectivamente por:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.17)$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.18)$$

A figura 2.4 (Sandri e Correa, 1999) representa a união de dois conjuntos *fuzzy* efetuada através do operador *max*:

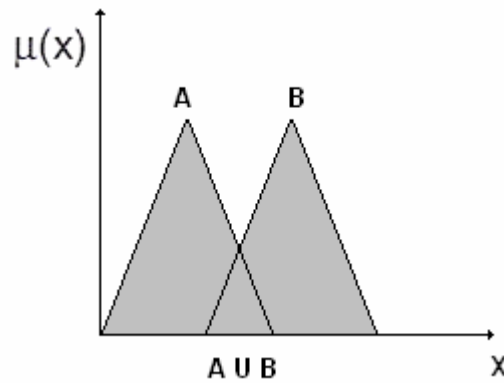


Figura 2.4 – União de conjuntos *fuzzy*, $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$.

A figura 2.5 (Sandri e Correa, 1999) representa a interseção de dois conjuntos *fuzzy* efetuada através do operador *min*:

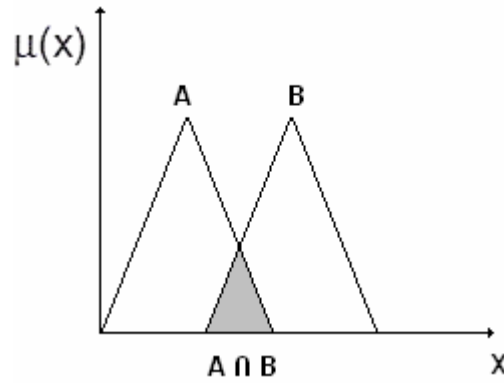


Figura 2.5 – Interseção de conjuntos fuzzy, $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$.

O complemento A^c de um conjunto fuzzy A , pode ser definido como (Bandemer e Näther, 1992):

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.19)$$

que claramente trata-se de uma generalização do caso clássico e representa o grau para o qual o elemento x não faz parte do conjunto. Gráficamente uma possível representação do complemento de um conjunto fuzzy A pode ser dada por:

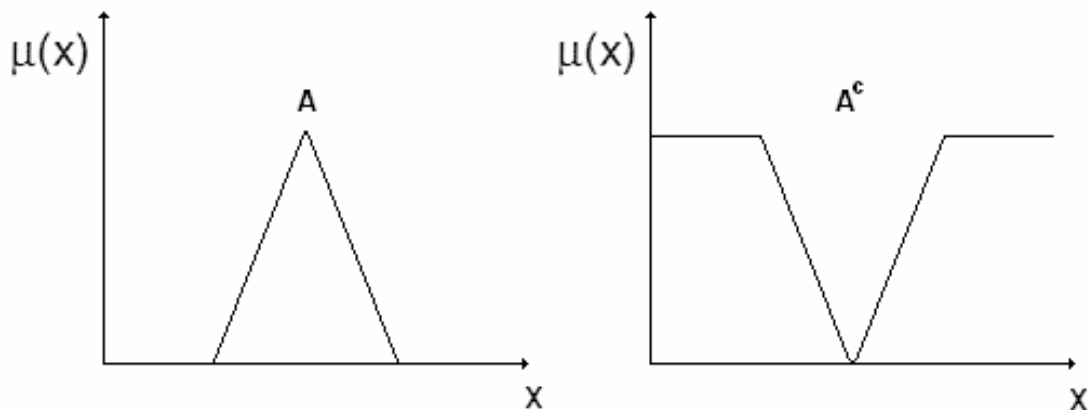


Figura 2.6 – Complementar do conjunto fuzzy A , $\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$.

2.1.2.2 Operadores *t-norms* e *t-conorms*

Segundo Bandemer e Näther (1992) as operações de interseção e união não são as únicas extensões das operações clássicas. Com o objetivo de generalização, foram definidos operadores de base axiomática, baseados nos conceitos de norma triangular (*t-norma*) e co-norma triangular (*t-conorma*).

Uma *t-norma* é uma operação binária $*$: $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ tal que, $\forall x, y, z, w \in [0,1]$, as seguintes propriedades são satisfeitas:

- Comutatividade: $x * y = y * x$ (2.20)

- Associatividade: $(x * y) * z = x * (y * z)$ (2.21)

- Monotonicidade: se $x \leq y$, $w \leq z$, então $x * w \leq y * z$ (2.22)

- Condições de contorno: $x * 0 = 0$ e $x * 1 = x$ (2.23)

Uma *t-conorma* é uma operação binária $\oplus$: $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ tal que, $\forall x, y, z, w \in [0,1]$, as seguintes propriedades são satisfeitas:

- Comutatividade: $x \oplus y = y \oplus x$ (2.24)

- Associatividade: $(x \oplus y) \oplus z = x \oplus (y \oplus z)$ (2.25)

- Monotonicidade: se $x \leq y$, $w \leq z$, então $x \oplus w \leq y \oplus z$ (2.26)

- Condições de contorno: $x \oplus 0 = x$ e $x \oplus 1 = 1$ (2.27)

A Tabela 2.1, apresenta as *t-normas* e *t-conormas* mais utilizadas (Sandri e Correa, 1999):

Tabela 2.1 – Principais operadores *t-normas* e *t-conormas*

<i>t-norma</i>	Nome	<i>t-conorma</i>	Nome
$\min(a,b)$	Mínimo	$\max(a,b)$	Máximo
$a.b$	Produto algébrico	$a+b-ab$	Soma probabilística
$\max(a+b-1,0)$	Produto limitado	$\min(a+b,1)$	Soma limitada
a , se $b = 1$ b , se $a = 1$ 0 , se $a,b < 1$	Produto drástico	a , se $b = 0$ b , se $a = 0$ 1 , se $a,b > 0$	Soma drástica

A bibliografia registra inúmeras *t-normas* e *t-conormas*, mas em aplicações – principalmente em engenharia –, têm sido utilizados preponderantemente os operadores *min* e *produto algébrico* para interseção e o operador *max* para a união.

2.1.3 Variáveis Lingüísticas

Uma variável lingüística é utilizada para representar de modo impreciso um conceito ou uma variável de um determinado problema. De acordo com Bandemer e Näther (1992) tratam-se de dados expressos em termos da linguagem humana (de forma falada ou escrita). Por assumirem apenas termos lingüísticos reduzem a complexidade durante a modelagem de um dado sistema. Como exemplo, é possível dizer que a variável lingüística "Idade" pode assumir os valores "Jovem", "Adulto" ou "Velho". A esses valores assumidos por uma variável lingüística dá-se o nome de conceitos ou termos lingüísticos. Eles podem ser descritos por intermédio de conjuntos *fuzzy*, representados por funções de pertinência, conforme mostrado na figura a seguir:

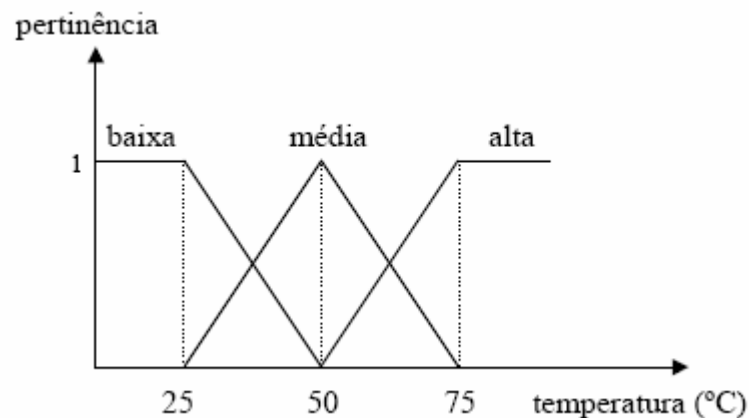


Figura 2.7 – Funções de pertinência para a variável *temperatura*.

As formas das funções de pertinência de uma variável lingüística podem variar conforme a aplicação, podendo ser *triangulares*, *trapezoidais*, π (π), *gaussianas*, *sigmoidais*, etc.

Segundo (Driankov *et al.*, 1993) a caracterização de uma variável lingüística pode ser feita pela quádrupla (X, LX, U, Mx) , onde:

- X é o nome da variável;
- LX é o conjunto de termos lingüísticos que X pode assumir;
- U é o universo de discurso onde estão definidos todos os conjuntos *fuzzy* correspondentes aos termos lingüísticos da variável X ;
- Mx representa a regra que associa a cada valor lingüístico o seu significado numérico no domínio físico U , ou seja, Mx pega o termo lingüístico e retorna o seu significado em termos de um conjunto *fuzzy*, aplicando uma função de pertinência μ_{LX} .

No caso da variável temperatura da Figura 2.7, tem-se:

- X : temperatura
- LX : {baixa, média, alta}
- U : 0 a 100 °C (por exemplo)
- Mx : associa a cada valor lingüístico um conjunto *fuzzy* cuja função de pertinência exprime o seu significado.

2.1.4 Números *Fuzzy*

Normalmente, nos problemas de rotina, a maioria das informações medidas é carregada de valores imprecisos e aproximações. Estas imprecisões geralmente são decorrentes dos operadores ou dos instrumentos utilizados na medição. Por exemplo, a altura de um indivíduo é normalmente representada por um valor pontual a , entretanto uma forma mais adequada de representar esta altura seria fazer uso de um intervalo, onde a seria o ponto médio deste intervalo e com isso seria possível dizer que o indivíduo tem uma altura em torno de a . Neste caso, matematicamente, indica-se a expressão em torno de a por um conjunto *fuzzy* A cujo domínio é o conjunto dos números reais. Também é natural esperar que $\mu_A(a) = 1$. Segundo Pereira (2002), os números *fuzzy* mais comuns são os triangulares, trapezoidais e π (π).

- Número *Fuzzy* Triangular:

Na Figura 2.8 é feita a representação gráfica de um número *fuzzy* triangular: no eixo x é mostrado um intervalo onde os pontos extremos (A e B) possuem pertinência (eixo y) nula e um ponto C cuja pertinência atinge o valor máximo. O número *fuzzy* triangular é utilizado quando o parâmetro em análise possui uma faixa de variação e um número dentro desta faixa possui uma possibilidade de ocorrência maior do que os outros. Tradicionalmente um número *fuzzy* deste tipo é escrito da seguinte forma: (A, C, B) , onde A é o valor extremo esquerdo, C é o valor central e B é o valor extremo direito.

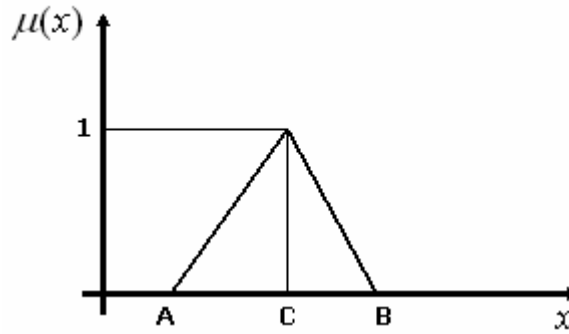


Figura 2.8 – Número Fuzzy Triangular

A função de pertinência triangular é apresentada a seguir:

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-A}{C-A}, & \text{se } A \leq x \leq C \\ \frac{B-x}{B-C}, & \text{se } C \leq x \leq B \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.28)$$

- Número Fuzzy Trapezoidal

Diferentemente do número *fuzzy* triangular, para a sua representação gráfica são necessários quatro pontos no eixo x , dois representarão os extremos do número, onde a sua pertinência será nula (A e D) e os outros dois irão representar um intervalo cuja pertinência será máxima (B e C). Em um número *fuzzy* triangular tem-se apenas um ponto cuja pertinência é máxima, já no número *fuzzy* trapezoidal existe um intervalo de pertinência máxima, isso indica que a utilização de um número como esse deve ser feita em situações em que o parâmetro em análise possui uma faixa de variação e todos os números dentro desta faixa possuem a mesma possibilidade de ocorrência. Na Figura 2.9 é feita a representação gráfica de um número *fuzzy* trapezoidal:

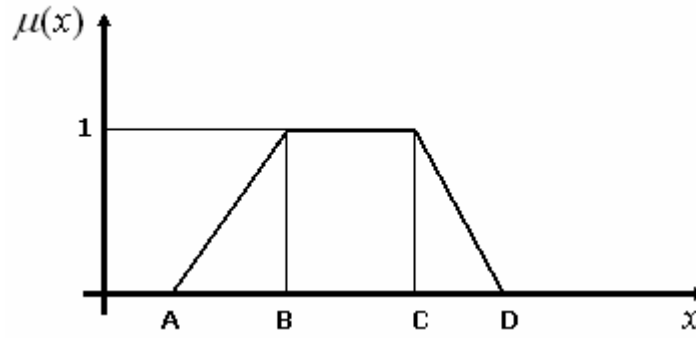


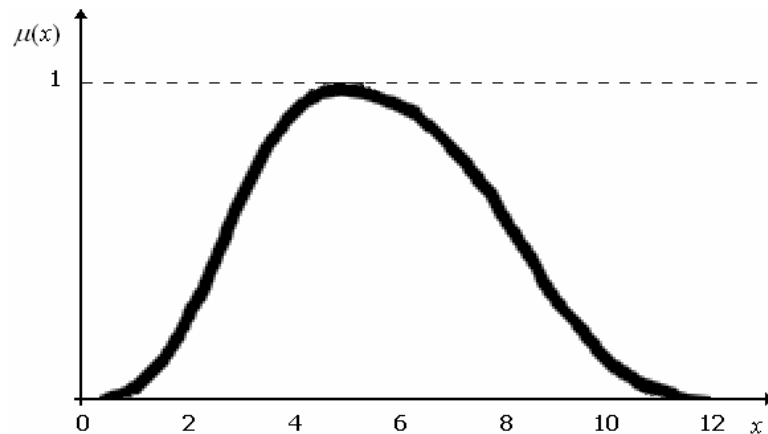
Figura 2.9 – Número Fuzzy Trapezoidal

A função de pertinência trapezoidal é dada por:

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-A}{B-A}, & \text{se } A < x < B \\ 1, & \text{se } B \leq x \leq C \\ \frac{D-x}{D-C}, & \text{se } C < x < D \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.29)$$

- Número Fuzzy π

A função triangular difere da função π no sentido de que esta última apresenta uma queda mais gradual da curva entre $\mu = 1$ e $\mu = 0.5$ e uma queda mais rápida da mesma entre $\mu = 0.5$ e $\mu = 0$. Graficamente a função π é representada conforme a Figura 2.10:

Figura 2.10 – Número Fuzzy π

A definição da função de pertinência π é dada por:

$$\mu(x) = \begin{cases} 2\left(\frac{x - A^*}{C - A^*}\right), & \text{se } A^* \leq x \leq A \\ 1 - 2\left(\frac{C - x}{C - A^*}\right)^2, & \text{se } A \leq x \leq C \\ 1 - 2\left(\frac{x - C}{B^* - C}\right)^2, & \text{se } C \leq x \leq B \\ 2\left(\frac{B^* - x}{B^* - C}\right)^2, & \text{se } B \leq x \leq B^* \\ 0, & \text{se } x \leq A^* \text{ ou } x \geq B^* \end{cases} \quad (2.30)$$

onde:

$$A^* = \begin{cases} C - 2(C - A), & \text{se } C \geq 2(C - A) \\ 0, & \text{se } C \leq 2(C - A) \end{cases} \quad (2.31)$$

e

$$B^* = C + 2(B - C) \quad (2.32)$$

Ainda de acordo com Pereira (2002), escolha da função de pertinência depende apenas da opinião do especialista, uma vez que, a priori, não se pode definir que tipo de curva é melhor.

2.1.5 Defuzificação

Ao processo de transformação de um conjunto *fuzzy* em um número real dá-se o nome de defuzificação, normalmente os conjuntos *fuzzy* não possuem significados no mundo real. Por exemplo, qual o interesse do maquinista de um trem em saber que o medidor de velocidade indicou a velocidade como uma função triangular? A defuzificação objetiva definir um número real representativo do conjunto *fuzzy*. Existem alguns métodos utilizados para esse fim, dentre os quais destacam-se os seguintes:

Centro de Gravidade (CDG)

Neste método é utilizado o mesmo raciocínio utilizado no cálculo do centro de gravidade de uma massa da física, a diferença está apenas no fato de que na defuzificação a densidade da massa é vista como a função de pertinência de x .

No espaço contínuo ele é calculado da seguinte forma:

$$CDG = \frac{\int x\mu_A(x)dx}{\int \mu_A(x)dx} \quad (2.33)$$

No espaço discreto, tem-se:

$$CDG = \frac{\sum x\mu_A(x)}{\sum \mu_A(x)} \quad (2.34)$$

A figura 2.11 apresenta graficamente o valor obtido pela defuzificação de um conjunto *fuzzy* utilizando o método do centro de gravidade:

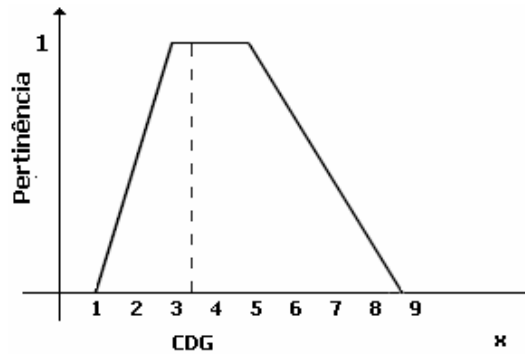


Figura 2.11 – Representação gráfica do CDG

Meio dos Máximos (MDM)

Como o próprio nome já diz, esse método consiste em obter o valor máximo da função de pertinência que esteja localizado no centro dos demais máximos. É importante salientar que esse método deve ser utilizado apenas em conjuntos convexos, caso contrário podem ocorrer problemas como o exemplo apresentado na figura 2.13.

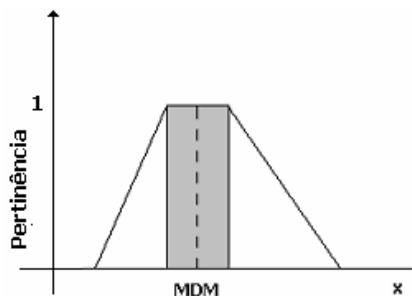


Figura 2.12 – Representação gráfica do MDM

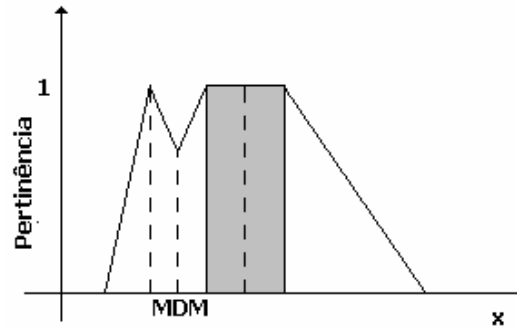


Figura 2.13 – Representação gráfica do MDM em conjunto não convexo

Nota-se que em um conjunto não convexo o método do meio dos máximos não possui o mesmo significado.

Centro da Área (CDA)

Este é um dos métodos mais conhecidos e utilizados. Procura-se determinar o valor para que ocorra a igualdade abaixo:

$$\int_{\inf_A(x)}^{CDA} \mu_A(x) dx = \int_{CDA}^{\sup_A(x)} \mu_A(x) dx \quad (2.35)$$

Em palavras, o que se procura é determinar o valor cuja área abaixo desse valor seja igual à área acima do mesmo valor, ou seja, CDA divide a área sobre a curva formada pela função de pertinência em duas partes iguais:

$$\text{Se, } \int_{\inf_A(x)}^{\sup_A(x)} \mu_A(x) dx = \text{Área} \quad (2.36)$$

$$\text{então: } \int_{\inf_A(x)}^{CDA} \mu_A(x) dx = \frac{\text{Área}}{2} \quad (2.37)$$

2.1.6 Aritmética Fuzzy

De acordo com (Bandemer e Näther, 1992), um número *fuzzy* A é do tipo L-R se a sua função de pertinência for escrita da seguinte maneira:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} L((m-x)/l) & \text{se } x \leq m \\ R((x-m)/r) & \text{se } x \geq m \end{cases}; \quad l > 0, \quad r > 0 \quad (2.38)$$

Onde, m é chamado de valor central, L e R são as funções que representam a curva de pertinência do lado esquerdo e direito, enquanto que l e r são, respectivamente, os desvios à esquerda e à direita. Assim a representação de um número *fuzzy* A do tipo L-R pode ser feita da seguinte forma: $A = (m, l, r)$.

Sejam sem perda de generalidade, A_1 e A_2 dois números *fuzzy* L-R:

$$A_1 = (M_1, l_1, r_1) \quad \text{e} \quad A_2 = (M_2, l_2, r_2)$$

A adição e subtração *fuzzy* são dadas conforme a seguir:

$$A_1 \oplus A_2 = (M_1 + M_2, l_1 + l_2, r_1 + r_2) \quad (2.39)$$

$$A_1 \ominus A_2 = (M_1 - M_2, l_1 + r_2, r_1 + l_2) \quad (2.40)$$

Para a multiplicação e a divisão de números *fuzzy* do tipo L-R, considerando $M_1, M_2 > 0$ são utilizadas as seguintes aproximações (para maiores detalhes recomenda-se Dubois e Prade, 1980):

$$A_1 \otimes A_2 \approx (M_1 M_2, M_1 l_2 + M_2 l_1 - l_1 l_2, M_1 r_2 + M_2 r_1 - r_1 r_2) \quad (2.41)$$

$$A_1 \oslash A_2 \approx \left(\frac{M_1}{M_2}, \frac{r_2 M_1 + l_1 M_2}{M_2^2}, \frac{l_2 M_1 + r_1 M_2}{M_2^2} \right) \quad (2.42)$$

Para a multiplicação de um número *fuzzy* por um número real a , a seguinte expressão é válida:

$$aA_1 = (aM_1, |a|l_1, |a|r_1) \quad (2.43)$$

2.2 Redes Bayesianas (RBs)

De acordo com Neapolitan (2004), a inferência bayesiana é tradicionalmente simples quando existem apenas duas variáveis envolvidas na análise, no entanto quando o número de variáveis em estudo se eleva, a inferência bayesiana torna-se muito complexa e sem valor prático. Em um contexto onde existem várias variáveis para uma aplicação de inferência bayesiana torna-se necessário a aplicação das Redes Bayesianas (RBs). Segundo Korb e Nicholson (2003), as RBs constituem-se de estruturas gráficas capazes de representar razões ou argumentos no domínio da incerteza. Elas oferecem uma metodologia para o raciocínio probabilístico englobando teoria dos grafos para o estabelecimento das relações entre sentenças e ainda teoria das probabilidades, para atribuições de níveis de confiabilidade ou verdade de uma sentença em se tratando de teoria *fuzzy*. Do ponto de vista de um especialista, as RBs constituem um modelo gráfico que representa de forma simples as relações de causalidade das variáveis de um sistema.

Uma RB é formada por um conjunto de variáveis aleatórias discretas ou contínuas que se comunicam através de arcos formando as conexões causais ou dependências diretas entre variáveis. Essas variáveis são graficamente representadas por nós e, no caso de variáveis discretas, são formadas por um conjunto limitado de estados mutuamente exclusivos. A união dos arcos e variáveis constituem um grafo dirigido sem ciclos. A direção indicada por um arco representa uma relação de causa e efeito entre duas variáveis, ou seja, um arco que sai do nó A e vai para o nó B demonstra que o nó A representa uma provável causa de B normalmente é dito que A é pai de B e B é descendente de A . No caso de ausência de pais, o nó é chamado de nó raiz. Para cada variável A que possui como pais $B_1, \dots, B_n$, existe uma probabilidade $P(A|B_1, \dots, B_n)$. No caso de A representar um nó raiz a probabilidade se reduz a $P(A)$.

Segundo Santos & Droguett (2005), matematicamente, uma RB é uma par $N = \{(V, E), P\}$ onde (V, E) são respectivamente os nós e as arestas de um Grafo Acíclico Direcionado (GAD), e P é a distribuição de probabilidade a respeito de V . Variáveis discretas aleatórias $V = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ são distribuídas para os nós, enquanto as arestas E representam o relacionamento causal probabilístico entre os nós.

2.2.1 Teorema de Bayes

Sejam dois eventos A e B , tais que $P(A)$ e $P(B)$ são maiores que 0, então:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}, \quad (2.44)$$

onde:

$P(A)$ é a probabilidade a priori do evento A ;

$P(B|A)$ é a verossimilhança da evidência B , assumindo a ocorrência do evento A ;

$P(A|B)$ é a probabilidade a posteriori de A dado B .

2.2.2 Nós e Valores

A construção da RB requer que sejam identificadas as variáveis envolvidas no problema, após essa identificação deve ser mapeada as dependências qualitativas existentes entre essas variáveis, para isso deve-se utilizar nós conectados através de arcos, obtendo-se um grafo acíclico, já que partindo-se de qualquer um dos nós da rede não é possível o retorno para o mesmo nó. No momento da identificação das variáveis e posterior representação das mesmas por nós, Korb e Nicholson (2003) afirmam que é necessário ter respostas para as seguintes questões: O que os nós representam e que valores eles podem assumir? Em se tratando de variáveis discretas elas devem assumir valores que sejam tanto mutuamente exclusivos como exaustivos. Dentre alguns tipos de nós discretos pode-se destacar os seguintes:

- Nós Booleanos: Assumem valores binários, ou seja, verdadeiro e falso;
- Valores ordenados: A variável consequência é um tipo de nó que assume valores ordenados, pois ela pode assumir valores do tipo: baixa, média e alta.
- Valor integral: São nós que podem assumir valores inteiros, por exemplo a variável idade pode assumir valores de 0 a 120 anos.

Quanto à ordenação dos nós a ordem correta de adicioná-los é feita começando pelas causas, isto é, pelos nós raízes da rede e em seguida incluem-se as variáveis que sofrem o efeito. Isso é feito de forma sucessiva até se atingirem as variáveis que não possuem uma

relação causal com nenhuma outra, tais variáveis recebem o nome de folhas da rede. A ordenação de causas para efeitos conduz em geral a redes mais compactas e de mais fácil definição em termos de probabilidades

2.2.3 Estrutura

Como foi dito anteriormente, a estrutura da RB representa as relações qualitativas existentes entre as variáveis que compõem o problema. Se um determinado nó provoca algum efeito em outro, estes devem estar ligados através de um arco de forma que a direção da ligação caminhe do nó de causa até o nó de efeito. A figura 2.14 mostra uma representação de uma RB e permite uma melhor compreensão do que foi comentado.

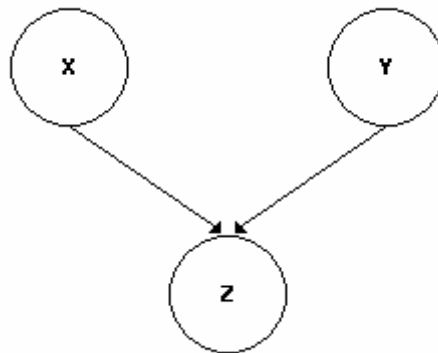


Figura 2.14 - Exemplo de uma Rede Bayesiana

É possível notar através da estrutura apresentada na RB da figura 2.14 que os nós X e Y são pais do nó Z e que o efeito sofrido pelo nó Z é determinado pelos nós X e Y . Neste caso o nó Z trata-se de um nó folha e os nós X e Y são chamados de nós raízes.

2.2.4 Tabelas de Probabilidades Condicionais

Após a estrutura da rede ter sido bem definida, é preciso quantificar as relações existentes. Isto é feito pela atribuição da distribuição de probabilidade para cada nó, construindo assim, uma tabela de probabilidades condicionais (TPC) (Menêzes & Droguett, 2005). A quantidade de pais que a variável possui bem como o número de estados que ela pode assumir determinam o tamanho das TPCs. Em se tratando de variáveis discretas, é necessário identificar todas as combinações que podem ser formadas pelos nós pais de um determinado nó filho. Caso a relação entre nós pais e nós filhos seja completamente arbitrária, o preenchimento dessas entradas pode ser algo que necessite de muita experiência. No

entanto, na maior parte dos casos, esta relação pode ser bem adaptada a algum padrão (distribuições canônicas), sendo necessário apenas identificar qual o padrão e introduzir alguns parâmetros facilitando desta forma o trabalho necessário.

Em se tratando de distribuições canônicas, o caso mais simples é o representado por nós determinísticos. Um nó determinístico tem o seu valor explicitamente determinado a partir dos pais, sem incerteza. Por exemplo, relação entre os nós pais Carioca, Pernambucano e Paulista, e o nó filho Brasileiro é determinado especificamente pela disjunção dos pais. A figura 2.15 representa o exemplo citado.

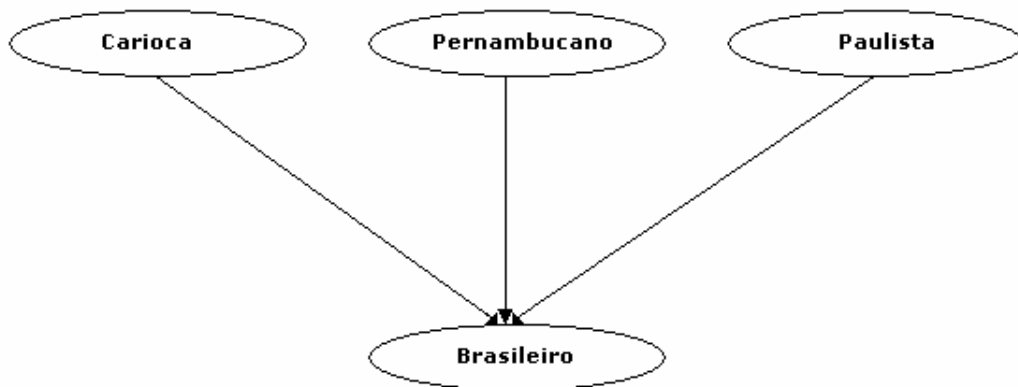


Figura 2.15 - Exemplo de nó determinístico

Tabela 2.2 – TPC referente ao exemplo apresentado sobre nó determinístico.

Carioca	Pernamb.	Paulista	P(Brasileiro)
V	V	V	1
V	V	F	1
V	F	F	1
...	...	...	...
F	F	F	0

Em geral, relações que apresentam incerteza podem ser caracterizadas como relações que apresentam ruídos. A relação com ruído padrão é chamada *ruído-OU*, por se tratar de uma generalização da relação lógica OU. Em lógica proposicional pode-se dizer que o estado Febre é verdadeiro se e somente se Gripe, Resfriado ou Malária é verdadeiro. A relação *ruído-OU* adiciona um nível de incerteza à relação OU, considerando três suposições:

- (a) Cada causa possui uma chance independente de causar o efeito;
- (b) todas as possibilidades estão listadas;
- (c) a inibição de uma causa é independente da inibição das demais.

Considere o exemplo:

$P(\text{Febre}|\text{Gripe}) = 0,4$, $P(\text{Febre}|\text{Resfriado}) = 0,8$ e $P(\text{Febre}|\text{Malária}) = 0,9$, para estes valores os parâmetros de ruído serão respectivamente 0,6, 0,2, 0,1. Se nenhum nó pai é verdadeiro, então o nó filho é falso com 100% de chance. Se apenas um pai é verdadeiro, então a probabilidade do nó filho ser falso é igual ao ruído do nó pai verdadeiro (ou o produto do ruído dos pais, caso exista mais de um verdadeiro). A tabela 2.3 abaixo apresenta o resultado para o exemplo.

Tabela 2.3 - Ruído-OU.

Gripe	Resfriado	Malária	P(Febre)	P($\neg$ Febre)
F	F	F	0	1
F	F	V	0,9	0,1
F	V	F	0,8	0,2
F	V	V	0,98	$0,2 \times 0,1 = 0,02$
V	F	F	0,4	0,6
V	F	V	0,94	$0,6 \times 0,1 = 0,06$
V	V	F	0,88	$0,6 \times 0,2 = 0,12$
V	V	V	0,988	$0,6 \times 0,2 \times 0,1 = 0,012$

2.2.5 Condição Markoviana

Uma das propriedades dos processos markovianos é a falta de memória, tal propriedade afirma que se um sistema encontra-se no estado i em um instante t , os estados futuros não irão depender dos estados anteriores, ou seja, conhecendo-se o atual estado do processo, as informações passadas não serão relevantes para se fazer inferência sobre o futuro. Probabilisticamente, a propriedade Markoviana é dada pela expressão:

$$P[X(t+v) = j \mid X(t) = i, X(u) = x(u)] = P[X(t+v) = j \mid X(t) = i] \quad (2.45)$$

2.1 Definição (Condição Markoviana): Seja P a distribuição de probabilidade conjunta das variáveis aleatórias de um conjunto V e seja um GAD = (V, E) . É dito que $N = \{(V, E), P\}$ satisfaz a condição markoviana se para cada V , onde $X \in V$, X é condicionalmente

independente de todas as variáveis que compõem o conjunto dos seus não descendentes, dados os valores das variáveis que compõem seus conjuntos de pais. Ou, em notação probabilística, $\{X\} \text{ ind } ND(X)|Pais(X)$, onde $ND(X)$ refere-se ao conjunto de não descendentes de X e $Pais(X)$ ao seu conjunto de pais.

Desta forma, as RBs utilizam a condição markoviana para considerar um nó raiz independente de seus não descendentes. Portanto, existirá dependência direta entre dois nós apenas quando existir um arco fazendo conexão direta entre eles.

2.2.6 Atualização da Crença

À propagação da informação através da rede dá-se o nome de atualização da crença ou propagação da probabilidade. É neste ponto que ocorre a computação das probabilidades posteriores dos nós desconhecidos, a partir de alguma evidência. Evidência em uma variável é uma declaração de uma certeza de seus estados. Dentre os diferentes tipos de evidências tem-se:

- **Evidência Específica:** é aquela em que uma determinada variável ou nó de uma rede assume um valor x , ou seja, $X = x$. Isto ocorrendo tem-se uma evidência do tipo específica.
- **Evidência Negativa:** observa-se uma evidência e percebe-se que uma variável Y pode assumir apenas os valores y_1 e y_2 , implicando que todos os outros valores são impossíveis. Esta mesma evidência também denomina o caso em que a evidência diz que a variável Y não está no estado y_1 , mas pode assumir qualquer outro estado.
- **Evidência Virtual ou Evidência Verossimilhança:** É utilizada quando por exemplo um médico ler o resultado de um exame de um paciente e diagnostica uma doença como positiva mas ele não tem a completa certeza da sua afirmação, e atribui uma probabilidade para a sua resposta. Neste caso é realizado um tratamento probabilístico onde adota-se uma nova distribuição a *posteriori*.

A atualização da crença é dividida em quatro tipos de raciocínio que são as forma de atualização que uma rede assume baseada em uma ou mais evidências obtidas. Abaixo são descritos os quatro tipos de raciocínio:

- **Raciocínio Preditivo:** A evidência surge na causa para atualizar a crença sobre os efeitos, ou seja, do pai para o filho. A atualização ocorre no mesmo sentido do arco da rede.
- **Raciocínio Diagnóstico:** A evidência parte do efeito para atualizar a crença sobre a causa. A atualização se dá no sentido contrário ao arco da rede.
- **Raciocínio Inter-Causal:** Envolve evidências de causa mútua com um efeito comum.
- **Raciocínio Combinado:** Em uma rede com três nós, em que A é um nó raiz e pai de C que por sua vez é pai de um nó folha B . As evidências são nos nós A e B e ocorre uma atualização da crença sobre o nó intermediário C .

2.2.7 Independência Condicional

Seja o par $N=\{(V,E),P\}$, se este satisfizer a condição markoviana então duas variáveis são condicionalmente independentes dado que se sabe sobre uma outra variável que se encontre entre as duas variáveis no fluxo de dependências. Os exemplos abaixo facilitam o entendimento deste conceito.

De acordo com a condição Markoviana, é possível afirmar que em uma rede com nós conectados em série, como a apresentada na figura 2.16 a probabilidade de C dado a ocorrência de B é a mesma de C dado a ocorrência de B e A , isto mostra que o fato de A ter ocorrido não determina nenhuma diferença na crença sobre C dado que já se sabe que B ocorreu. Isto indica que C é condicionalmente independente de A , dado que B ocorreu. Em termos probabilísticos pode-se escrever: $\{C\} \text{ ind } \{A\}|\{B\}$.



Figura 2.16– Rede com nós conectados em série

Em uma conexão do tipo causa comum, apresentada na figura 2.17 é possível observar que quando um dos efeitos está presente (A ou C), a probabilidade de ocorrência de B é alterada e por consequência a probabilidade do outro efeito estar presente também será modificada. No entanto se o conhecimento sobre B é verdadeiro, então a presença do efeito C não dirá nada sobre a probabilidade de se ter o efeito A. Com isso C é condicionalmente independente de A dado que B ocorreu. Probabilisticamente tem-se: $\{C\} \text{ ind } \{A\}|\{B\}$.

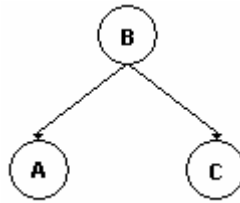


Figura 2.17– Rede com nós conectados por causa comum

A figura 2.18 representa um exemplo em que ocorre o efeito, isto é, tanto A como C são prováveis causadores de B, neste caso é dito que os pais são marginalmente independentes, porém o resultado do efeito comum B depende tanto da informação de A como a de C. Portanto, a probabilidade de C dado B é dita condicionalmente dependente de A quando se sabe que B ocorre e que C não explica a provável causa de B. Neste caso ocorre a violação da condição markoviana

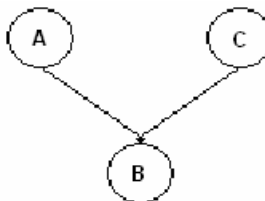


Figura 2.18 – Rede com nós conectados por efeito comum

2.2.8 d-separação

Conforme apresentado anteriormente, uma nó em uma RB possui independência condicional em relação a seus predecessores na rede dado o nó pai. Entretanto, para o uso de métodos de inferência em uma rede é imprescindível que as relações existentes entre os nós de uma rede sejam bem detalhadas. Por exemplo, é necessário saber se um conjunto de nós X é independente de outro conjunto Y , dado um conjunto de evidências E , em outras palavras, é preciso saber se X é d-separado de Y . Se todo caminho não dirigido entre um nó em X e um nó em Y é d-separado por E , então X e Y são condicionalmente independentes dada a evidência E .

Um conjunto de nós E d-separa dois conjuntos de nós X e Y , se todo o caminho não dirigido de um nó em X para um nó em Y é bloqueado dado E . Um caminho é bloqueado por um conjunto de nós E se existe um nó Z no que garante algumas das três condições:

- 1) Z está em E e Z possui um arco de entrada e um arco de saída no caminho.
- 2) Z está em E e Z possui dois arcos de saída no caminho não dirigido.
- 3) Z e nenhum de seus descendentes não estão em E e ambos os arcos no caminho não dirigido são de chegada em Z .

A d-separação é denotada por ds , no exemplo da figura 2.16 tem-se que: $\{C\}ds\{A\}|\{B\}$.

2.2.9 Distribuição de probabilidades correspondentes à rede

A partir de um conjunto de probabilidades condicionais, é possível calcular a distribuição de probabilidade correspondente à RB. A seguir é apresentada a expressão utilizada para o cálculo da probabilidade conjunta de uma rede:

$$P(U) = P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | pais(X_i)) \quad (2.46)$$

Através da probabilidade conjunta é possível chegar a resultados para as probabilidades posteriores de cada nó ou variável, somando-se, para cada resultado todas as probabilidades que uma variável pode assumir numa rede e normalizando os valores encontrados.

3 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA

3.1 Erro Humano

Segundo Wickens *et al.* (1997), erro humano é um comportamento inapropriado que diminui o nível de eficiência ou segurança de um sistema, o qual pode ou não resultar em acidentes ou danos.

Quando existe ação humana em determinado processo é necessário fazer uma análise de confiabilidade humana (ACH) e o erro humano é a base para que seja executada qualquer análise deste tipo sobre um cenário em estudo. Projetistas de equipamentos, supervisores, pessoas responsáveis por procedimentos ou treinamento são indivíduos passíveis de cometerem erro humano, no entanto, o erro humano é mais freqüentemente usado para referir-se ao comportamento inapropriado do executor, pessoa que trabalha diretamente com o sistema, como por exemplo: erro do operador.

O erro humano poderá ter diferentes causas sendo necessárias diferentes medidas para preveni-lo. Para saber o que prevenir ou que tipo de erro deve ser evitado, é necessário identificar a maneira ou modo como estes erros são cometidos para aplicar a ACH, pois através dela serão desenvolvidos métodos sistemáticos para identificar o potencial de erro humano e quantificar a probabilidade de erro humano (PEH).

3.2 Confiabilidade Humana

Swain & Guttman (1983) afirmam que a probabilidade de um procedimento ou tarefa ser concluído com sucesso pelo operador ou equipe em qualquer estágio na operação de um sistema dentro do mínimo tempo exigido (quando a dimensão do tempo é relevante) deve ser entendida como confiabilidade humana.

A ACH representa o método utilizado para a avaliação da confiabilidade humana. Ela estuda qual a melhor forma do homem agir em um determinado sistema, considerando suas limitações e os fatores que influenciam no seu desempenho. A ACH requer para sua realização que sejam identificadas as ações humanas que têm relevância para uma determinada tarefa, ou seja, é necessário que sejam identificadas todas as etapas da tarefa em que o executor apresenta uma probabilidade de erro significativa.

3.3 Probabilidade de Erro Humano

De acordo com Swain & Guttman, (1983) e Kumamoto (1996) a maioria dos especialistas responsáveis no desenvolvimento de análise de confiabilidade humana definem probabilidade de erro humano (PEH) através da definição freqüentista conforme expressão apresentada a seguir:

$$PEH = \frac{\text{Número de Falhas}}{\text{Número de Oportunidades para Falhar}} \quad (3.1)$$

A definição referida requer para seu cálculo que seja encontrado o “*número de oportunidades para falhar*”. De uma forma geral, as pessoas deviam ser capazes de distinguir quando duas distintas oportunidades para falhar são realizações de um mesmo evento. Infelizmente, esse processo de identificação é difícil para indivíduos uma vez que, diferentemente de equipamentos, as pessoas podem aprender com seus erros. Conseqüentemente, mesmo que o ambiente externo pudesse ser mantido constante, é impossível que uma pessoa depare-se com a mesma situação duas vezes com o mesmo grau de experiência.

Uma outra definição é chamada de subjetiva ou bayesiana. Neste caso a probabilidade é determinada pelo grau de confiança de um indivíduo na ocorrência de um evento, ou seja, na ocorrência de uma falha. Esta noção de PEH mostra-se mais funcional que a anterior.

3.4 Fatores de Desempenho

Segundo Swain & Guttman, (1983), os Fatores de Desempenho (FDs) são todos os fatores humanos que afetam o desempenho humano e conseqüentemente auxiliam na determinação da probabilidade de erro humano. Os FDs evidenciam a incompatibilidade existente entre as limitações humanas e as condições impostas para o trabalho (Menêzes & Droguett). Como exemplos de FDs, é possível citar: restrições de tempo para execução de uma tarefa, procedimentos mal elaborados, fadiga, carga de trabalho excessiva, complexidade da tarefa, atenção, entre outros.

De acordo com Swain & Guttman, (1983), existem FDs externos e outros internos à pessoa. Os fatores externos incluem o ambiente de trabalho, especialmente os equipamentos

designados, os procedimentos escritos ou instrumentação oral e etc. Os fatores internos representam as características individuais de cada pessoa, como habilidade, motivação, expectativas que influenciam seu desempenho e etc.

Devido a sua grande importância, o estresse se destaca entre os FDs internos e é tratado isoladamente. Segundo Swain & Guttman, (1983) qualquer força interna ou externa capaz de provocar o estresse recebe o nome de estressor. E de acordo com Lipp (1996) estresse é definido como uma reação do organismo, com componentes físicos e/ou psicológicos, causadas pelas alterações psicofisiológicas que ocorrem quando a pessoa se confronta com uma situação que, de um modo ou de outro, a irrite, amedronte, excite, confunda ou mesmo que a faça imensamente feliz.

Alguns FDs estão listados na tabela 3.1 retirada de Swain & Guttman, (1983).

Tabela 3.1 – Alguns FDs em sistemas homem-máquina (Swain & Guttman, 1983)

FD EXTERNOS		FD ESTRESSANTES	FD INTERNOS
CARACTERÍSTICAS DO LOCAL DE TRABALHO	CARACTERÍSTICAS DA TAREFA E EQUIPAMENTOS	FATORES PSICOLÓGICOS	CARACTERÍSTICAS INDIVIDUAIS
- Característica estrutural - Qualidade do ambiente de trabalho: - Temperatura - Umidade - Radiação - Perturbação sonora - Vibração - Limpeza - Hora de trabalho/ Hora de descanso - Mudança de turnos - Disponibilidade de equipamentos e ferramentas especiais - Estrutura organizacional: - Autoridade - Responsabilidade - Canais de Comunicação - Política organizacional da empresa - Prêmios e benefícios	- Percepção exigida na tarefa - Movimentos exigidos na tarefa: - Velocidade - Força - Precisão - Atenção aos sinais de alerta - Solicitação antecipada - Interpretação - Tomada de decisão - Complexidade - Estreiteza da tarefa - Frequência e repetitividade - Criticalidade da tarefa - Capacidade de memória exigida para execução da tarefa: - Termos exigidos durante muito tempo na memória - Termos exigidos durante pouco tempo na memória	- Surpresa inicial - Duração do estresse - Velocidade da tarefa - Carga de atividade - Riscos na execução da tarefa - Ameaças: - De fracasso - Perda do trabalho - Trabalhos monótonos - Trabalhos de longos e sem sentido - Conflitos de avaliação de desempenho do trabalho - Ausência de reforço ou reforço negativo - Senso de privação - Distração por: - Barulho - Luminosidade - Movimento - Tela trêmula - Cor - Dicas inconsistentes	- Treinamento prévio/experiência - Estado prático atual ou destreza - Personalidade e inteligência variável - Motivação e atitude - Estado emocional - Estresse (mental ou tensão corpórea) - Conhecimento do desempenho necessário padrão - Diferença sexual - Condição física - Atitude baseada na influência da família, em outras pessoas de fora da família ou agências - Identificação do grupo
FATORES ORGANIZACIONAIS		FATORES FISIOLÓGICOS	
- Procedimento realizado (escrito ou não escrito) - Comunicação escrita ou oral - Prevenção e advertência - Método de trabalho - Política de planta (Prática de compra)	- Requisito matemático - <i>Feedback</i> - Atividade dinâmica vs passo a passo - Estrutura e comunicação da equipe - Fatores de interface homem-máquina: - Projeto do primeiro equipamento - Teste do equipamento - Fabricação do equipamento - Ajuda no trabalho - Ferramentas	- Duração do estresse - Fadiga - Dor ou desconforto - Fome ou sede - Temperatura extrema - Radiação - Força G extrema - Pressão atmosférica - Externa - Oxigênio insuficiente - Vibração - Restrição de movimento - Falta de exercício físico - Interrupção do ritmo cardíaco	

3.5 Métodos de ACH

A maioria dos métodos de ACH, não levam em conta as relações de dependência existente entre os fatores de desempenho (Hollnagel, 1998). De acordo com Menêzes & Droguett (2007), não considerar essas relações é realizar uma ACH através de suposições irreais de independência, distanciando-se assim de uma representação apropriada do

comportamento humano. Apesar disso, existem métodos de ACH, classificados como de primeira e segunda geração que desconsideram as relações de dependência.

Dentre os modelos de primeira geração destaca-se o THERP, uma metodologia que utiliza árvores de eventos onde cada nó da árvore é associado a uma ação e suas ramificações representam o erro ou sucesso na execução da ação. Devido às dificuldades presentes no processo de modelagem de ações humanas utilizando árvores binárias de eventos, como por exemplo, representar o contexto em que os eventos ocorrem através dos nós presentes na árvore, este método não leva em conta a dependência entre eventos e entre FDs, o que constitui a sua principal deficiência.

Os modelos de segunda geração surgiram com o objetivo de superar as deficiências presentes nos métodos de primeira geração. Dentre os modelos de segunda geração destaca-se o CREAM, que utiliza uma generalização da árvore de eventos numa classificação policotômica, proporcionando uma quantificação mais explícita da influência dos fatores sobre o desempenho dos operários. No entanto, a suposição de independência entre eventos continua e, além disso, de acordo com Kim (2001) o CREAM não incorpora explicitamente o tratamento de contextos dinâmicos.

3.6 ACH Via Redes Bayesianas

Percebe-se, portanto, que modelar as causalidades existentes nas ações humanas tornou-se um grande desafio para ACH e, conseqüentemente, torna-se necessário o desenvolvimento de uma metodologia que venha a contornar essas deficiências. Diante disso Menêzes & Droguett (2007), discutiram sobre como a utilização das RBs poderia solucionar as expectativas levantadas no trabalho de Mosleh e Chang (2004) sobre futuros métodos de ACH. A seguir são apresentadas tais expectativas e suas respectivas soluções através de RBs Menêzes & Droguett (2007).

- 1) *Identificação de erros de maneira contextual e estimação de probabilidades:* RBs contextualizam o erro, tanto qualitativamente, através dos causadores presentes vistos através da estrutura gráfica, quanto quantitativamente, através do cálculo das probabilidades condicionais da rede;
- 2) *Melhores modelos causais:* RBs são, por definição, estruturas gráficas que representam as relações de causa e efeito entre variáveis;

- 3) *Representação mais realista da natureza dinâmica das interações homem-sistema:* RBs permitem representar a dinâmica das interações, através da montagem de cenários na rede, e as relações de causa e efeito pertencentes ao contexto.
- 4) *Capaz de ser aplicada em contextos diferentes:* RBs são uma grande ferramenta para analisar diferentes contextos. Por exemplo, monitorar problemas operacionais através de diagnósticos e prognósticos, possibilitando um melhor entendimento sobre a relevância dos FDs nos operadores, permitindo assim a providência de medidas que atenuem os seus efeitos. Pode-se também solucionar problemas gerenciais através do conhecimento prévio de fatores decisivos, tais como uma melhor definição das qualidades de um operador na contratação;
- 5) *Melhor calibração com eventos operacionais atuais:* através de RBs é possível atualizar o sistema realizando inferências subjetivas e empíricas.

A figura 3.1 apresenta um exemplo de RB aplicada na ACH. É possível observar através da topologia da rede a forma como os FDs atenção, fadiga, condicionamento físico, carga de trabalho, design de equipamentos, estado emocional e insetos interagem influenciando o desempenho do eletricista de apoio na atividade de substituição de cadeias de isoladores de linhas de transmissão (Menêzes & Droguett, 2007).

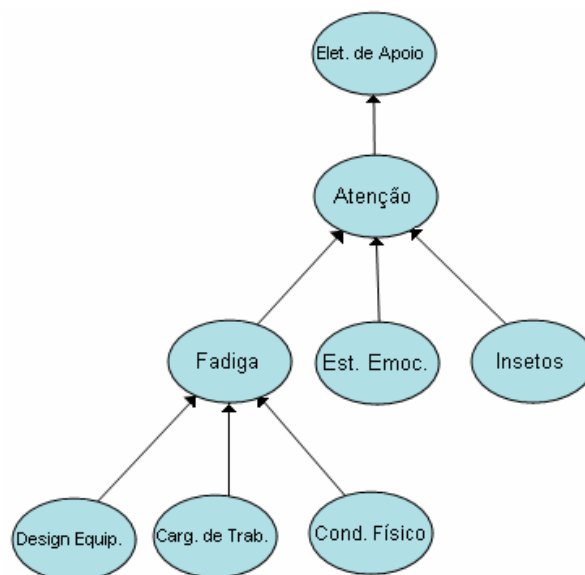


Figura 3.1 – Exemplo de Rede Bayesiana aplicada a análise de confiabilidade humana

Observa-se da figura 3.1 que a topologia de uma RB utilizada na ACH demonstra as relações existentes entre os FDs determinando assim uma estrutura de causa e efeito. Desta forma percebe-se que a identificação dos erros é feita de maneira contextual, já que eles são determinados através das relações representadas na RB. Como visto na seção 2.2, as RBs trabalham com probabilidades condicionais permitindo, através do teorema de *Bayes* a estimação de probabilidades. Além disso, RBs permitem que suas crenças sejam atualizadas dadas novas evidências. Isso proporciona uma análise do cenário considerando diversas situações que podem existir no ambiente de trabalho.

Em situações de interesse prático, a quantificação de uma RB é um desafio. Isso decorre da elevada necessidade de dados para compor tal tarefa, já que o número de probabilidades a serem inseridas na quantificação de uma RB discretas é dependente do número de nós e do número de níveis de cada um desses nós da RB. Por exemplo, considere o simples caso em que cada nó para a RB representada na figura 3.1 seja binário (2 níveis). Neste caso será necessário especificar 23 probabilidades e dentre estas 18 são probabilidades condicionais. Tal situação é ainda mais crítica no contexto de confiabilidade humana, pois freqüentemente o analista se depara com a escassez de dados empíricos sobre o desempenho do elemento humano. Assim, em geral, recorre-se a opinião do especialista. É exatamente neste contexto que o presente trabalho se enquadra. O desenvolvimento de um método de educação lingüística será proposto no capítulo 7 com o objetivo de apresentar uma solução para este problema quando os parâmetros de interesse das RBs (probabilidades) assumem valores *fuzzy*.

4 MÉTODOS DE EDUCAÇÃO

4.1 Introdução

Na análise probabilística de risco (APR), é notada a grande dificuldade de se trabalhar quando da escassez ou total ausência de dados. Uma forma de se contornar esse problema é fazer uso de métodos de educação para coletar a informação necessária de pessoas que possuem grande conhecimento sobre o problema analisado, os chamados especialistas. Segundo Firmino *et al.* (2007), existem na literatura vários métodos que objetivam eduzir a opinião de especialistas, e estes normalmente são classificados em 3 tipos: método direto, indireto e paramétrico. Como exemplo de método direto é possível citar o trabalho de Noortwijk *et al.* (1992), no qual o espaço paramétrico é dividido em partições e a cada uma dessas partições são atribuídas, pelos especialistas, probabilidades do parâmetro analisado estar contido naquela partição. Com isso é estimada a função de probabilidade referente à opinião do especialista sobre o parâmetro investigado. De acordo com Ayubb (2001), métodos diretos podem produzir resultados insatisfatórios quando os especialistas não possuem facilidade em trabalhar com a noção de probabilidade. Dentre os métodos indiretos destacam-se os trabalhos de Campello (2002), Nadler & Campello (2001), Ayyub (2001) e Finetti (1974). Neste contexto o parâmetro de interesse é quantificado indiretamente, sem fazer uso de questões diretas relacionadas à quantidade sobre investigação. Finalmente, o método paramétrico é normalmente utilizado quando, a priori, se sabe que o parâmetro investigado segue uma distribuição conhecida de probabilidade, pode-se destacar aqui os trabalhos de Bedford *et al.* (2006), Oakley (2002), Cooke (1991), Coolen (1996) e O'Hagan (2004).

4.2 Educação Segundo Firmino et al (2007)

Nesta seção será apresentada uma descrição do método apresentado por Firmino *et al.* (2007). Isto se faz necessário já que o método de educação lingüístico que será proposto no capítulo 5 utiliza como base os princípios fundamentados por Firmino et al (2007). O referido método se baseia na teoria de estimação de intervalos bayesianos e em algoritmos computacionais de busca.

Basicamente o método proposto por Firmino et al (2007) estima, através da opinião do especialista, a distribuição de probabilidade sobre o parâmetro de interesse por meio de um

questionário composto de um conjunto de passos os quais compreendem dois tipos de questões:

- **Questões de Decisão:** Tem o objetivo de questionar o especialista sobre qual de dois intervalos, definidos previamente, ele acha mais provável de conter o parâmetro.
- **Questões sobre Incerteza:** Questiona o especialista sobre a credibilidade¹ que ele atribui a sua resposta dada na *questão de decisão*. A resposta a essa questão é dada em termos probabilísticos. A terminologia credibilidade foi utilizada anteriormente por Bernardo & Smith (1995).

As questões de decisão reduzem o espaço de alternativas pela metade. Se o parâmetro está entre um limite inferior, l , e um superior, u , e m é o ponto médio do intervalo inicial $[l, u]$, pergunta-se ao especialista: O parâmetro está no intervalo $[l, m]$?

Caso a resposta seja positiva, é então identificado um novo intervalo, em que o especialista atribui maior chance do parâmetro estar contido. Esse novo intervalo será dado por $[l, m]$. Se de outra forma a resposta for negativa, o intervalo no qual o especialista atribui maior chance do parâmetro estar contido é dado por $[m, u]$. Com o novo intervalo, surge também um novo ponto médio e assim é repetido o processo até o momento em que o especialista não se sentir mais à vontade para responder as perguntas.

A questão sobre incerteza é feita imediatamente após a escolha de cada um dos intervalos. Nesta questão o especialista é perguntado sobre o grau de credibilidade que ele atribui a sua escolha.

A habilidade do especialista em continuar respondendo ao questionário irá determinar o número de passos do processo de educação. A cada passo as perguntas serão feitas sobre intervalos mais restrito do espaço paramétrico, tornando o questionamento cada vez mais difícil de ser respondido pelo especialista chegando-se a um ponto em que ele não será mais capaz de responder. Nesse momento é então encerrado o processo de educação e com isso é determinada uma distribuição de probabilidades expressando as incertezas do especialista sobre suas opiniões em face ao parâmetro estudado.

¹ **Credibilidade:** Valor probabilístico que indica o quanto um especialista acredita que sua resposta sobre uma determinada questão esteja correta. Também conhecida como grau de crença.

A partir das respostas dadas às questões de decisão e incerteza é traçada a distribuição de probabilidade do parâmetro segundo as crenças do especialista. Para um melhor entendimento desse processo considere um intervalo inicial $[l, u]$ de ponto médio m . Tal intervalo é inicialmente determinado por um especialista, que afirma que o parâmetro (θ) está contido neste intervalo com credibilidade $\alpha_0 = 100\%$ (Figura 4.1(a)).

Suponha que é perguntado ao especialista se o parâmetro está contido no intervalo $[m, u]$ e sua resposta é “não”. O especialista é então questionado sobre a credibilidade que ele atribui a sua resposta anterior e ele afirma que sua resposta tem credibilidade α_1 . Então o intervalo $[m, u]$ recebe uma massa probabilística cujo valor é de $(1 - \alpha_1)$ e o intervalo $[l, m]$ guarda uma massa probabilística na ordem de α_1 que ainda será trabalhada (Figura 4.1(b)).

O especialista é então perguntado se o parâmetro está contido no intervalo $[m_2, m]$, onde m_2 é o ponto médio do intervalo $[l, m]$ suponha que sua resposta seja “sim”, o especialista atribui então uma credibilidade α_2 para a sua resposta o que significa que o intervalo $[l, m_2]$ receberá uma massa probabilística na ordem de $[(1 - \alpha_2) \text{ de } \alpha_1]$, já que o intervalo $[l, m]$ havia guardado uma massa probabilística da ordem de α_1 para ser trabalhada. Conseqüentemente o intervalo $[m_2, m]$ guarda uma massa probabilística da ordem de $[\alpha_2 \text{ de } \alpha_1]$ (Figura 4.1(c)). Esse processo continua até o momento em que o especialista não tenha mais condições de fazer a escolha entre dois intervalos.

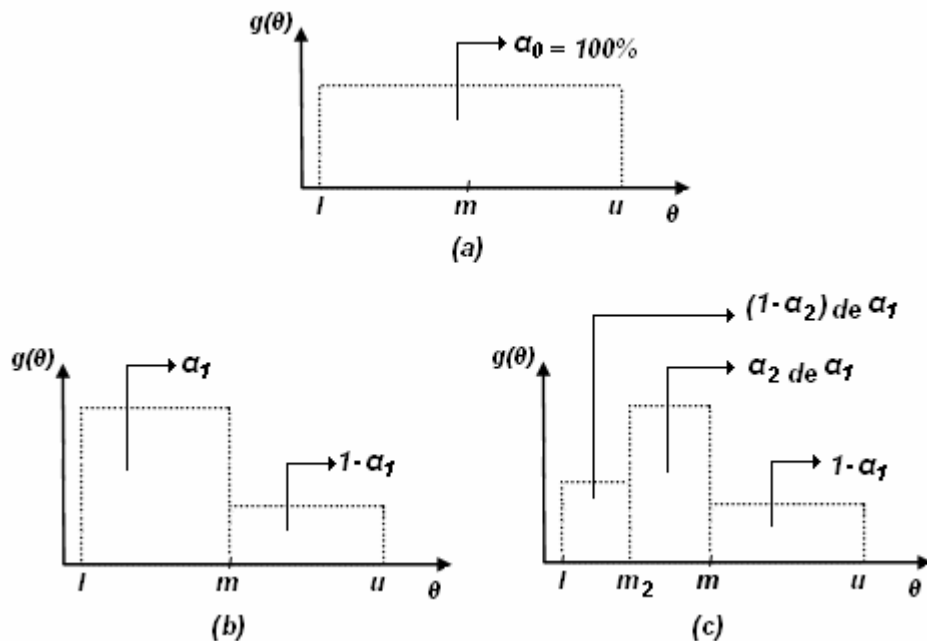


Figura 4.1 – Construção da distribuição de probabilidade de acordo com a opinião do especialista.

4.3 Performance de Um Método de Educação

De acordo com Hokstad et al (1998), quando se deseja avaliar um método de educação, deve-se preocupar com o desempenho das seguintes propriedades:

- Simplicidade: É a capacidade do especialista entender as questões a serem respondidas de forma a existir um bom ajuste entre o que o analista precisa educar e o que o especialista entende sobre o assunto;
- Eficiência: É a capacidade de reduzir o tempo de educação da opinião do especialista;
- Refinamento: É a capacidade de refinar a opinião do especialista de forma gradual;
- Controle Empírico: É a capacidade de supervisionar as respostas fornecidas pelo especialista de forma a se controlar a coerência das respostas evitando desta maneira o desvio de foco durante a fase de educação.

4.4 Calibração do Especialista

Segundo Brenner (2003), em um típico teste psicológico de calibração, o participante responde a um número de questões ou faz uma série de previsões sobre o futuro. A cada uma das suas respostas o especialista atribui um nível de credibilidade. Ao final do estudo é feita uma comparação entre a frequência média de acertos e a credibilidade média do participante. No caso dessas medidas apresentarem valores próximos o participante é considerado bem calibrado. Na seção 6.2 serão apresentados de forma mais detalhada dois testes psicológicos de calibração que buscam avaliar a autoconfiança do especialista em relação a sua intelectualidade e percepção.

5 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

5.1 Introdução

O método de educação que será aqui apresentado é baseado na teoria *fuzzy* proporcionando facilidade na coleta da opinião do especialista já que são usadas variáveis lingüísticas no processo tornando o mesmo mais amigável. Além disso, a teoria *fuzzy* é capaz de tratar as incertezas associadas às probabilidades condicionais. Ao final do presente trabalho, será feita uma aplicação do método que envolverá estimativas de probabilidades de erros humanos. Entretanto, a utilização desta abordagem não se restringe apenas a problemas de erro humano, pois ela pode ser adaptada a qualquer processo que envolva a estimação de probabilidades que sejam determinadas por variáveis causais.

5.2 Processo de Educação

Uma das principais virtudes do método aqui proposto é a facilidade na obtenção da opinião do especialista uma vez que o processo de educação torna-se menos desgastante. Isto decorre do fato de que o método é todo feito considerando variáveis lingüísticas, facilitando e tornando mais rápida a resposta do especialista. O método de Firmino *et al.* (2007) é baseado na construção da distribuição de probabilidade sobre um intervalo numérico. Neste trabalho, pretende-se utilizar variáveis lingüísticas, mais especificamente, os parâmetros de interesse serão probabilidades referentes a nós de RBs *fuzzy*, que lingüisticamente podem assumir os valores: *mínima (Min)*, *muito baixa (MB)*, *baixa (B)*, *baixa moderada (BM)*, *moderada (M)*, *alta moderada (AM)*, *alta (A)*, *muito alta (MA)*, *máxima (Max)*. A variável lingüística será representada por conjuntos *fuzzy* triangulares como apresentado na figura 5.1:

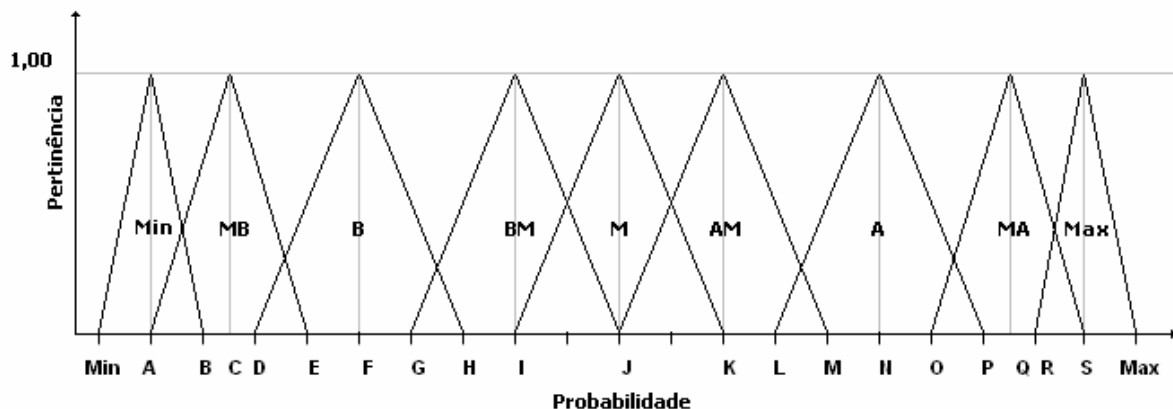


Figura 5.1 - Conjuntos *fuzzy* para a variável lingüística probabilidade

A escolha de números *fuzzy* triangulares para a representação dos conjuntos *fuzzy* justifica-se pelo que já foi discutido na seção 2.1.4, ou seja, a utilização de números *fuzzy* triangulares deve acontecer quando o parâmetro em análise possui uma faixa de variação e apenas um número dentro dessa faixa apresenta uma maior possibilidade de ocorrência em relação aos demais valores (Pereira, 2002). Como o parâmetro analisado neste trabalho trata-se de uma probabilidade acredita-se que existe um valor para esse parâmetro cuja pertinência seja maior que os demais valores internamente a cada conjunto *fuzzy*.

A construção da distribuição de probabilidade será feita então de forma análoga a descrita no método de Firmino *et al.* (2007) apresentado na seção 4.2. De fato, inicialmente serão feitas duas perguntas ao especialista. A primeira será: “Qual o valor mínimo que você acredita que o parâmetro pode assumir?”; a segunda será: “Qual o valor máximo que você acredita que o parâmetro pode assumir?” Uma vez respondidas essas duas perguntas o especialista terá definido os limites inferior e superior para o universo de discurso que irá trabalhar, ou seja, o intervalo para o qual é atribuído 100% de certeza para que o parâmetro esteja nele contido. Após a definição do intervalo, todos os números *fuzzy* triangulares, correspondentes aos conjuntos *fuzzy* apresentados na figura 5.1 serão calculados. Para demonstrar como são feitos esses cálculos, considere a figura 5.2. Note que o valor máximo da escala é 1 e o mínimo é 0, ou seja, a escala tem comprimento 1.

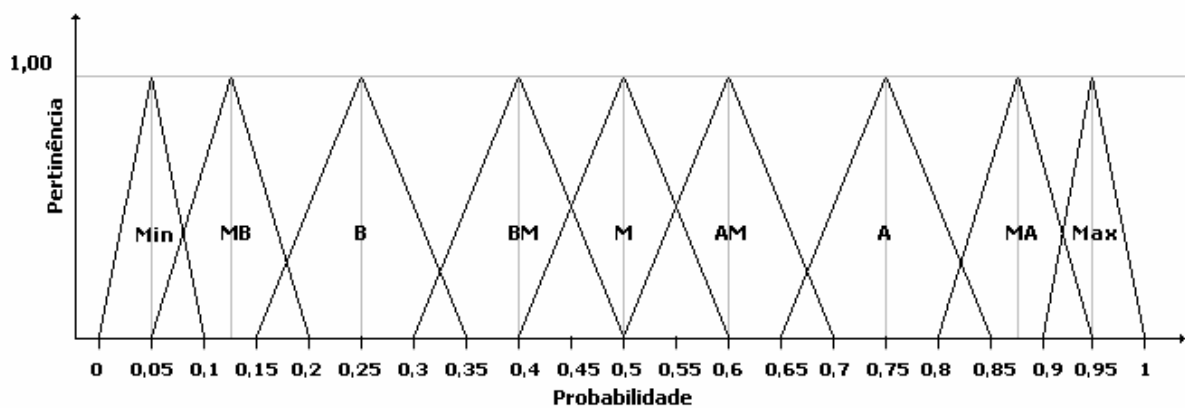


Figura 5.2 - Conjuntos fuzzy para a variável lingüística probabilidade – comprimento 1

Suponha agora que especialista tenha fornecido 0,02 como resposta para o valor mínimo e 0,12 como resposta para o valor máximo. Então os demais valores serão calculados de forma proporcional à escala apresentada na figura 5.2. Por exemplo, o valor correspondente

ao conjunto “*Baixo*”, ou seja, o número triangular (D ; F ; H) (vide fig. 5.1) , poderá ser calculado da seguinte forma:

$$D = \text{Min} + (\text{Max}-\text{Min}) * 0,15 = 0,02 + (0,12 - 0,02) * 0,15 = 0,035$$

$$F = \text{Min} + (\text{Max}-\text{Min}) * 0,25 = 0,02 + (0,12-0,02) * 0,25 = 0,045$$

$$H = \text{Min} + (\text{Max}-\text{Min}) * 0,35 = 0,02 + (0,12-0,02) * 0,35 = 0,055$$

Note que 0,15, 0,25 e 0,35 representam, respectivamente, os valores de D , F e H na escala de comprimento 1 representada na figura 5.2.

Considerando então o intervalo lingüístico [*mínimo*, *máximo*], e o ponto médio deste intervalo, ou seja, o valor lingüístico *moderado* é feita então a seguinte pergunta ao especialista: “*O parâmetro é no mínimo moderado?*”

Caso a resposta seja positiva é então definido um novo intervalo: [*moderado*, *máximo*]. Se, ao contrário, a resposta for negativa, o novo intervalo será então [*mínimo*, *moderado*]. Após a escolha do intervalo o especialista deve responder a seguinte pergunta: “*qual a credibilidade que você atribui a sua resposta?*”

O especialista parte então para uma segunda etapa do processo onde é feita uma das seguintes perguntas (a depender da resposta anterior): O parâmetro é no mínimo *alto*? ou o parâmetro é no mínimo *baixo*? Após a escolha do intervalo é determinado um valor probabilístico referente à crença do especialista sobre a sua resposta isto é feito através da pergunta referente à credibilidade.

A terceira etapa será compreendida por uma de quatro possíveis perguntas: caso o especialista tenha respondido sim na primeira etapa, ele poderá responder duas possíveis perguntas a depender da escolha dele na segunda etapa: caso ele tenha dito na segunda etapa que o parâmetro é no mínimo *alto* a pergunta será: “*o parâmetro é no mínimo muito alto?*” Se ao contrário ele tiver respondido que o parâmetro não é no mínimo *alto* a pergunta será: “*o parâmetro é no mínimo alto moderado?*”

No caso do especialista ter respondido não na primeira etapa, as duas possíveis perguntas da terceira etapa serão: “*O parâmetro é no mínimo baixo moderado?*”, caso sua resposta na segunda etapa tenha sido que o parâmetro é no mínimo *baixo*, ou o parâmetro é no

mínimo *muito baixo* se sua resposta na segunda etapa tenha sido que o parâmetro não é no mínimo *baixo*. Após a decisão da terceira etapa, da mesma forma que nas etapas anteriores, é necessária a atribuição de uma credibilidade para a resposta dada.

Nesse momento é então finalizado o processo de educação, já que lingüisticamente não existe (ou não foi definido), por exemplo, ponto médio entre *Muito baixo e baixo* ou entre *moderado e alto moderado*.

O método descrito é uma adaptação do método apresentado por Firmino *et al.* (2007) para a utilização de valores *fuzzy*. Pelo fato de serem utilizadas variáveis lingüísticas o método limita-se a apenas três etapas, já que foram considerados nove conjuntos *fuzzy*.

A fim de demonstrar a construção da distribuição de probabilidade do parâmetro de interesse através do método proposto considere o nó correspondente ao eletricitista de apoio da RB apresentada na figura 3.1. Será feita uma simulação da educação da opinião do especialista sobre a probabilidade do eletricitista de apoio cometer um erro dado que a atenção está adequada.

Suponha então que o especialista responde que a probabilidade do eletricitista de apoio cometer um erro dado que a sua atenção é adequada é no mínimo “0” e no máximo “0,10”. Com isso os números *fuzzy* triangulares representativos dos conjuntos *fuzzy* correspondentes a variável probabilidade de erro humano são calculados conforme pode ser observado na figura 5.3:

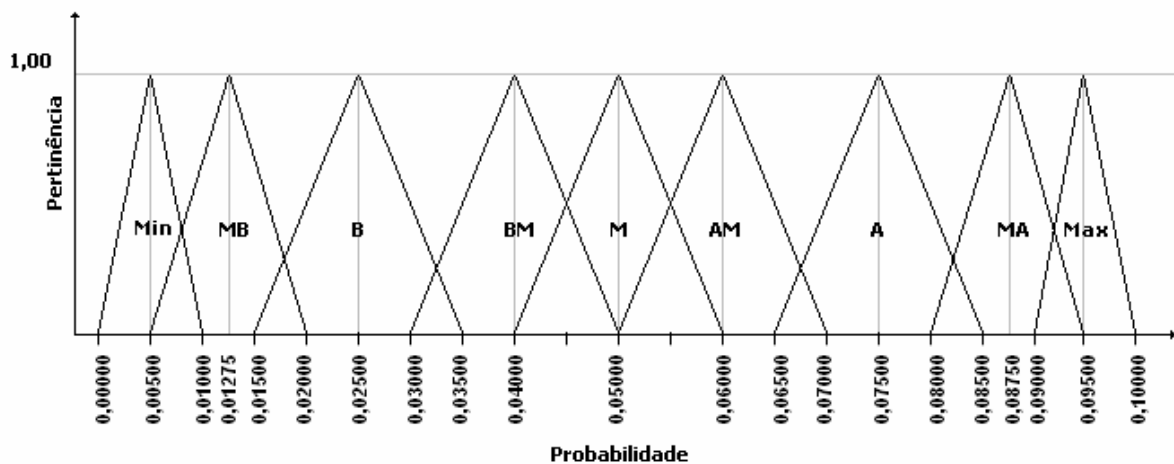


Figura 5.3– Conjuntos *fuzzy* para a variável lingüística probabilidade de erro humano

Depois de definido os limites do universo de discurso o especialista responde às perguntas apresentadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Perguntas e respostas efetuadas na simulação do processo de educação

Questão	Resposta	Credibilidade
Você acha que a probabilidade de erro humano é no mínimo moderada?	Não	95,00%
Você acha que a probabilidade de erro humano é no mínimo baixa?	Não	80,00%
Você acha que a probabilidade de erro humano é no mínimo muito baixa?	Sim	75,00%

Utilizando o mesmo raciocínio apresentado na seção 4.2 é possível construir a função de distribuição de probabilidade para o parâmetro em análise. Assim, como para a primeira pergunta da tabela 5.1, o especialista ofereceu “não” como resposta e atribuiu um nível de credibilidade de 95% para a sua afirmação é possível concluir que o intervalo lingüístico *[moderada, máxima]* assume uma massa probabilística da ordem de $100\% - 95\% = 5\%$ e por consequência o intervalo *[mínima, moderada]* guarda uma massa probabilística da ordem de 95% para ser ainda trabalhada. Considerando então o intervalo *[mínima, moderada]* o especialista é questionado de acordo com a segunda questão apresentada na tabela 5.1. Como sua resposta foi “não” para tal questão e a credibilidade atribuída foi de 80%, tem-se que o intervalo *[baixa, moderada]* assume uma massa probabilística na ordem de $(100\% - 80\%)$ de 95%, ou seja, 20% de 95% que corresponde a 19%. Já o intervalo *[mínima, baixa]* guarda uma massa probabilística na ordem de 80% de 95%, o que corresponde a 76%. Considerando agora o intervalo lingüístico *[mínima, baixa]* o especialista responde a terceira e última pergunta do processo de educação. Sua resposta para esse questionamento foi “sim”, e a credibilidade que o especialista atribuiu a sua resposta foi de 75%, o que significa que o intervalo *[mínima, muito baixa]*, assume uma massa probabilística da ordem de $(100\% - 75\%)$ de 76%, ou seja, 25% de 76%, que equivale a 19%. O intervalo *[muito baixa, baixa]*, por consequência, assume o valor de 75% de 76%, i.e., 57%. A figura 5.4 representa o histograma referente a distribuição da probabilidade eduzida:

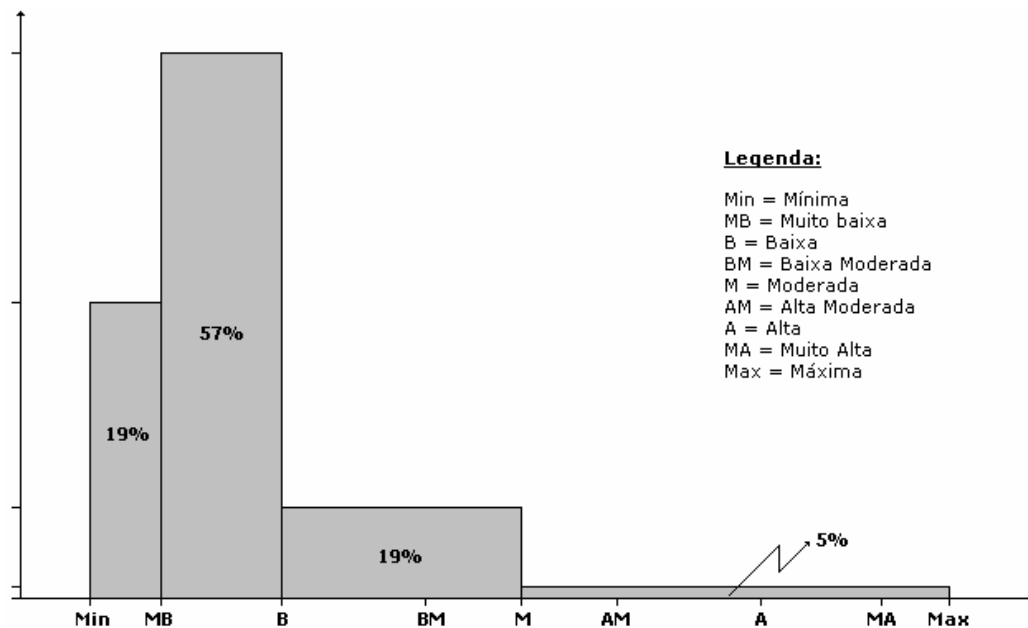


Figura 5.4 – Exemplo de distribuição de probabilidade obtida mediante o processo de educação proposto

5.3 Representação da Função de Probabilidade

Uma vez determinada a função de probabilidade, é necessário determinar um valor representativo desta função. A mediana é uma medida pouco afetada por valores extremos ou discrepantes, ou seja, é comum dizer que a mediana é uma medida mais robusta do que a média aritmética. Sendo assim, neste trabalho utiliza-se a mediana como valor representativo da distribuição de probabilidade obtida. Essa mediana será representada por um número *fuzzy* e especificamente neste trabalho será tratada como uma estimativa da probabilidade referente ao evento analisado, ou seja, a probabilidade atribuída a um nó da RB que representa uma variável causal.

A obtenção desta mediana é feita a partir da função de probabilidade que foi eduzida do especialista. Será mostrado nesse trabalho que é possível encontrar um número *fuzzy* correspondente à mediana de uma distribuição de probabilidade obtida através do método de educação proposto. Para isso é necessário utilizar a expressão tradicional da mediana com os devidos ajustes para tratamento de números *fuzzy*. Neste estágio será necessária a utilização da aritmética *fuzzy*.

De acordo com Spiegel (1985), a mediana para a distribuição de probabilidade pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$Mediana = L_1 + \left(\frac{\frac{N}{2} - (\sum f)_1}{f_{mediana}} \right) c \quad (5.1)$$

em que:

L_1 = limite inferior real da classe mediana (i.e., da classe que contém a mediana);

N = número de itens dos dados (i.e. freqüência total);

$(\sum f)_1$ = soma de todas as freqüências das classes inferiores à mediana;

$f_{mediana}$ = freqüência da classe mediana;

c = amplitude do intervalo da classe mediana.

A expressão da mediana pode então ser adaptada para o domínio *fuzzy* de acordo com o que segue. É possível reescrever a expressão (5.1) da seguinte forma:

$$Mediana = L_1 + Rc \quad (5.2)$$

$$\text{onde } R = \left(\frac{\frac{N}{2} - (\sum f)_1}{f_{mediana}} \right). \quad (5.3)$$

Para o caso de uma distribuição de probabilidade eduzida a partir de variáveis lingüísticas tem-se que os valores L_1 e c pertencem ao domínio *fuzzy*. Já o valor de R pertence ao domínio dos números reais. Assim, o valor da mediana *fuzzy* é calculado através da seguinte expressão:

$$Mediana_f = L_{1f} + R * c_f \quad (5.4)$$

onde,

L_{1f} = limite inferior da classe mediana (representado por um número *fuzzy*);

$$R = \left(\frac{\frac{N}{2} - (\sum f)_1}{f_{mediana}} \right) \text{ (Representado por um número real);}$$

c_f = amplitude do intervalo da classe mediana (representado por um número *fuzzy*. Note que a amplitude será dada pela diferença entre dois números *fuzzy*)

Como já foi dito, neste trabalho os parâmetros de interesse para os quais serão eduzidas distribuições de probabilidades serão probabilidades que lingüisticamente podem assumir os conjuntos *fuzzy*: *mínima*, *muito baixa*, *baixa*, *baixa moderada*, *moderada*, *alta moderada*, *alta*, *muito alta*, *máxima*.

De acordo com a figura 5.3, nota-se que para o exemplo analisado, tais conjuntos *fuzzy* são representados por números *fuzzy* triangulares que são dados por:

$$\textit{Mínima} = (0; 0,005; 0,01);$$

$$\textit{Muito baixa} = (0,005; 0,01275; 0,02);$$

$$\textit{Baixa} = (0,015; 0,025; 0,035);$$

$$\textit{Baixa moderada} = (0,03; 0,04; 0,05);$$

$$\textit{Moderada} = (0,04; 0,05; 0,06);$$

$$\textit{Alta moderada} = (0,05; 0,06; 0,07);$$

$$\textit{Alta} = (0,065; 0,075; 0,085);$$

$$\textit{Muito alta} = (0,08; 0,0875; 0,095);$$

$$\textit{Máxima} = (0,09; 0,095; 0,1).$$

A distribuição de probabilidade da variável lingüística probabilidade de erro humano representada na figura 5.4 pode então ser refeita utilizando os números *fuzzy* triangulares, como apresentado na figura 5.5.

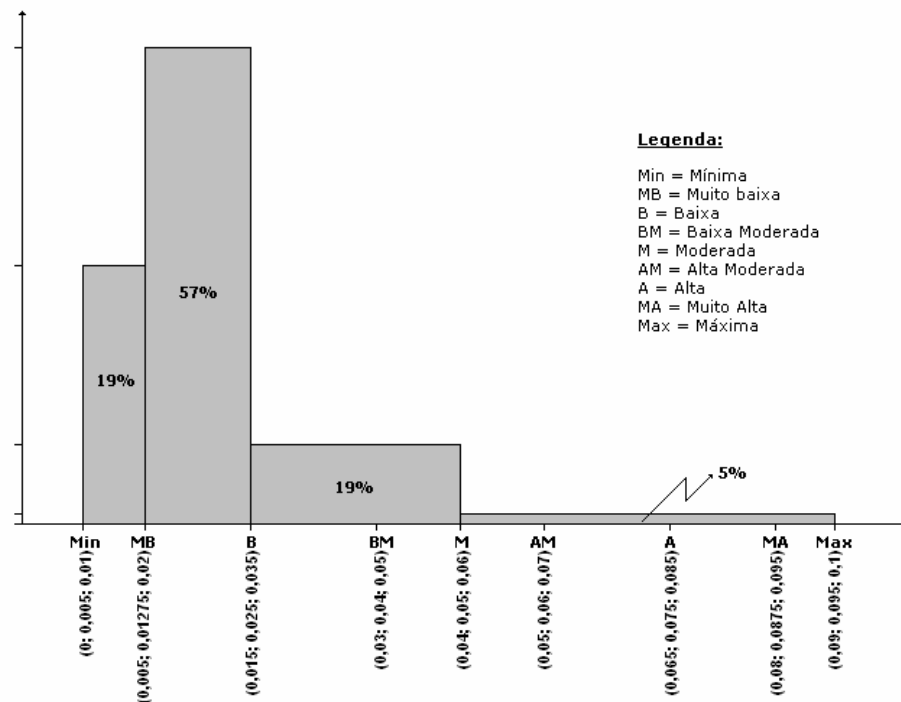


Figura 5.5– Distribuição de probabilidade da variável probabilidade de erro humano em termos de números fuzzy.

Por meio da figura 5.5, é possível observar que existe 19% de chance da probabilidade de erro humano estar entre “baixa e moderada”; 57% de chance da probabilidade se encontrar entre “moderada baixa e baixa”; 19% de chance dessa estar entre “mínima e muito baixa” e apenas 5% de chance da probabilidade estar entre “moderada e máxima”. Com essas informações é possível calcular a mediana *fuzzy* dessa distribuição de probabilidade que será utilizada como estimativa da probabilidade de erro humano, mais precisamente a probabilidade do eletricista de apoio cometer um erro dado que a atenção está adequada. Como já dito anteriormente, este resultado será atribuído a um nó de uma RB que represente uma variável causal.

Para o exemplo em análise, fazendo uso da aritmética *fuzzy* e utilizando a expressão 5.4 calcula-se a mediana *fuzzy*. Neste trabalho utiliza-se apenas os números *fuzzy* triangulares (ver figura 5.1). Portanto, dá-se aqui ênfase a aritmética *fuzzy* aplicada a números *fuzzy* triangulares. Observe que de acordo com Kaufmann e Gupta (1988), operações de adição, subtração e multiplicação por um escalar, envolvendo números *fuzzy* triangulares apresentam como resultado um número *fuzzy* do mesmo tipo. O mesmo não ocorre quando as operações são de multiplicação e divisão entre dois números *fuzzy* triangulares. Para o cálculo da mediana *fuzzy* serão necessárias apenas as operações de soma, subtração e multiplicação por

um escalar. Neste ponto, será apresentada uma maneira mais direta para efetuar as operações de adição, subtração e multiplicação por um escalar envolvendo números *fuzzy* triangulares. Tal maneira é mais rápida do que a forma apresentada na seção 2.1.6 já que não é necessário escrever os números *fuzzy* no formato L-R. As duas maneiras levam ao mesmo resultado, no entanto quando se dispõe de números *fuzzy* triangulares é mais simples a aplicação do método apresentado a seguir:

Adição:

Sejam dois números *fuzzy* triangulares A e B, com $A=(a_1, a_2, a_3)$ e $B=(b_1, b_2, b_3)$, então $A \oplus B = (a_1, a_2, a_3) + (b_1, b_2, b_3) = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3)$.

Exemplo:

Com $A = (2, 3, 6)$ e $B = (1, 4, 5)$, então tem-se que $A \oplus B = (3, 7, 11)$.

A representação gráfica desta operação é mostrada na figura 5.6.

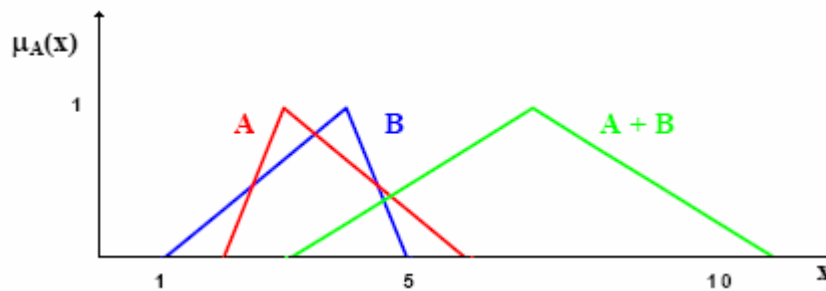


Figura 5.6- Representação gráfica da operação de adição entre dois números *fuzzy* triangulares.

Subtração:

Sejam dois números *fuzzy* triangulares A e B, com $A=(a_1, a_2, a_3)$ e $B=(b_1, b_2, b_3)$, então $A \ominus B = (a_1, a_2, a_3) - (b_1, b_2, b_3) = (a_1 - b_3, a_2 - b_2, a_3 - b_1)$.

Exemplo:

Considere ainda os dois números utilizados no exemplo da adição, ou seja, $A = (2, 3, 6)$ e $B = (1, 4, 5)$, então tem-se que $A \ominus B = (-3, -1, 1)$.

A representação gráfica desta operação é mostrada na figura 5.7.

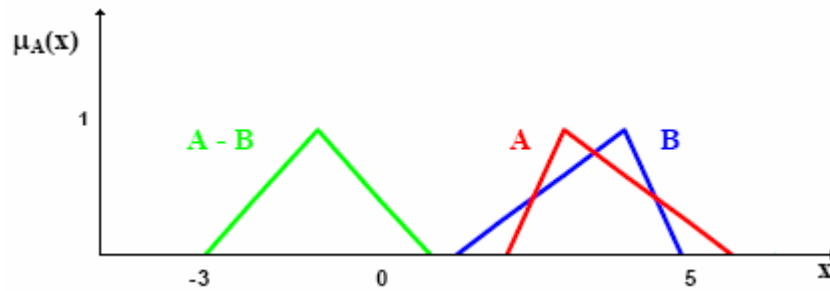


Figura 5.7 - Representação gráfica da operação de subtração entre dois números *fuzzy* triangulares.

Multiplicação por um escalar

Seja um número *fuzzy* triangular A, com $A=(a_1, a_2, a_3)$ e um escalar λ , então:

$$\lambda \times A = \lambda \times (a_1, a_2, a_3) = (\lambda a_1, \lambda a_2, \lambda a_3).$$

Exemplo:

Sejam $A = (2, 3, 6)$ e $\lambda = 3$, então tem-se que $3 \times A = (6, 9, 18)$.

A representação gráfica desta operação é mostrada na figura 5.8.

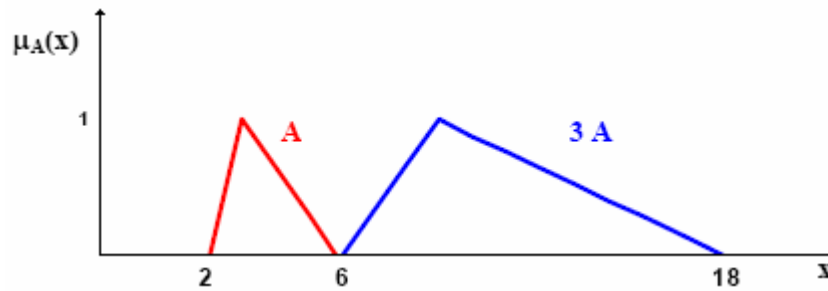


Figura 5.8 - Representação gráfica da operação de multiplicação de um escalar.

Definidas as operações *fuzzy* necessárias pode-se agora calcular a mediana *fuzzy* da distribuição de probabilidade para o exemplo que está sendo trabalhado nesta seção (figura 5.5.)

Tem-se que:

$$L_{1f} = (0,005; 0,01275; 0,02)$$

$$N = 100$$

$$\left(\sum f\right)_1 = 19;$$

$$f_{mediana} = 57$$

$$R = \left(\frac{\frac{N}{2} - (\sum f)_1}{f_{mediana}} \right) = \left(\frac{\frac{100}{2} - 19}{57} \right) = 0,544$$

$$c = (0,015; 0,025; 0,035) - (0,005; 0,0125; 0,02) = \\ (0,015-0,02; 0,025-0,0125; 0,035-0,005) = (-0,005; 0,01225; 0,03)$$

Assim, o valor da mediana *fuzzy* será dado por:

$$Mediana_f = (0,005; 0,01275; 0,02) + (0,544) * (-0,005; 0,0125; 0,03) = \\ (0,005; 0,01275; 0,02) + (-0,00272; 0,0068; 0,01632) = (0,00228; 0,01955; 0,03632)$$

Portanto, o valor *fuzzy* a ser utilizado como estimativa para a probabilidade do eletricitista de apoio falhar dado que sua atenção é adequada será dado por (0,00228; 0,01955; 0,03632).

5.4 Hibridismo entre a Teoria Fuzzy e as Redes Bayesianas

Conforme apresentado na seção 5.2, o processo de educação proposto é baseado em questões que utilizam variáveis lingüísticas como forma de facilitar a comunicação com o especialista. Tais variáveis lingüísticas representam cada uma um determinado conjunto *fuzzy*. Um dos objetivos deste trabalho é desenvolver um método para obter a probabilidade de erro humano para um cenário em que exista a ação humana. Para a obtenção dessa probabilidade, utiliza-se as RBs pelo fato dessa metodologia ser capaz de modelar as interações entre os diferentes fatores de desempenho com a probabilidade de erro humano propriamente dita. Como foi visto anteriormente, as probabilidades de cada um dos nós da RB serão estimadas através das medianas *fuzzy*, obtidas a partir das distribuições de probabilidade que foram obtidas com a educação da opinião do especialista para cada um dos eventos analisados.

O presente trabalho procura aperfeiçoar uma metodologia já proposta anteriormente, que são as RBs *fuzzy*. Tal técnica de hibridismo foi utilizada, por exemplo, no trabalho de Ren, Wang e Jenkinson (2005). A proposta desses autores foi desenvolver um modelo de RB *fuzzy* para modelar as relações causais entre os fatores de riscos que podem provocar eventuais acidentes em operações de sistemas que se encontram em alto mar. O referido trabalho difere do presente por questionar os especialistas diretamente quanto aos conjuntos *fuzzy*, suas respostas são dadas diretamente por números *fuzzy* e não são baseadas em variáveis lingüísticas como é proposto neste trabalho. Por exemplo, em Ren, Wang e Jenkinson (2005), o especialista é perguntado sobre uma determinada probabilidade e sua

resposta será dada por um número *fuzzy* do tipo triangular ou trapezoidal. Não existe a educação de uma distribuição de probabilidade como acontece no presente trabalho. Isto implica em uma limitação da quantificação da incerteza já que, a estimativa da probabilidade é justamente o valor respondido pelo especialista, portanto a incerteza está inserida apenas no número *fuzzy*. No presente método a incerteza é trabalhada não apenas com a utilização de números *fuzzy*, mas com a definição da distribuição de probabilidade desse número.

Para a formalização do conceito *Bayesiano-fuzzy* é necessária a definição do conceito de medida de probabilidade *fuzzy* e espaço de probabilidade *fuzzy*. Portanto, de acordo com os trabalhos de Furthsntn-Schnater (1993), Halliwell *et al.* (2003) e Ren *et al.* (2005b), tem-se os seguintes resultados:

A função $P_f : \mathcal{E} \rightarrow F(R)$ é definida como sendo uma medida de probabilidade *fuzzy* em $(\Omega, \mathcal{E})$, se e somente se:

$$(a) \quad 0_x \prec P_f(A) \prec 1_x \quad \forall \quad A \in \mathcal{E} \quad (5.5)$$

$$(b) \quad P_f(\Omega) = 1_x \quad e \quad P_f(\emptyset) = 0_x \quad (5.6)$$

$$(c) \quad \text{Se } A \text{ e } B \text{ são dois eventos mutuamente excludentes em } \mathcal{E}, \text{ i.e., } A \cap B = \emptyset, \text{ então} \\ P_f(A) \oplus P_f(B) \supseteq P_f(A \cup B) \quad (5.7)$$

(d) Se A e B são eventos em $\mathcal{E}$, então:

$$P_f(A) \circ P_f(B) = \begin{cases} 0, & \text{se } P_f(A) \cdot P_f(B) \leq 0_x \\ P_f(A) \cdot P_f(B), & \text{se } 0_x \leq P_f(A) \cdot P_f(B) \leq 1_x \\ 1, & \text{se } P_f(A) \cdot P_f(B) \geq 1_x \end{cases} \quad (5.8)$$

O espaço *fuzzy* de probabilidade é representado por $(\Omega, \mathcal{E}, P_f)$. O sinal " $\circ$ " denota uma das aritméticas *fuzzy*, ou seja, adição, subtração, multiplicação e divisão. Deve-se observar também que 1_x e 0_x referem-se aos subconjuntos *fuzzy* dos números reais 1 e 0 respectivamente.

Com base nos axiomas de probabilidades acima enunciados, é possível definir as seguintes regras Bayesianas-fuzzy:

Independência Condicional Fuzzy:

$$P_f(X_1, X_2, \dots, X_n) \cong \prod_{i=1}^n P_f(X_i | Pais(X_i)) \quad (5.9)$$

Probabilidade Conjunta Fuzzy

$$P_f(Y = y_j, X = x_i) \cong P_f(X = x_i) \otimes P_f(Y = y_j | X = x_i) \quad (5.10)$$

Probabilidade Total Fuzzy

$$P_f(Y = y_j) \cong \sum P_f(X = x_i) \otimes P(Y = y_j | X = x_i) \quad (5.11)$$

Teorema de Bayes-Fuzzy

$$P_f(X = x_i | Y = y_j) \cong \frac{P_f(X = x_i) \otimes P_f(Y = y_j | X = x_i)}{P_f(Y = y_j)} \quad (5.12)$$

Utilizando-se os resultados apresentados acima, e associando-se com o que foi apresentado sobre RBs na seção 2.2, é possível determinar as operações necessárias para os cálculos envolvidos nas quantificações das RBs *fuzzy*. Isto será demonstrado com mais detalhes no capítulo 7, onde serão utilizadas as redes Bayesianas-*fuzzy* para a quantificação da probabilidade de erro humano de um eletricista auxiliar envolvido na atividade de substituição de cadeias de isoladores de linhas de transmissão. Nesta aplicação será utilizado o método de educação proposto para obter os parâmetros *fuzzy* correspondentes à rede.

6 AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DO MÉTODO DE EDUCAÇÃO

Conforme discutido na seção 4.3 quando se está interessado em avaliar a performance de um método de educação, é necessário analisar o método em termos de simplicidade, eficiência, refinamento e controle empírico. Firmino *et al.*(2007) reportou o resultado de um experimento que teve por objetivo avaliar o método proposto em seu trabalho. No presente trabalho foi repetido o mesmo experimento considerando agora o método de educação para variáveis lingüísticas que foi apresentado na seção 5.2. Todas as condições utilizadas por Firmino *et al.*, foram mantidas. Nas próximas sessões são apresentados a descrição do experimento bem como seus resultados.

6.1 O Experimento

O experimento consiste em sortear aleatoriamente 50 bolas, com reposição, de uma caixa opaca constituída por 12 bolas pretas e 164 brancas. Este procedimento foi repetido individualmente para 5 estudantes, onde 1 é estudante de Matemática, outro do curso de Engenharia de Produção e os outros 3 são estudantes de Estatística.

De forma a facilitar o entendimento do experimento e torná-lo um pouco mais realista foi dito a cada um dos estudantes que a caixa simulava o funcionamento de um sistema que opera sob demanda. Cada bola preta retirada da caixa representaria a falha do sistema sob demanda e a retirada de uma bola branca indicaria que o sistema funcionou quando demandado. Cada bola sorteada representaria um indício do sistema para o estudante. Ao final do experimento, ou seja, após o sorteio de 50 bolas e, portanto, 50 indícios apresentados ao aluno, seria considerado que ele agora dispunha de informações suficientes para responder a algumas perguntas na condição de especialista sobre o sistema.

6.2 Calibração do Especialista

Antes de ser apresentado ao sistema, todos os estudantes passaram individualmente por um processo de calibração. Tal processo consiste na avaliação dos vícios do especialista e busca equilibrar suas crenças com suas credibilidades (Johnson, 2001). Dois testes de calibração foram utilizados (Brenner, 2003).

No primeiro, buscou-se calibrar opiniões e respectivas credibilidades baseadas no conhecimento intelectual do especialista. Foram apresentados dois estados brasileiros, sorteados aleatoriamente, e perguntado sobre qual era o mais populoso. Em seguida, perguntava-se sobre com que credibilidade (probabilidade de estar certo) o especialista havia decidido por um em detrimento de outro estado. Neste teste foram aplicadas 25 questões.

No segundo teste, buscou-se calibrar as opiniões e respectivas credibilidades baseadas na percepção do especialista. Foram apresentadas duas letras ao especialista que eram em seguida escondidas. Perguntava-se então, qual letra teria aparecido do lado direito ou esquerdo, onde o lado era também sorteado aleatoriamente. Por fim, perguntava-se sobre com que credibilidade o especialista havia decidido por uma em detrimento de outra letra. Também neste teste foram aplicadas 25 questões.

A Tabela 6.1 apresenta a credibilidade média e a frequência relativa de acertos obtidas com a aplicação dos testes a cada um dos especialistas.

Tabela 6.1– Resultados dos Testes de Calibração Aplicados aos Especialistas

Especialista	Teste 1 (intelectualidade)		Teste 2 (Percepção)	
	Freq. Relativa de acertos	Credibilidade média	Freq. Relativa de acertos	Credibilidade média
1	76,00%	79,20%	88,00%	99,60%
2	84,00%	78,80%	92,00%	84,40%
3	80,00%	80,40%	88,00%	97,60%
4	84,00%	83,60%	96,00%	100,00%
5	92,00%	87,40%	84,00%	85,60%

Observa-se da tabela 6.1 que quanto a intelectualidade o especialistas 1 possui grande confiança nas suas respostas uma vez que a sua frequência de acertos foi menor que a sua credibilidade; os especialistas 3 e 4 também apresentam divergências entre frequências relativas de acertos a as credibilidades médias. No entanto, apesar de diferentes esses valores são muito próximos, o que indica que esses especialistas estão muito próximos a oferecer respostas com credibilidades corretas. Já os especialistas 2 e 5 possuem pouca confiança nas suas respostas, já que suas frequências relativas de acertos foram superiores as suas credibilidades médias. Em se tratando da percepção, o especialista 5 foi o que se mostrou mais calibrado, apesar de sua frequência relativa de acertos ser um pouco maior que sua credibilidade média. Porém essa diferença é muito pequena. Os especialistas 1, 3 e 4 apresentaram credibilidades médias superiores as suas frequências relativas de acertos, indicando que estes indivíduos são muito auto-confiantes. Já o especialista 2 foi o único que foi mais conservador em suas respostas, já que sua frequência relativa de acertos foi superior a credibilidade média obtida por ele.

Após a aplicação dos testes de calibração, cada um dos especialistas é alertado sobre suas deficiências e orientados para que durante o processo de educação tomem mais cuidado com as respostas que irão dar e o nível de credibilidade que atribuem à essas respostas.

6.3 Resultados do Experimento

Seguindo os procedimentos apresentados na seção 5.2, os especialistas responderam às perguntas individualmente e sem o mínimo contato prévio com outro participante do experimento ou conhecedor do conteúdo da caixa. A seguir são apresentadas as perguntas feitas a cada um dos especialistas e suas respectivas respostas além do histograma e cálculo da mediana *fuzzy* representativos da opinião dos especialistas sobre o sistema:

Especialista 1:

1º Questão:

Dado os indícios apresentados, qual o valor mínimo que você acredita que a probabilidade do sistema falhar em demanda pode assumir?

Resposta: 0,03

2ª Questão:

Dado os indícios apresentados, qual o valor máximo que você acredita que a probabilidade do sistema falhar em demanda pode assumir?

Resposta: 0,10

Definidos os valores máximos e mínimos o especialista limita o universo de discurso para a variável lingüística probabilidade do sistema falhar em demanda. A figura 6.1 representa esse universo de discurso e é utilizado para facilitar o raciocínio do especialista quando ele for perguntado lingüisticamente sobre o parâmetro:

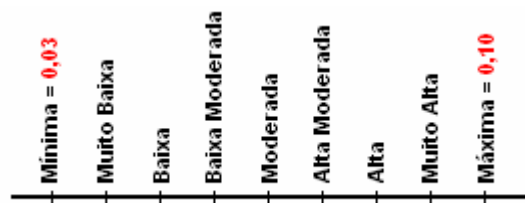


Figura 6.1 – Escala correspondente ao universo de discurso do especialista 1.

A tabela 6.2 mostra as perguntas e respostas feitas durante o processo de educação do especialista 1:

Tabela 6.2 – Perguntas e respostas durante o processo de educação do especialista 1

Questão	Resposta	Credibilidade
Você acha que a probabilidade do sistema falhar em demanda é no mínimo moderada?	não	90%
Você acha que a probabilidade do sistema falhar em demanda é no mínimo baixa?	sim	82%
Você acha que a probabilidade do sistema falhar em demanda é no mínimo baixa moderada?	sim	80%

De acordo com as respostas do especialista 1, seguindo o procedimento apresentado na seção 5.2 é possível apresentar o histograma representativo da sua opinião sobre a probabilidade de falha do sistema:

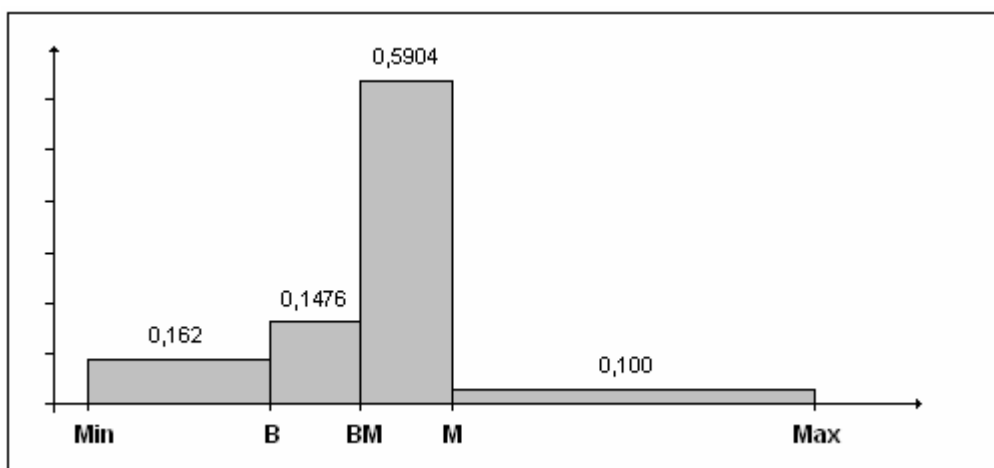


Figura 6.2 – Distribuição de probabilidade obtida pela educação do especialista 1 para a probabilidade de falha do sistema operando sobre demanda.

Uma vez que o especialista definiu os valores máximo e mínimo para a probabilidade em questão, é possível representar os conjuntos *fuzzy* conforme apresentado na figura 6.3:

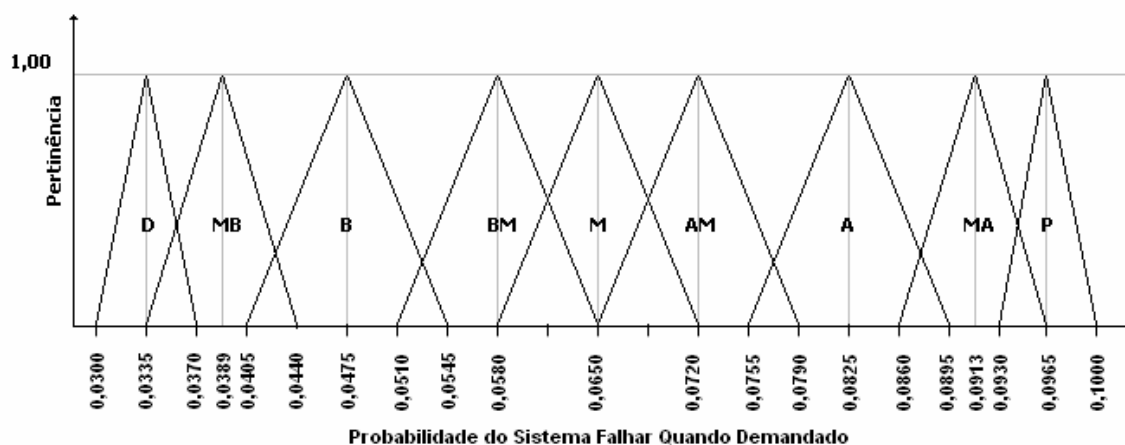


Figura 6.3- Representação dos conjuntos *fuzzy* para a variável linguística probabilidade de falha em demanda (especialista 1).

Com os conjuntos *fuzzy* definidos pode-se calcular a mediana *fuzzy* representativa da distribuição obtida na coleta de opinião do especialista 1:

$$Mediana_f = L_{1f} + R * c_f$$

onde,

$$L_{1f} = (0,0510; 0,0580; 0,0650);$$

$$R = \left(\frac{\frac{N}{2} - (\sum f)_1}{f_{mediana}} \right) = \left(\frac{\frac{100}{2} - 30,96}{59,04} \right) = \frac{19,04}{59,04} = 0,322 ;$$

$$c_f = (0,0580; 0,0650; 0,0720) - (0,0510; 0,0580; 0,0650) = (-0,0070; 0,0070; 0,0210)$$

$$\begin{aligned} Mediana_f &= (0,0510, 0,0580, 0,0650) + 0,322 * (-0,0070; 0,0070; 0,0210) = \\ &= (0,0510; 0,0580; 0,0650) + (-0,002254; 0,002254; 0,006762) = \\ &= (0,048746; 0,060254; 0,071762) \end{aligned}$$

Especialista 2:

1º Questão:

Dado os indícios apresentados, qual o valor mínimo que você acredita que a probabilidade do sistema falhar em demanda pode assumir?

Resposta: 0,01

2ª Questão:

Dado os indícios apresentados, qual o valor máximo que você acredita que a probabilidade do sistema falhar em demanda pode assumir?

Resposta: 0,11

Definidos os valores máximos e mínimos o especialista limita o universo de discurso para a variável lingüística probabilidade do sistema falhar em demanda. A figura 6.4 representa esse universo de discurso e é utilizado para facilitar o raciocínio do especialista quando ele for perguntado lingüisticamente sobre o parâmetro:

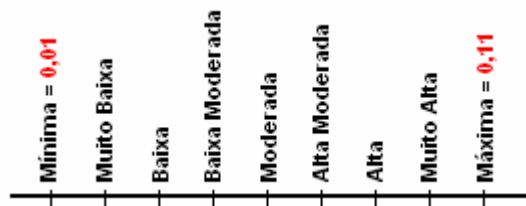


Figura 6.4 – Escala correspondente ao universo de discurso do especialista 2.

A tabela 6.3 mostra as perguntas e respostas feitas durante o processo de educação do especialista 2:

Tabela 6.3 – Perguntas e respostas durante o processo de educação do especialista 2

Questão	Resposta	Credibilidade
Vc acha que a probabilidade do sistema falhar em demanda é no mínimo moderada?	não	90%
Você acha que a probabilidade do sistema falhar em demanda é no mínimo baixa?	sim	80%
Você acha que a probabilidade do sistema falhar em demanda é no mínimo baixa moderada?	sim	80%

De acordo com as respostas do especialista 2, seguindo o procedimento apresentado na seção 5.2 é possível apresentar o histograma representativo da sua opinião sobre a probabilidade de falha do sistema:

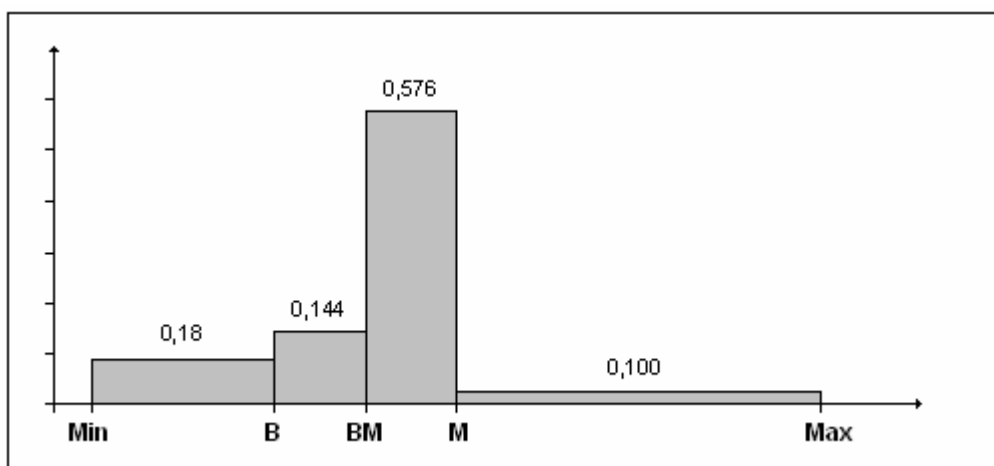


Figura 6.5–Distribuição de probabilidade obtida pela educação do especialista 2 para a probabilidade de falha do sistema operando sobre demanda.

Uma vez que o especialista definiu os valores máximo e mínimo para a probabilidade em questão, é possível representar os conjuntos *fuzzy* conforme apresentado na figura 6.6:

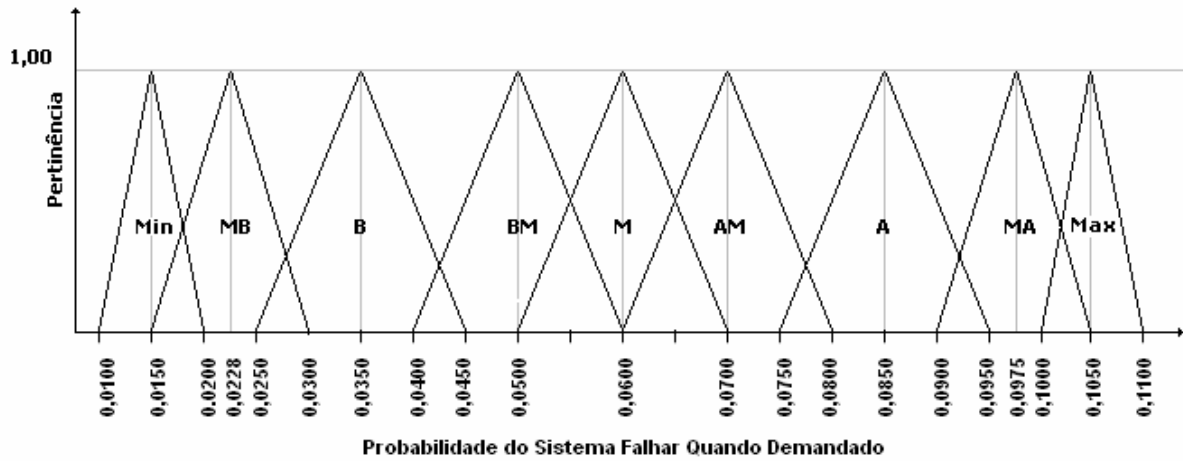


Figura 6.6 - Representação dos conjuntos *fuzzy* para a variável lingüística probabilidade de falha em demanda (especialista 2).

Com os conjuntos *fuzzy* definidos pode-se calcular a mediana *fuzzy* representativa da distribuição obtida na coleta de opinião do especialista 2:

$$Mediana_f = L_{1f} + R * c_f$$

onde,

$$L_{1f} = (0,0400; 0,0500; 0,0600);$$

$$R = \left(\frac{\frac{N}{2} - (\sum f)_1}{f_{mediana}} \right) = \left(\frac{\frac{100}{2} - 32,4}{57,6} \right) = \frac{17,6}{57,6} = 0,305 ;$$

$$c_f = (0,0500; 0,0600; 0,0700) - (0,0400; 0,0500; 0,0600) = (-0,0100; 0,0100; 0,0300)$$

$$\begin{aligned} Mediana &= (0,0400; 0,0500; 0,0600) + 0,305 * (-0,0100; 0,0100; 0,0300) = \\ &= (0,0400; 0,0500; 0,0600) + (-0,00305; 0,00305; 0,00915) = \\ &= (0,03695; 0,05305; 0,06915) \end{aligned}$$

Especialista 3:**1º Questão:**

Dado os indícios apresentados, qual o valor mínimo que você acredita que a probabilidade do sistema falhar em demanda pode assumir?

Resposta: 0,06

2ª Questão:

Dado os indícios apresentados, qual o valor máximo que você acredita que a probabilidade do sistema falhar em demanda pode assumir?

Resposta: 0,13

Definidos os valores máximos e mínimos o especialista limita o universo de discurso para a variável lingüística probabilidade do sistema falhar em demanda. A figura 6.7 representa esse universo de discurso e é utilizado para facilitar o raciocínio do especialista quando ele for perguntado lingüisticamente sobre o parâmetro:

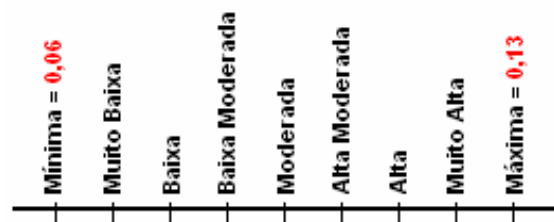


Figura 6.7– Escala correspondente ao universo de discurso do especialista 3.

A tabela 6.4 mostra as perguntas e respostas feitas durante o processo de educação do especialista 3:

Tabela 6.4 – Perguntas e respostas durante o processo de educação do especialista 3

Questão	Resposta	Credibilidade
Vc acha que a probabilidade do sistema falhar em demanda é no mínimo moderada?	não	95%
Você acha que a probabilidade do sistema falhar em demanda é no mínimo baixa?	não	90%
Você acha que a probabilidade do sistema falhar em demanda é no mínimo muito baixa?	sim	70%

De acordo com as respostas do especialista 3, seguindo o procedimento apresentado na seção 5.2 é possível apresentar o histograma representativo da sua opinião sobre a probabilidade de falha do sistema:

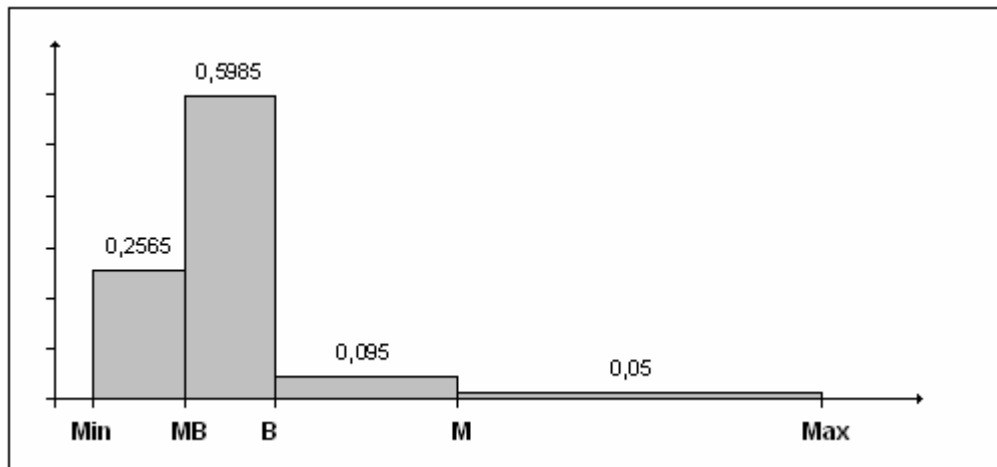


Figura 6.8 –Distribuição de probabilidade obtida pela educação do especialista 3 para a probabilidade de falha do sistema operando sobre demanda.

Uma vez que o especialista definiu os valores máximo e mínimo para a probabilidade em questão, é possível representar os conjuntos *fuzzy* conforme apresentado na figura 6.9:

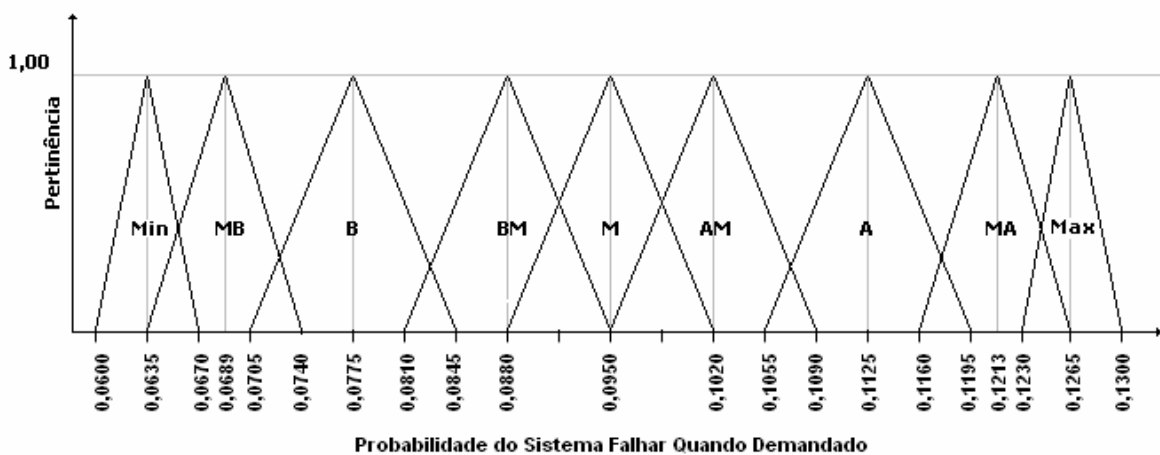


Figura 6.9- Representação dos conjuntos *fuzzy* para a variável lingüística probabilidade de falha em demanda (especialista 3).

Com os conjuntos *fuzzy* definidos pode-se calcular a mediana *fuzzy* representativa da distribuição obtida na coleta de opinião do especialista 3:

$$Mediana_f = L_{1f} + R * c_f$$

onde,

$$L_{1f} = (0,0635; 0,0689; 0,0740);$$

$$R = \left(\frac{\frac{N}{2} - (\sum f)_1}{f_{mediana}} \right) = \left(\frac{\frac{100}{2} - 25,65}{59,85} \right) = \frac{24,35}{59,85} = 0,407 ;$$

$$c_f = (0,0705; 0,0775; 0,0845) - (0,0635; 0,0689; 0,0740) = (-0,0035; 0,0086; 0,0210)$$

$$\begin{aligned} Mediana_f &= (0,0635, 0,0689, 0,0740) + 0,407 * (-0,0035, 0,0086, 0,0210) = \\ &= (0,0635; 0,0689; 0,0740) + (-0,0014245; 0,0035002; 0,008547) = \\ &= (0,0620755; 0,0724002; 0,082547) \end{aligned}$$

Especialista 4:

1ª Questão:

Dado os indícios apresentados, qual o valor mínimo que você acredita que a probabilidade do sistema falhar em demanda pode assumir?

Resposta: 0,05

2ª Questão:

Dado os indícios apresentados, qual o valor máximo que você acredita que a probabilidade do sistema falhar em demanda pode assumir?

Resposta: 0,15

Definidos os valores máximos e mínimos o especialista limita o universo de discurso para a variável lingüística probabilidade do sistema falhar em demanda. A figura 6.10 representa esse universo de discurso e é utilizado para facilitar o raciocínio do especialista quando ele for perguntado lingüisticamente sobre o parâmetro:

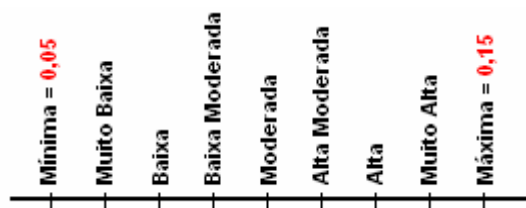


Figura 6.10 – Escala correspondente ao universo de discurso do especialista 4.

A tabela 6.5 mostra as perguntas e respostas feitas durante o processo de educação do especialista 4:

Tabela 6.5 – Perguntas e respostas durante o processo de educação do especialista 4

Questão	Resposta	Credibilidade
Vc acha que a probabilidade do sistema falhar em demanda é no mínimo moderada?	não	80%
Você acha que a probabilidade do sistema falhar em demanda é no mínimo baixa?	sim	90%
Você acha que a probabilidade do sistema falhar em demanda é no mínimo baixa moderada?	sim	90%
Fim da educação	—	—

De acordo com as respostas do especialista 4, seguindo o procedimento apresentado na seção 5.2 é possível apresentar o histograma representativo da sua opinião sobre a probabilidade de falha do sistema:

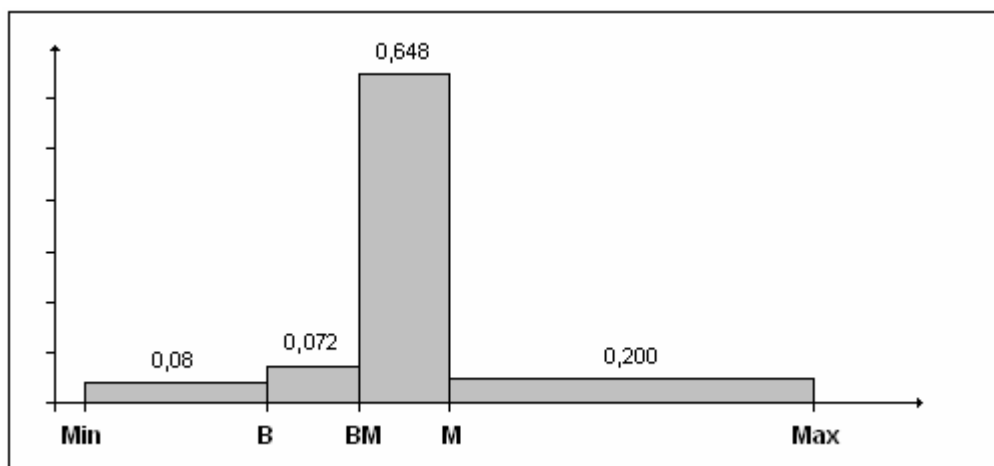


Figura 6.11–Distribuição de probabilidade obtida pela educação do especialista 4 para a probabilidade de falha do sistema operando sobre demanda.

Uma vez que o especialista definiu os valores máximo e mínimo para a probabilidade em questão, é possível representar os conjuntos *fuzzy* conforme apresentado na figura 6.12:

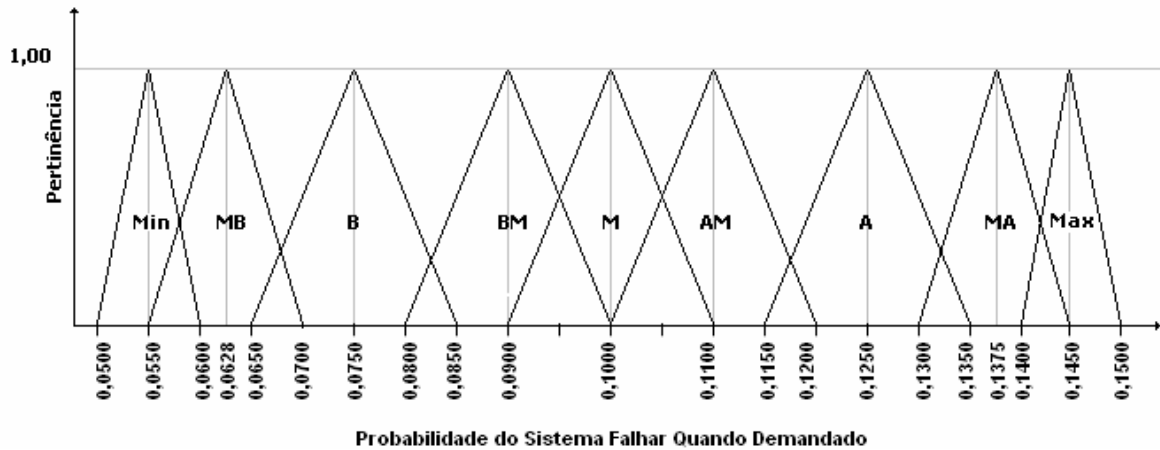


Figura 6.12 - Representação dos conjuntos *fuzzy* para a variável lingüística probabilidade de falha em demanda (especialista 4).

Com os conjuntos *fuzzy* definidos pode-se calcular a mediana *fuzzy* representativa da distribuição obtida na coleta de opinião do especialista 4:

$$Mediana_f = L_{1f} + R * c_f$$

onde,

$$L_{1f} = (0,0800; 0,0900; 0,1000);$$

$$R = \left(\frac{\frac{N}{2} - (\sum f)_1}{f_{mediana}} \right) = \left(\frac{\frac{100}{2} - 15,2}{64,8} \right) = \frac{34,8}{64,8} = 0,537 ;$$

$$c_f = (0,0900; 0,1000; 0,1100) - (0,0800; 0,0900; 0,1000) = (-0,0100; 0,0100; 0,0300)$$

$$\begin{aligned} Mediana_f &= (0,0800, 0,0900, 0,1000) + 0,537 * (-0,0100, 0,0100, 0,0300) = \\ &= (0,0800, 0,0900, 0,1000) + (-0,00537; 0,00537; 0,01611) = \\ &= (0,07463; 0,09537; 0,11611) \end{aligned}$$

Especialista 5:

1º Questão:

Dado os indícios apresentados, qual o valor mínimo que você acredita que a probabilidade do sistema falhar em demanda pode assumir?

Resposta: 0,01

2ª Questão:

Dado os indícios apresentados, qual o valor máximo que você acredita que a probabilidade do sistema falhar em demanda pode assumir?

Resposta: 0,09

Definidos os valores máximos e mínimos o especialista limita o universo de discurso para a variável lingüística probabilidade do sistema falhar em demanda. A figura 6.13 representa esse universo de discurso e é utilizado para facilitar o raciocínio do especialista quando ele for perguntado lingüisticamente sobre o parâmetro:

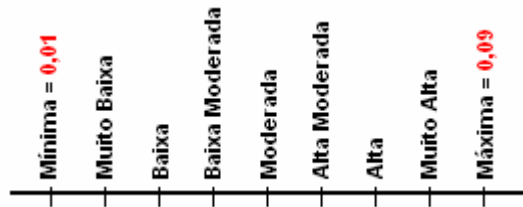


Figura 6.13 – Escala correspondente ao universo de discurso do especialista 5.

A tabela 6.6 mostra as perguntas e respostas feitas durante o processo de educação do especialista 5:

Tabela 6.6 – Perguntas e respostas durante o processo de educação do especialista 5

Questão	Resposta	Credibilidade
Vc acha que a probabilidade do sistema falhar em demanda é no mínimo moderada?	não	85%
Você acha que a probabilidade do sistema falhar em demanda é no mínimo baixa?	sim	80%
Você acha que a probabilidade do sistema falhar em demanda é no mínimo baixa moderada?	não	80%

De acordo com as respostas do especialista 5, seguindo o procedimento apresentado na seção 5.2 é possível apresentar o histograma representativo da sua opinião sobre a probabilidade de falha do sistema:

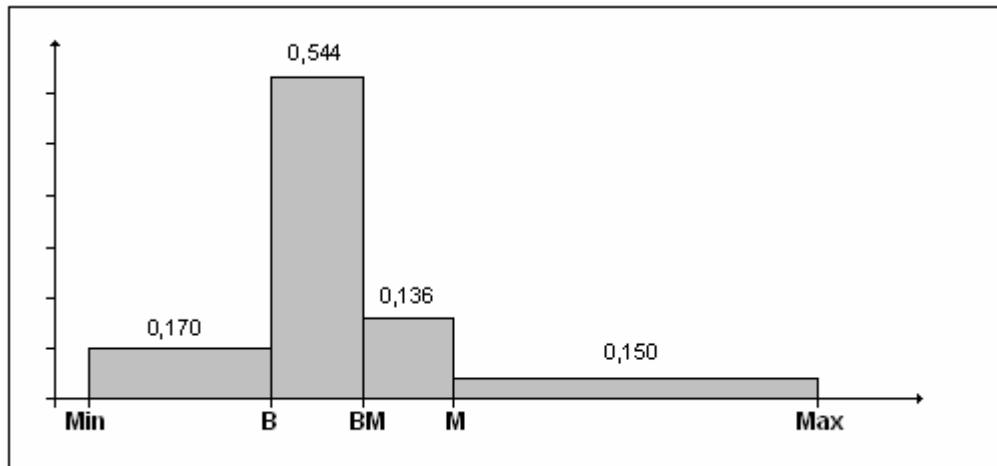


Figura 6.14 –Distribuição de probabilidade obtida pela educação do especialista 5 para a probabilidade de falha do sistema operando sobre demanda.

Uma vez que o especialista definiu os valores máximo e mínimo para a probabilidade em questão, é possível representar os conjuntos *fuzzy* conforme apresentado na figura 6.15:

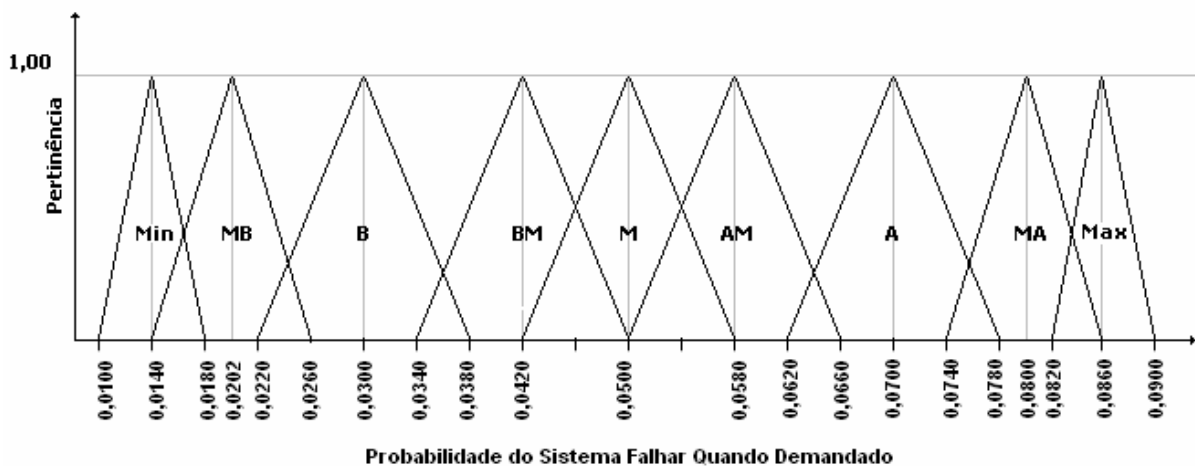


Figura 6.15 - Representação dos conjuntos *fuzzy* para a variável lingüística probabilidade de falha em demanda (especialista 5).

Com os conjuntos *fuzzy* definidos pode-se calcular a mediana *fuzzy* representativa da distribuição obtida na coleta de opinião do especialista 5:

$$Mediana_f = L_{1f} + R * c_f$$

onde,

$$L_{1f} = (0,0220; 0,0300; 0,0380);$$

$$R = \left(\frac{\frac{N}{2} - (\sum f)_1}{f_{mediana}} \right) = \left(\frac{\frac{100}{2} - 17}{54,4} \right) = \frac{33}{54,4} = 0,607 ;$$

$$c_f = (0,0340; 0,0420; 0,0500) (-)(0,0220; 0,0300; 0,0380) = (-0,0040; 0,0120; 0,0280)$$

$$\begin{aligned} Mediana_f &= (0,0220, 0,0300, 0,0380) + 0,607 * (-0,0040, 0,0120, 0,0280) = \\ &= (0,0220, 0,0300, 0,0380) + (-0,002428; 0,007284; 0,016996) = \\ &= (0,019572; 0,037284; 0,054996) \end{aligned}$$

6.4 Conclusões Sobre o Método

Quanto à simplicidade, pode-se destacar que o método proposto faz uso de variáveis lingüísticas para questionar os especialistas. Desta forma as questões tornam-se mais simples de serem respondidas, já que no seu dia a dia o especialista convive com muitas decisões baseadas em variáveis lingüísticas não precisando de instrumentos de medidas para chegar a uma conclusão correta. Por exemplo, ele pode rapidamente identificar se um automóvel está em velocidade moderada ou velocidade alta apenas com o conhecimento que ele tem sobre o parâmetro velocidade do automóvel.

Em relação à eficiência, o método herda o benefício introduzido por Firmino *et al* (2007), já que trabalha com algoritmos computacionais de busca e o espaço paramétrico é reduzido pela metade após cada decisão. Desta forma, os intervalos menos prováveis são descartados melhorando a eficiência do método. No entanto é importante mencionar que a distribuição resultante possui pouco detalhamento nos intervalos que foram descartados em cada uma das decisões tomadas pelo especialista

Em se tratando de refinamento, neste método ele ocorre através das questões de decisão. Cada questão de decisão envolve a metade do intervalo utilizado na questão anterior de forma a identificar o intervalo modal. É assumido que o especialista é capaz de expressar sua verdadeira convicção sobre o parâmetro de interesse de maneira bastante precisa. Dessa forma a massa probabilística tende a se acumular em torno do valor mais freqüente do parâmetro de interesse.

O controle empírico é útil na detecção do desvio de foco do especialista quando estes respondem às questões. Um bom indicador para este tipo de comportamento é a relação entre a credibilidade e o refinamento. Na medida em que o nível de detalhamento das questões é

elevado é esperado que os níveis de credibilidade atribuídos sejam menores, ou seja, a credibilidade deve ser inversamente proporcional ao refinamento. Se esta relação não é observada, o especialista deve ser convidado a explicar a sua resposta. Este mecanismo promove uma dinâmica empírica de controle.

O experimento feito no início desse capítulo demonstrou as características relatadas nesta seção. A tabela 6.7 resume os resultados obtidos no experimento. É possível observar que em todos os casos as medianas *fuzzy* (números *fuzzy* triangulares) representam conjuntos *fuzzy* que englobam o valor real correspondente à frequência de ocorrências de bolas pretas.

Tabela 6.7 - Resumo dos resultados do experimento

Resultados dos Experimentos				
Especialista	Número de Bolas Sorteadas	Número de Ocorrência de Bolas Pretas	Frequência de Bolas Pretas na Amostra	Mediana <i>Fuzzy</i>
1	50	3	0,06	(0,04875; 0,06025; 0,07176)
2	50	3	0,06	(0,03695; 0,05305; 0,06915)
3	50	4	0,08	(0,06207; 0,07240; 0,08255)
4	50	5	0,10	(0,07463; 0,09537; 0,11611)
5	50	2	0,04	(0,01957; 0,03728; 0,05499)

7 APLICAÇÃO

7.1 Introdução

De acordo com Stamatelatos *et al.* (2002), a análise probabilística de riscos (APR) ajuda a identificar e avaliar o risco em sistemas complexos, objetivando contribuir para a melhoria da segurança e desempenho levando em conta medidas de custo e benefício. Tradicionalmente a APR utiliza as técnicas de árvore de falhas e árvore de eventos para representar probabilisticamente o funcionamento de equipamentos (Análise de Confiabilidade de Equipamentos) ou a ação humana existente no processo (Análise de Confiabilidade Humana). As técnicas citadas possuem alguns inconvenientes, tais como, suposição de independência entre variáveis que na verdade não são, dicotomização de eventos, que na verdade podem possuir vários outros estados, além da dificuldade para a inclusão de novos conhecimentos em modelos já construídos. Diante desses fatos a utilização das RBs permite uma maior flexibilidade e um comportamento mais coerente em se tratando dos mecanismos probabilísticos que regem as incertezas presentes nos sistemas. Para uma melhor compreensão do assunto recomenda-se Menêzes & Droguett (2007).

Neste capítulo será feita uma aplicação das RBs *fuzzy*, para a estimação da probabilidade de erro humano de um eletricitista auxiliar envolvido na substituição de cadeias de isoladores em linhas de transmissão (LTs). A principal diferença entre as RBs tradicionais e as RBs *fuzzy* está no fato das probabilidades condicionais utilizadas neste último tipo de rede assumirem valores *fuzzy*. Para a quantificação das RBs *fuzzy*, será utilizado o método de educação proposto na seção 5.2.

7.2 O Problema

Menêzes & Droguett (2007), analisou a confiabilidade humana em atividades de substituição de cadeias de isoladores em LTs. O objetivo dessa atividade é substituir isoladores oxidados por isoladores novos. Para tanto atuam sete eletricitistas nesta tarefa, dos quais existem eletricitistas encarregados, eletricitistas de topo, eletricitistas de montagem, eletricitistas de apoio e eletricitistas auxiliares.

Para a modelagem Menêzes & Droguett (2007) trabalharam com as RBs para uma representação mais realista da natureza dinâmica da interface homem-sistema, representando a relação entre eventos e entre fatores de desempenho.

Neste trabalho, com o objetivo de demonstrar o método de educação proposto aplicado nas RBs *fuzzy*, é apresentada a RB *fuzzy* dos FDs envolvidos na atividade do eletricista auxiliar. Desta rede será estimada a probabilidade de erro humano para estes eletricistas.

7.3 Aplicação do Método e Resultados

De acordo com Menêzes & Droguett (2007), a tarefa dos eletricistas auxiliares é dar suporte aos eletricistas que estão na estrutura, i.e., eles seguram a linha de mão, artifício utilizado para içamento de equipamentos, ferramentas e isoladores à estrutura. Essa atividade é bastante simples. No entanto, requer do eletricista um certo nível de atenção para que seja exercida conjuntamente com os demais eletricistas no manuseio da linha de mão. A figura 7.1 (Menêzes & Droguett, 2007), apresenta a RB dos FDs para o eletricista auxiliar:

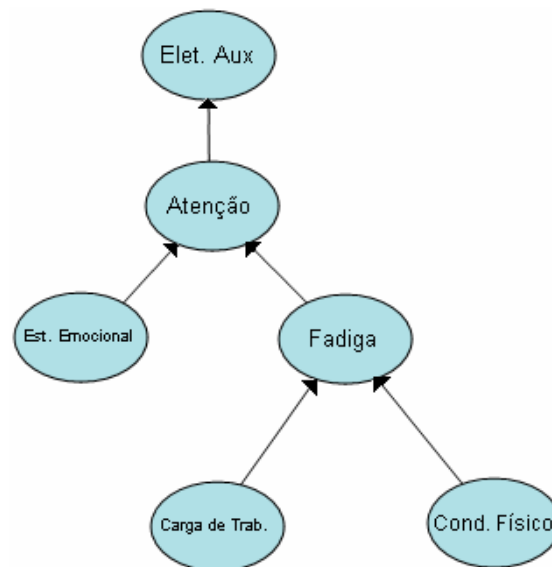


Figura 7.1 – Rede Bayesiana para os FDs dos Eletricistas Auxiliares.

Como pode ser observado na figura 7.1, é considerado que o nível de atenção recebe apenas influência do estado emocional e da fadiga, que por sua vez, pode ser uma manifestação de uma carga de trabalho excessiva ou um condicionamento físico inadequado.

Para educação dos parâmetros *fuzzy*, correspondentes a RB *fuzzy* apresentada na figura 7.1, foi aplicado o método de educação proposto na seção 5.2 em um engenheiro eletricista com experiência de mais de 30 anos no setor elétrico inclusive com ampla experiência na área de segurança de atividades de substituição de cadeias de isoladores em LTs. Ao todo foram educados treze parâmetros correspondentes aos cenários em estudo. Tais cenários são apresentados na tabela 7.1.

Tabela 7.1– Cenários em estudo

Cenário 1	Estado emocional adequado
Cenário 2	Carga de trabalho adequada
Cenário 3	Condicionamento físico adequado
Cenário 4	Atenção adequada estado emocional adequado, fadiga adequada
Cenário 5	Atenção adequada estado emocional adequado, fadiga inadequada
Cenário 6	Atenção adequada estado emocional inadequado, fadiga adequada
Cenário 7	Atenção adequada estado emocional inadequado, fadiga inadequada
Cenário 8	Fadiga adequada carga de trabalho adequada, condicionamento físico adequado
Cenário 9	Fadiga adequada carga de trabalho adequada, condicionamento físico inadequado
Cenário 10	Fadiga adequada carga de trabalho inadequada, condicionamento físico adequado
Cenário 11	Fadiga adequada carga de trabalho inadequada, condicionamento físico inadequado
Cenário 12	Sucesso do eletricitista atenção adequada
Cenário 13	Sucesso do eletricitista atenção inadequada

O especialista foi submetido aos testes de calibração descritos na sessão 6.2 e os seus resultados foram os seguintes:

Tabela 7.2– Resultados dos testes de calibração aplicados ao especialista.

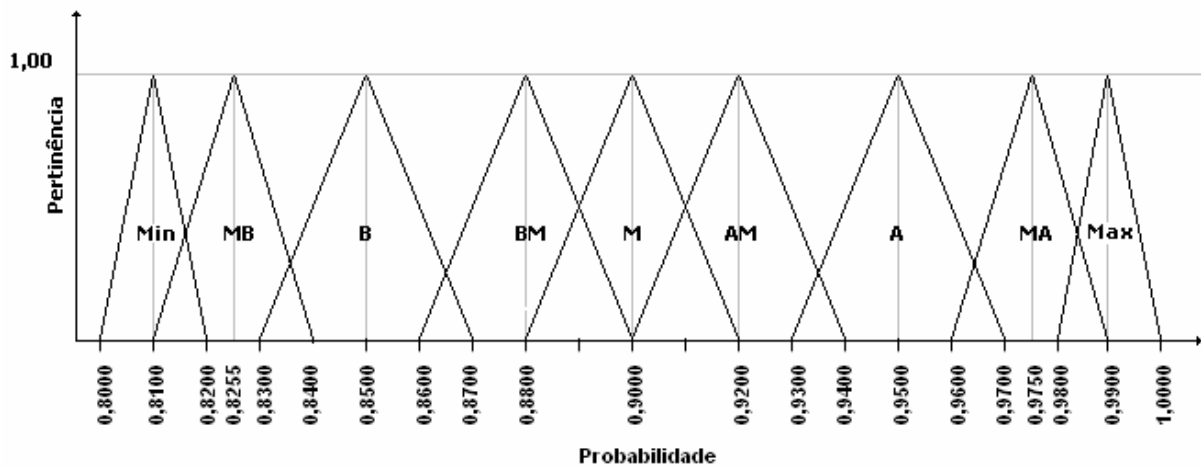
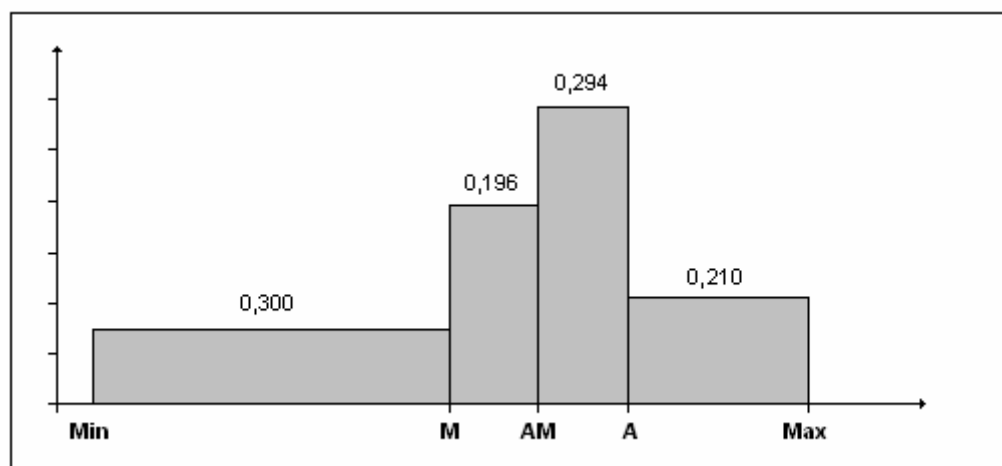
Teste 1 (intelectualidade)		Teste 2 (Percepção)	
Freq. Relativa de acertos	Credibilidade média	Freq. Relativa de acertos	Credibilidade média
80,00%	81,20%	72,00%	73,20%

Conforme pode ser observado, o especialista encontra-se bem calibrado tanto com relação a sua intelectualidade como em relação a sua percepção, uma vez que os valores correspondentes à frequência relativa de acertos e à credibilidade média assumem resultados bastante próximos nos dois casos.

A seguir são apresentados os resultados obtidos da educação para cada um dos cenários analisados.

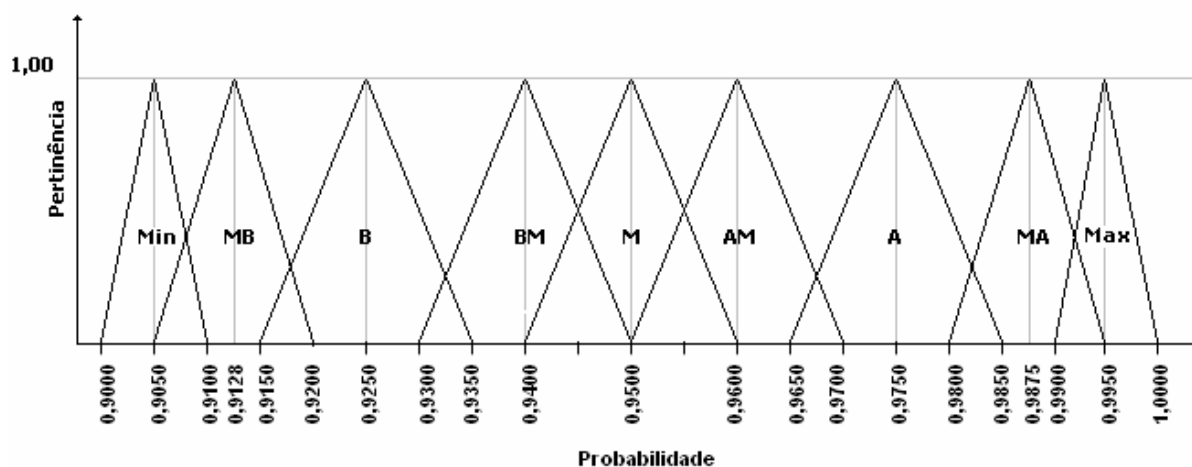
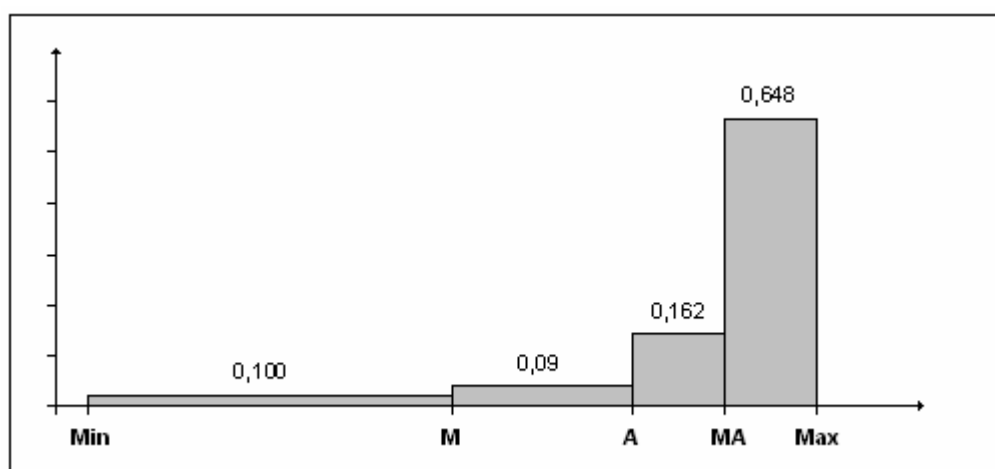
Cenário 1 - Estado emocional adequado.**Tabela 7.3: Questões feitas ao especialista sobre o cenário 1.**

Limites do intervalo		Resposta
Qual o valor mínimo para a probabilidade do estado emocional do elet. aux ser adequado?		80%
Qual o valor máximo para a probabilidade do estado emocional do elet. aux ser adequado?		100%
Questões	Resposta	Credibilidade
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo moderada?	sim	70%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo alta?	não	70%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo alta moderada?	sim	60%

**Figura 7.2 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 1.****Figura 7.3 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 1.**

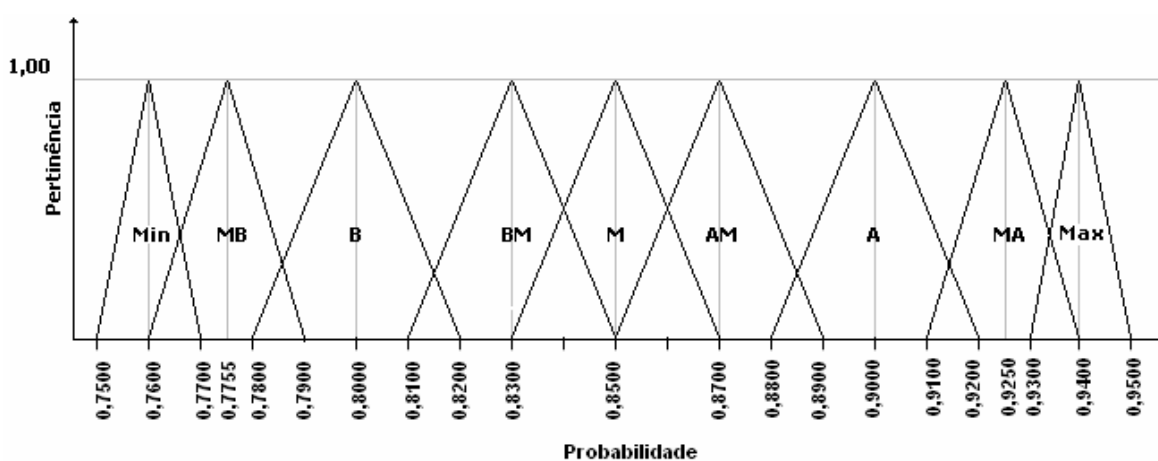
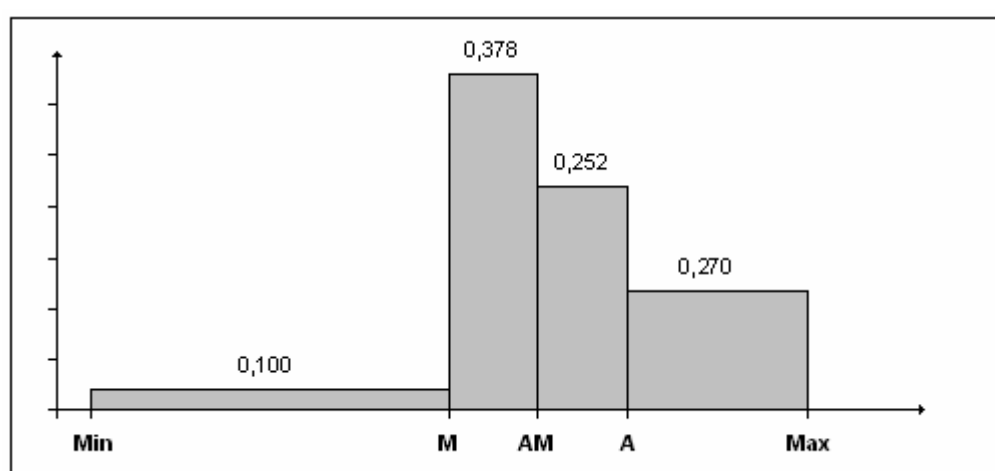
Cenário 2 - Carga de trabalho adequada:**Tabela 7.4: Questões feitas ao especialista sobre o cenário 2.**

Limites do intervalo	Resposta	
Qual o valor mínimo para a probabilidade da carga de trabalho ser adequada?	90%	
Qual o valor máximo para a probabilidade da carga de trabalho ser adequada?	100%	
Questões	Resposta	Credibilidade
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo moderada?	sim	90%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo alta?	sim	90%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo muito alta?	sim	80%

**Figura 7.4 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 2.****Figura 7.5 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 2.**

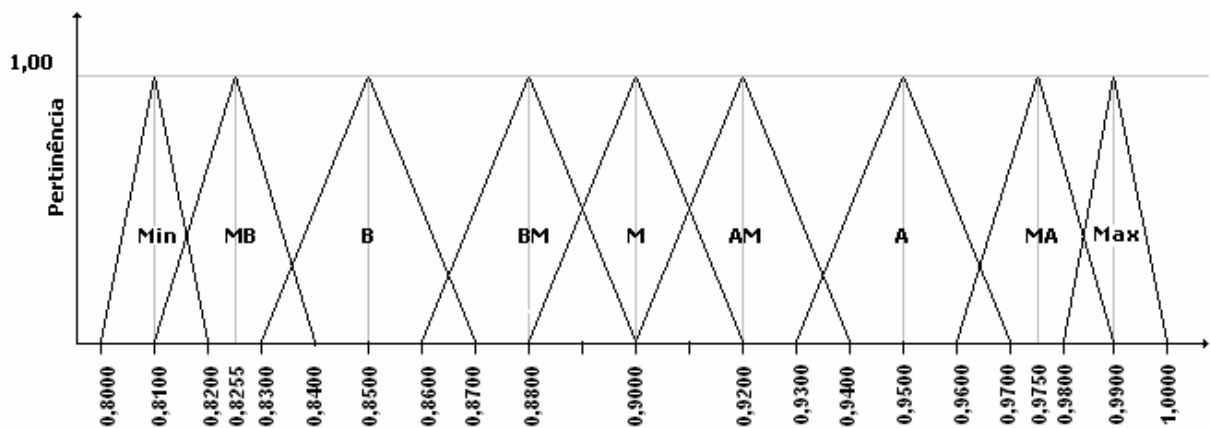
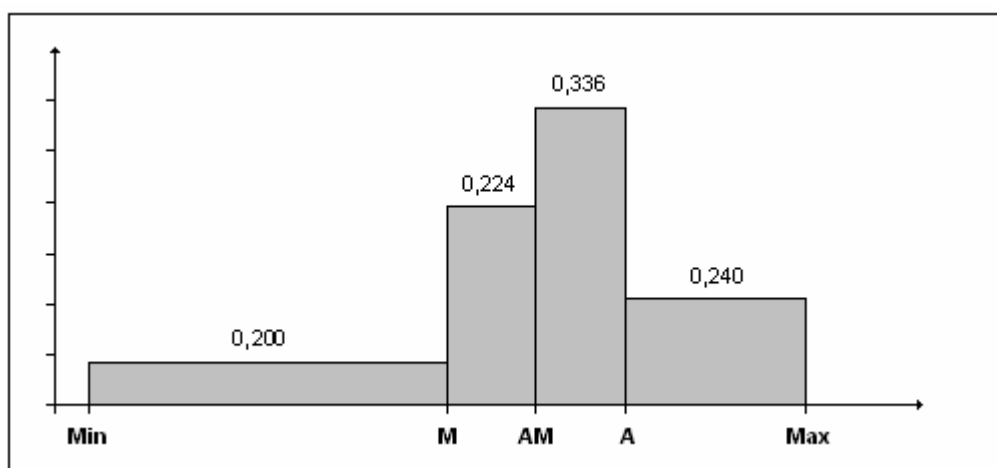
Cenário 3 – Condicionamento físico adequado:**Tabela 7.5: Questões feitas ao especialista sobre o cenário 3.**

Limites do intervalo	Resposta	
Qual o valor mínimo para a probabilidade do cond. físico ser adequado?	75%	
Qual o valor máximo para a probabilidade do cond. físico ser adequado?	95%	
Questões	Resposta	Credibilidade
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo moderada?	sim	90%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo alta?	não	70%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo alta moderada?	não	60%

**Figura 7.6 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 3.****Figura 7.7 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 3.**

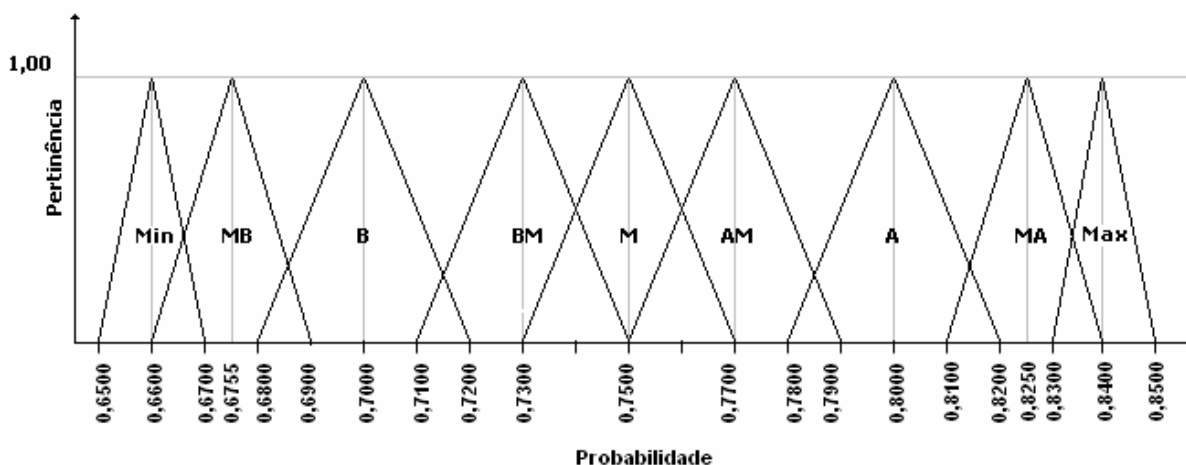
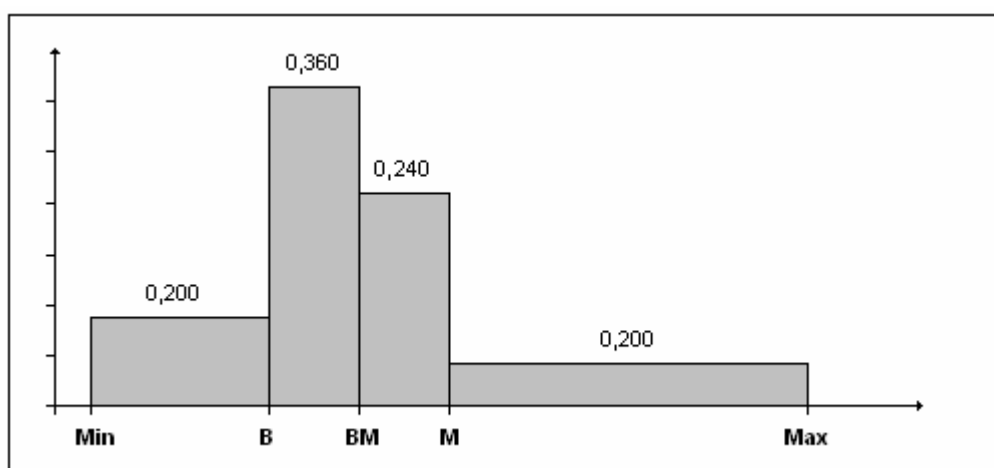
Cenário 4 – Atenção adequada | estado emocional adequado, fadiga adequada:**Tabela 7.6: Questões feitas ao especialista sobre o cenário 4.**

Limites do intervalo	Resposta	
Qual o valor mínimo para a probabilidade da atenção ser adequada dado que o estado emocional é adequado e a fadiga é adequada?	80%	
Qual o valor máximo para a probabilidade da atenção ser adequada dado que o estado emocional é adequado e a fadiga é adequada?	100%	
Questões	Resposta	Credibilidade
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo moderada?	sim	80%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo alta?	não	70%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo alta moderada?	sim	60%

**Figura 7.8 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 4.****Figura 7.9 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 4.**

Cenário 5 – Atenção adequada | estado emocional adequado, fadiga inadequada:**Tabela 7.7 – Questões feitas ao especialista sobre o cenário 5.**

Limites do intervalo	Resposta	
Qual o valor mínimo para a probabilidade da atenção ser adequada dado que o estado emocional é adequado e a fadiga é inadequada?	65%	
Qual o valor máximo para a probabilidade da atenção ser adequada dado que o estado emocional é adequado e a fadiga é inadequada?	85%	
Questões	Resposta	Credibilidade
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo moderada?	não	80%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo baixa?	sim	75%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo baixa moderada?	não	60%

**Figura 7.10 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 5.****Figura 7.11 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 5.**

Cenário 6 – Atenção adequada | estado emocional inadequado, fadiga adequada:

Tabela 7.8– Questões feitas ao especialista sobre o cenário 6.

Limites do intervalo		Resposta	
Qual o valor mínimo para a probabilidade da atenção ser adequada dado que o estado emocional é inadequado e a fadiga é adequada?		60%	
Qual o valor máximo para a probabilidade da atenção ser adequada dado que o estado emocional é inadequado e a fadiga é adequada?		80%	
Questões		Resposta	Credibilidade
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo moderada?		não	90%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo baixa?		sim	75%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo baixa moderada?		não	60%

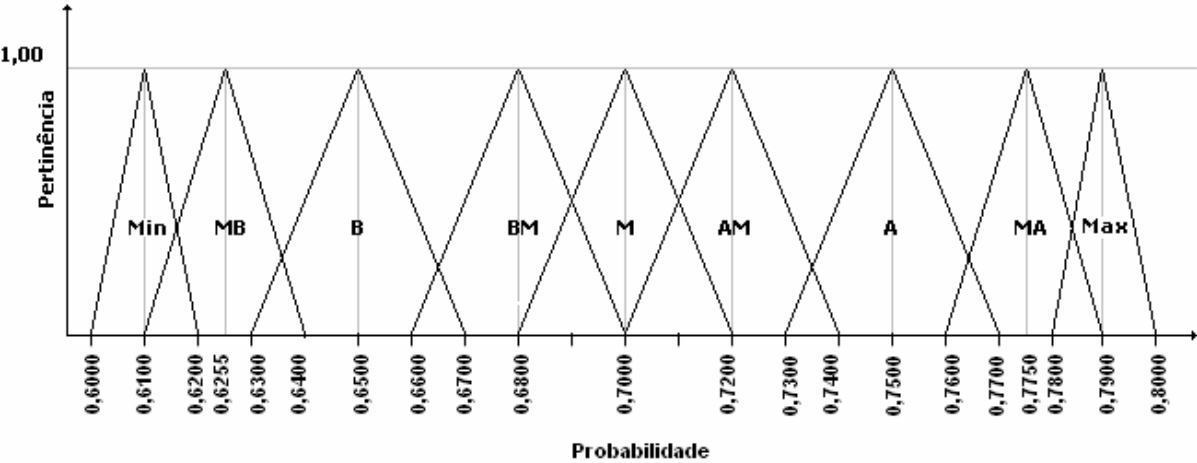


Figura 7.12 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 6.

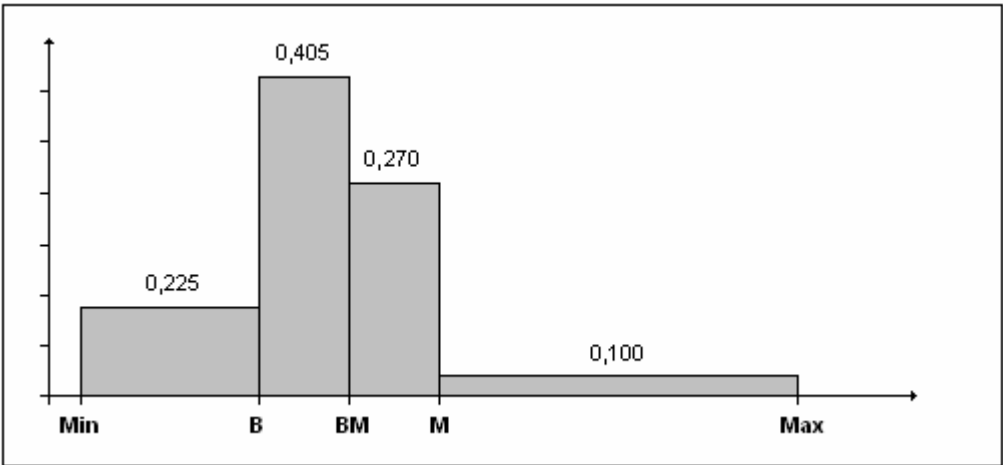


Figura 7.13 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 6.

Cenário 7 – Atenção adequada | estado emocional inadequado, fadiga inadequada:

Tabela 7.9 – Questões feitas ao especialista sobre o cenário 7.

Limites do intervalo	Resposta	
Qual o valor mínimo para a probabilidade da atenção ser adequada dado que o estado emocional é inadequado e a fadiga é inadequada?	30%	
Qual o valor máximo para a probabilidade da atenção ser adequada dado que o estado emocional é inadequado e a fadiga é inadequada?	60%	
Questão	Resposta	Credibilidade
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo moderada?	não	80%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo baixa?	não	70%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo muito baixa?	sim	60%

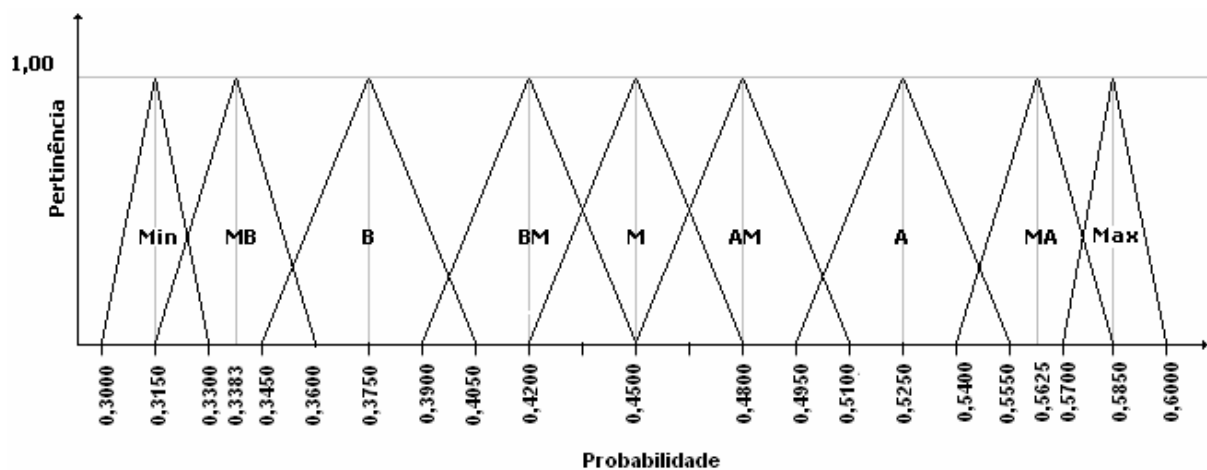


Figura 7.14 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 7.

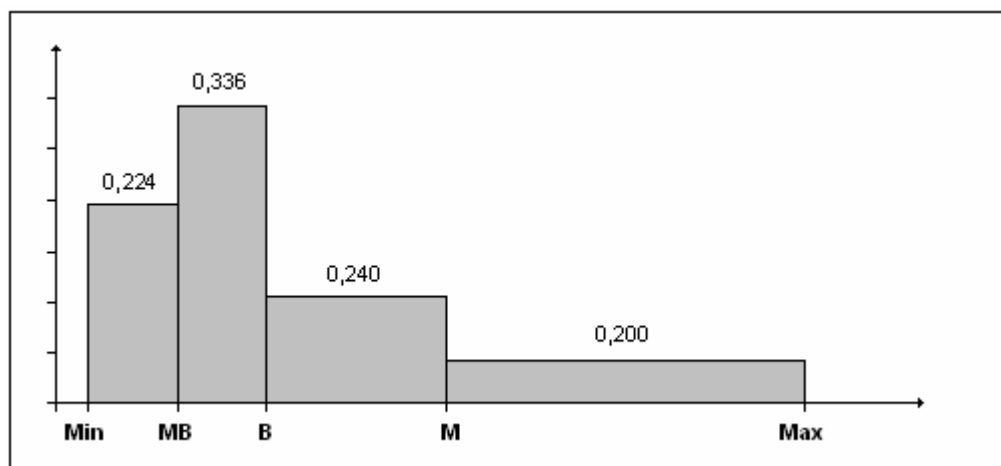


Figura 7.15 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 7.

Cenário 8 – Fadiga adequada | carga de trab. adequada, cond. físico adequado:

Tabela 7.10 – Questões feitas ao especialista sobre o cenário 8.

Limites do intervalo	Resposta	
Qual o valor mínimo para a probabilidade da fadiga ser adequada dado que a carga de trabalho é adequada e o cond. físico é adequado?	85%	
Qual o valor máximo para a probabilidade da fadiga ser adequada dado que a carga de trabalho é adequada e o cond. físico é adequado?	100%	
Questão	Resposta	Credibilidade
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo moderada?	sim	90%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo alta?	sim	90%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo muito alta?	não	80%

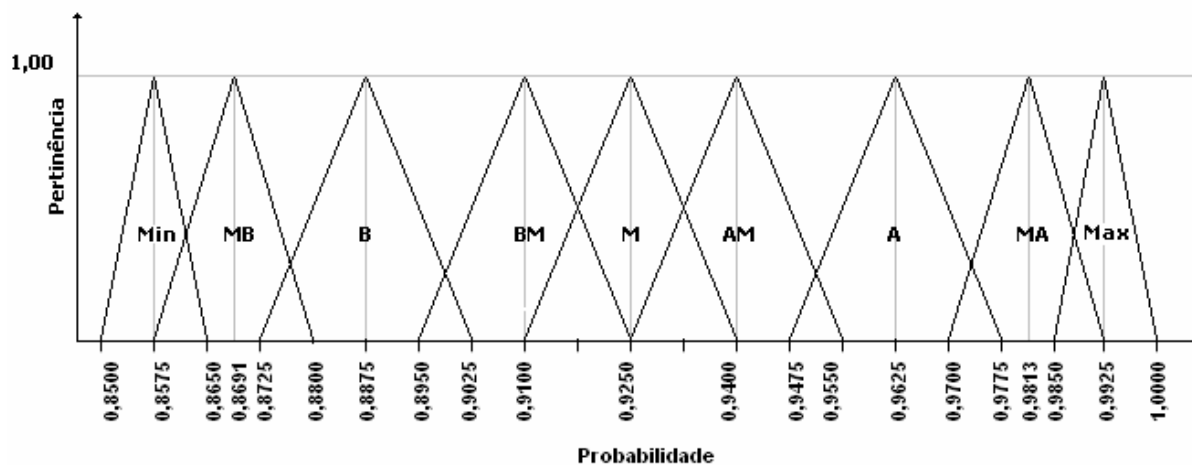


Figura 7.16 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 8.

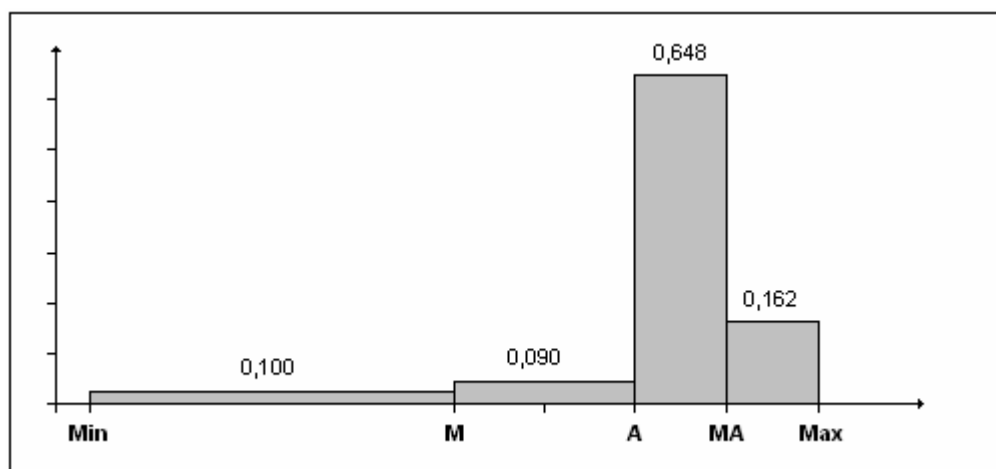
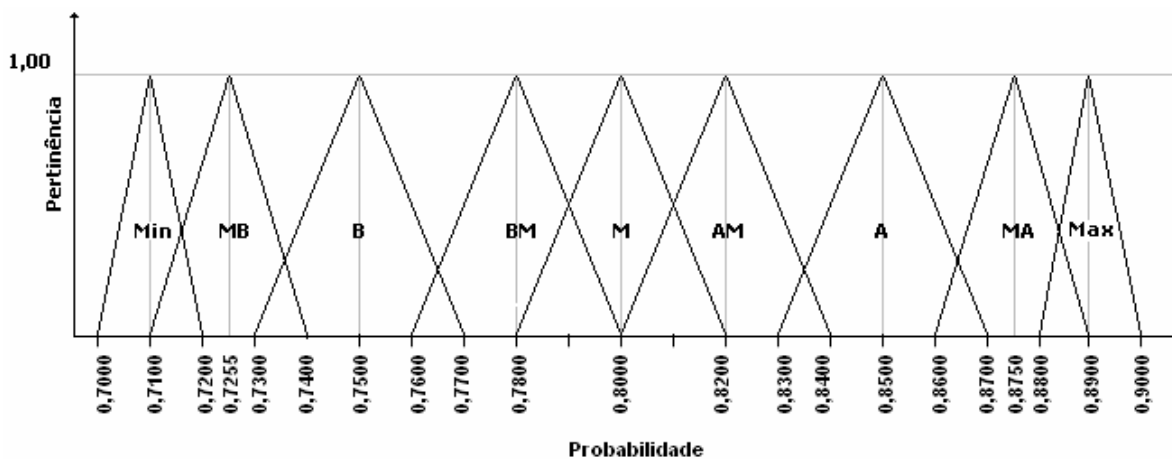
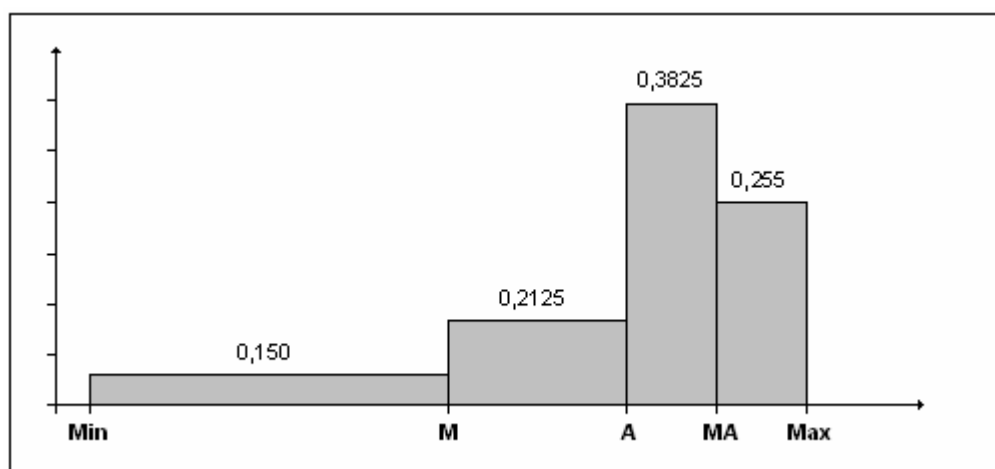


Figura 7.17 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 8.

Cenário 9 – Fadiga adequada | carga de trab. adequada, cond. físico inadequado:**Tabela 7.11– Questões feitas ao especialista sobre o cenário 9.**

Limites do intervalo	Resposta	
Qual o valor mínimo para a probabilidade da fadiga ser adequada dado que a carga de trabalho é adequada e o cond. físico é inadequado?	70%	
Qual o valor máximo para a probabilidade da fadiga ser adequada dado que a carga de trabalho é adequada e o cond. físico é inadequado?	90%	
Questão	Resposta	Credibilidade
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo moderada?	sim	85%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo alta?	sim	75%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo muito alta?	não	60%

**Figura 7.18 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 9.****Figura 7.19 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 9.**

Cenário 10 – Fadiga adequada | carga de trab. inadequada, cond. físico adequado:

Tabela 7.12 – Questões feitas ao especialista sobre o cenário 10.

Limites do intervalo		Resposta	
Qual o valor mínimo para a probabilidade da fadiga ser adequada dado que a carga de trabalho é inadequada e o cond. físico é adequado?		60%	
Qual o valor máximo para a probabilidade da fadiga ser adequada dado que a carga de trabalho é inadequada e o cond. físico é adequado?		80%	
Questão		Resposta	Credibilidade
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo moderada?		sim	80%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo alta?		sim	65%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo muito alta?		não	60%

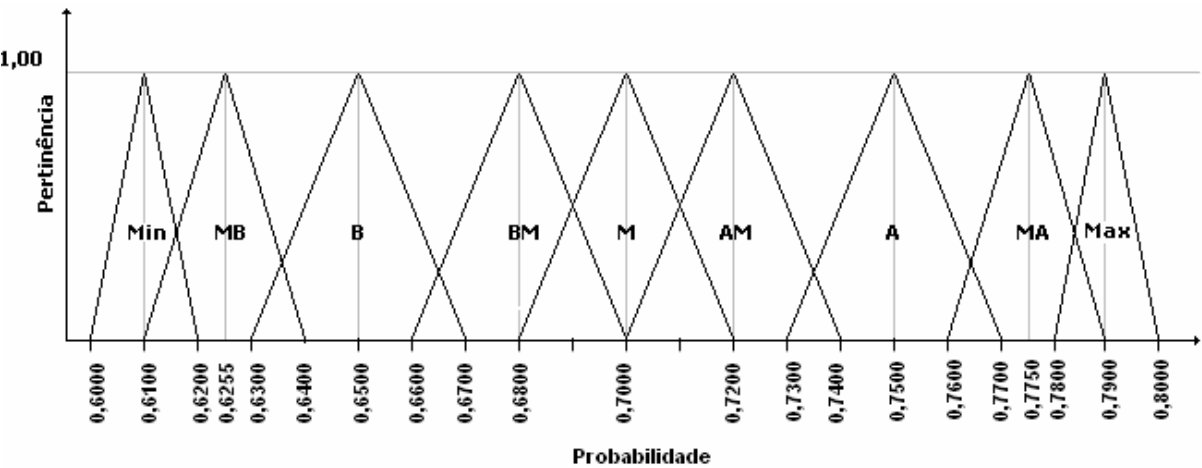


Figura 7.20 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 10.

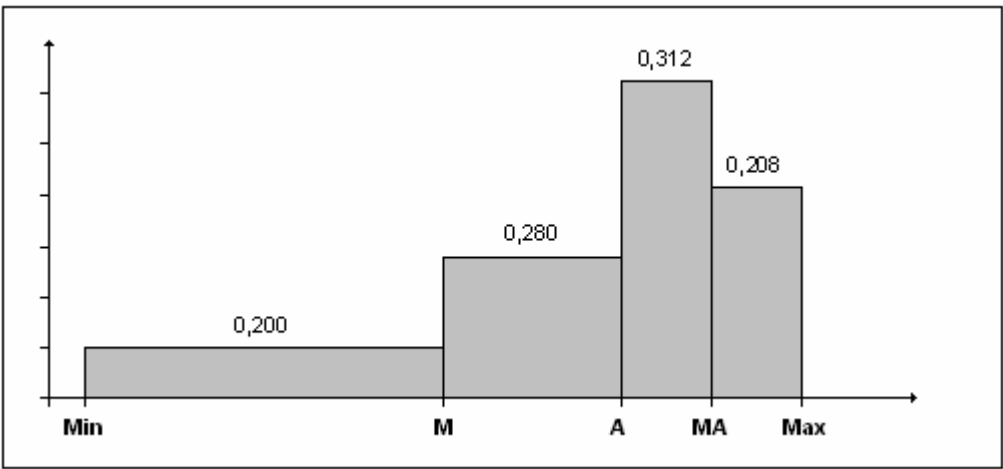
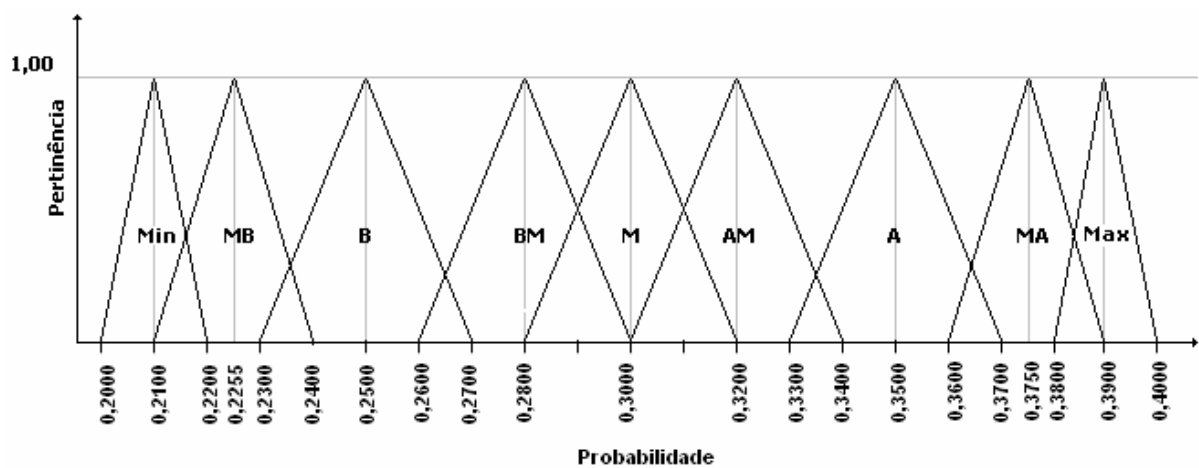
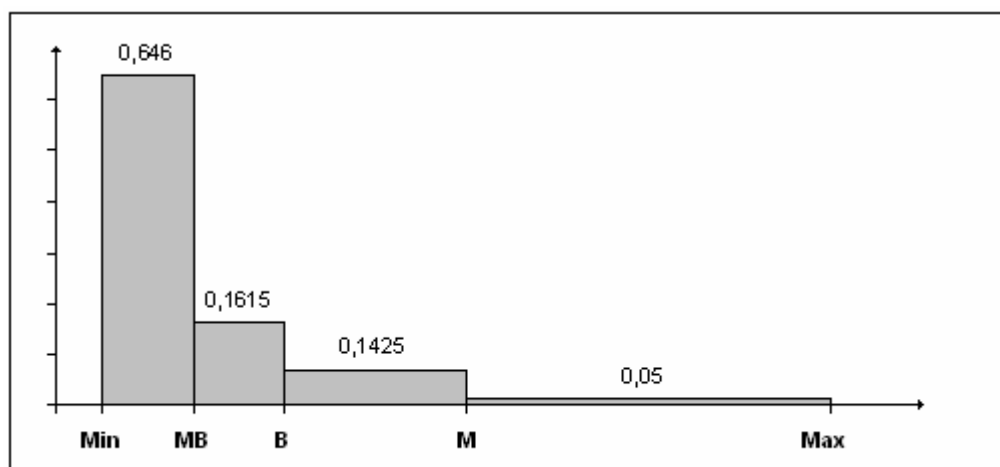


Figura 7.21 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 10.

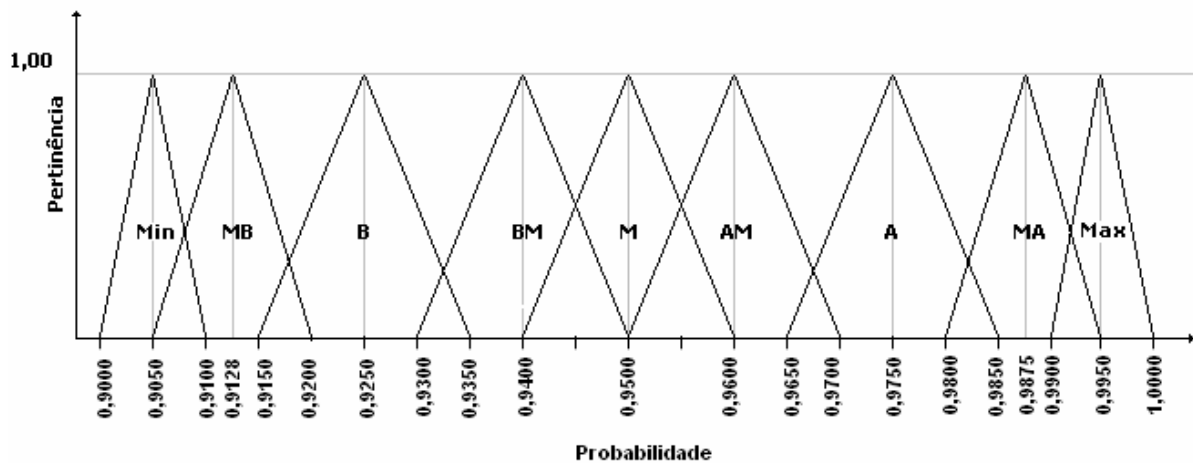
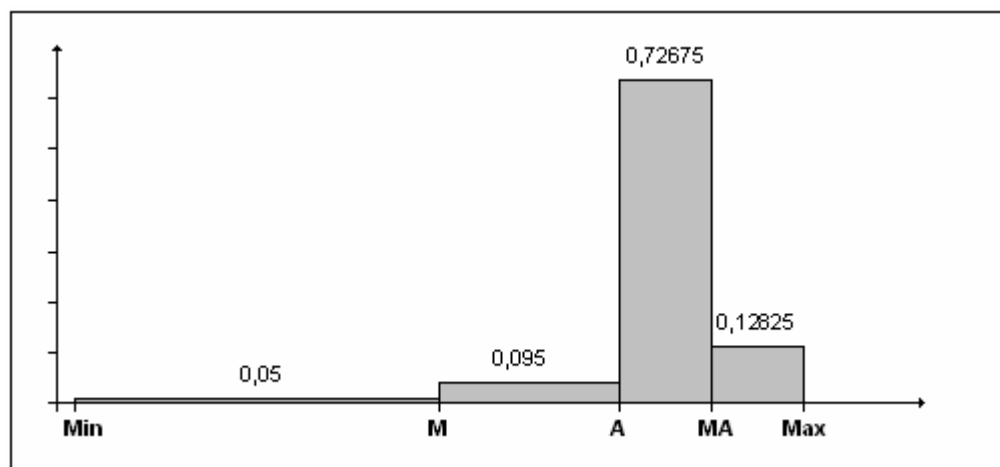
Cenário 11 – Fadiga adequada | carga de trab. inadequada, cond. físico inadequado:**Tabela 7.13 – Questões feitas ao especialista sobre o cenário 11.**

Limites do intervalo	Resposta	
Qual o valor mínimo para a probabilidade da fadiga ser adequada dado que a carga de trabalho é inadequada e o cond. físico é inadequado?	20%	
Qual o valor máximo para a probabilidade da fadiga ser adequada dado que a carga de trabalho é inadequada e o cond. físico é inadequado?	40%	
Questão	Resposta	Credibilidade
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo moderada?	não	95%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo baixa?	não	85%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo muito baixa?	não	80%

**Figura 7.22 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 11.****Figura 7.23 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 11.**

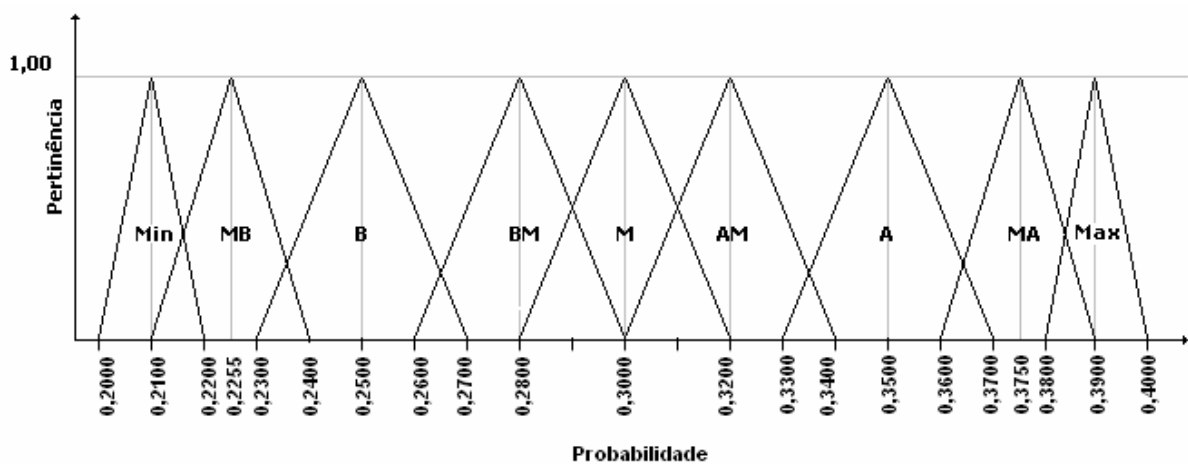
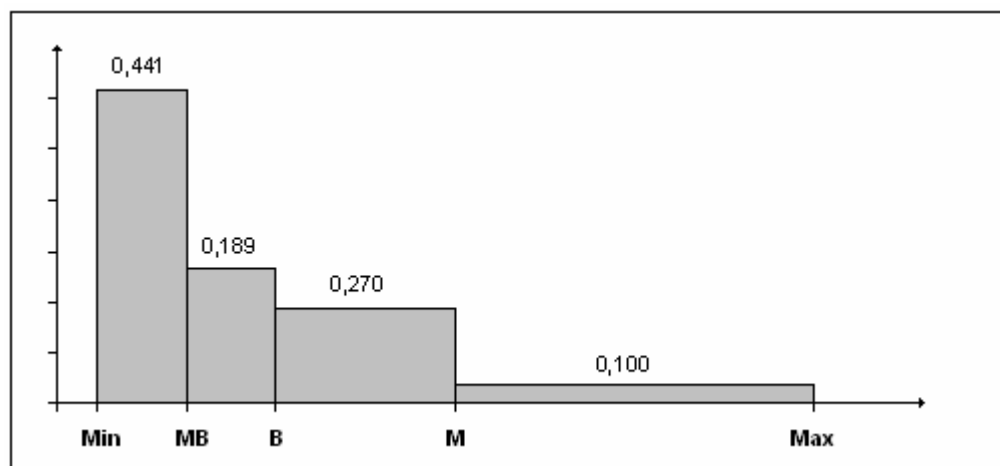
Cenário 12 – Sucesso do eletricitista | atenção adequada:**Tabela 7.14 – Questões feitas ao especialista sobre o cenário 12.**

Limites do intervalo	Resposta	
Qual o valor mínimo para a probabilidade do sucesso do eletricitista dado que a sua atenção é adequada?	90%	
Qual o valor máximo para a probabilidade do sucesso do eletricitista dado que a sua atenção é adequada?	100%	
Questão	Resposta	Credibilidade
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo moderada?	sim	95%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo alta?	sim	90%
Você acha que a probabilidade deste cenário acontecer é no mínimo muito alta?	não	85%

**Figura 7.24 – Conjuntos *fuzzy* gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 12.****Figura 7.25 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 12.**

Cenário 13 – Sucesso do eletricitista | atenção inadequada:**Tabela 7.15 – Questões feitas ao especialista sobre o cenário 13.**

Limites do intervalo	Resposta	
Qual o valor mínimo para a probabilidade do sucesso do eletricitista dado que a sua atenção é inadequada?	20%	
Qual o valor máximo para a probabilidade do sucesso do eletricitista dado que a sua atenção é inadequada?	40%	
Questão	Resposta	Credibilidade
Você acha que a probabilidade do elet. aux operar com sucesso dado que a atenção não é adequada é no mínimo moderada?	não	90%
Você acha que a probabilidade do elet. aux operar com sucesso dado que a atenção não é adequada é no mínimo baixa?	não	70%
Você acha que a probabilidade do elet. aux operar com sucesso dado que a atenção não é adequada é no mínimo muito baixa?	não	70%

**Figura 7.26 – Conjuntos fuzzy gerados a partir da resposta do especialista sobre os limites da probabilidade do cenário 13.****Figura 7.27 – Distribuição de probabilidade gerada a partir da educação do especialista sobre o cenário 13.**

De posse das distribuições de probabilidades para cada um dos cenários analisados é possível obter, através da expressão 5.4, as medianas *fuzzy* que serão utilizadas como parâmetros da RB *fuzzy*. Tais parâmetros são apresentados nas tabelas de probabilidades condicionais conforme apresentado nas tabelas que se seguem. Note que Nível 0 = “adequado” e Nível 1 = “inadequado”.

Tabela 7.16 - TPC do Estado Emocional

P(Estado Emocional = Nível 0)	P(Estado Emocional = Nível 1)
(0,8999; 0,9204; 0,9410)	(0,0590; 0,0796; 0,1001)

Tabela 7.17 - TPC da Carga de Trabalho

P(Carga de Trabalho = Nível 0)	P(Carga de Trabalho = Nível 1)
(0,9789; 0,9892; 0,9996)	(0,0004; 0,0108; 0,0211)

Tabela 7.18 - TPC da Carga do Condicionamento Físico

P(Cond. Físico = Nível 0)	P(Cond. Físico = Nível 1)
(0,8491; 0,8726; 0,8961)	(0,1039; 0,1274; 0,1509)

Tabela 7.19 - TPC do Eletricista

Atenção	P(Sucesso do eletricista Atenção)	P(Erro do eletricista Atenção)
Nível 0	(0,9626; 0,9811; 0,9997)	(0,0003; 0,0189; 0,0374)
Nível 1	(0,2069; 0,2331; 0,2587)	(0,7413; 0,7669; 0,7931)

Tabela 7.20 - TPC da Atenção

Estado Emocional, Fadiga	P(Atenção = Nível 0 Estado Emocional, Fadiga)	P(Atenção = Nível 1 Estado Emocional, Fadiga)
Nível 0, Nível 0	(0,8977; 0,9268; 0,9558)	(0,0442; 0,0732; 0,1023)
Nível 0, Nível 1	(0,6717; 0,7250; 0,7783)	(0,2217; 0,2750; 0,3283)
Nível 1, Nível 0	(0,6232; 0,6704; 0,7175)	(0,2825; 0,3296; 0,3768)
Nível 1, Nível 1	(0,3027; 0,3684; 0,4339)	(0,5661; 0,6316; 0,6973)

Tabela 7.21 - TPC da Fadiga

Carga de Trabalho, Cond. Físico	P(Fadiga = Nível 0 Carga Trabalho, Cond. Físico)	P(Fadiga = Nível 1 Carga Trabalho, Cond. Físico)
Nível 0, Nível 0	(0,9439; 0,9715; 0,9990)	(0,0010; 0,0285; 0,0561)
Nível 0, Nível 1	(0,8264; 0,8590; 0,8916)	(0,1084; 0,1410; 0,1736)
Nível 1, Nível 0	(0,7294; 0,7516; 0,7738)	(0,2262; 0,2484; 0,2706)
Nível 1, Nível 1	(0,1923; 0,2220; 0,2510)	(0,7490; 0,7780; 0,8077)

Para os cálculos apresentados a seguir, considere que:

- Fadiga com Nível 0 = F, e Fadiga com Nível 1 = -F
- Carga de Trabalho com Nível 0 = CT, e Carga de Trabalho com Nível 1 = -CT
- Cond. Físico com Nível 0 = CF, e Cond. Físico com Nível 1 = -CF
- Atenção com Nível 0 = A, e Atenção com Nível 1 = -A
- Estado Emocional com Nível 0 = EE, e Estado Emocional com Nível 1 = -EE

De posse dos parâmetros da RB *fuzzy*, é possível estimar a probabilidade da Fadiga do eletricitista estar adequada considerando a seguinte expressão:

$$P(F) = [P(F | CT, CF) * P(CT)*P(CF)] + [P(F | -CT, CF)*P(-CT)*P(CF)] + [P(F | CT, -CF)*P(CT)*P(-CF)] + [P(F | -CT, -CF)*P(-CT)*P(-CF)]$$

Da mesma forma, através da expressão a seguir, é possível obter a probabilidade da Atenção do eletricitista estar adequada:

$$P(A) = [P(A | EE, F)*P(EE)*P(F)] + [P(A | -EE, F)*P(-EE)*P(F)] + [P(A | EE, -F)*P(EE)*P(-F)] + [P(A | -EE, -F)*P(-EE)*P(-F)]$$

E finalmente a probabilidade de sucesso para o especialista é calculada através da seguinte expressão:

$$P(\text{Sucesso do Eletricista}) = [P(\text{Sucesso do Eletricista} | A) * P(A)] + [P(\text{Erro do eletricitista} | Atenção) * P(-A)]$$

Assim, a probabilidade do eletricitista cometer erro na atividade é dada pela seguinte expressão:

$$P(\text{Erro do eletricitista}) = 1 - P(\text{Sucesso do Eletricitista})$$

Portanto, respeitando-se a aritmética *fuzzy* apresentada na seção 2.1.6, e fazendo-se todos os cálculos necessários, é obtido o valor *fuzzy* que representa a probabilidade de erro humano:

$$P(\text{Erro Humano}) \approx (-0,1425; 0,0961; 0,3347)$$

Note que o valor *fuzzy* apresenta como extremo esquerdo um valor negativo. No entanto este número *fuzzy* representa uma probabilidade. De acordo com Ren, Wang e Jenkinson (2005), a representação de um conjunto *fuzzy* deve ser feita respeitando-se o domínio do parâmetro que neste caso é uma probabilidade. Portanto, o domínio está entre 0 e 1. Assim, a representação do conjunto *fuzzy* probabilidade de erro humano é feita conforme apresentado na figura 7.28 e corresponde à linha azul do gráfico. Perceba que o valor *fuzzy* é aproximado já que para o cálculo da probabilidade são utilizadas expressões aproximadas para a multiplicação entre números *fuzzy* (ver seção 2.1.6).

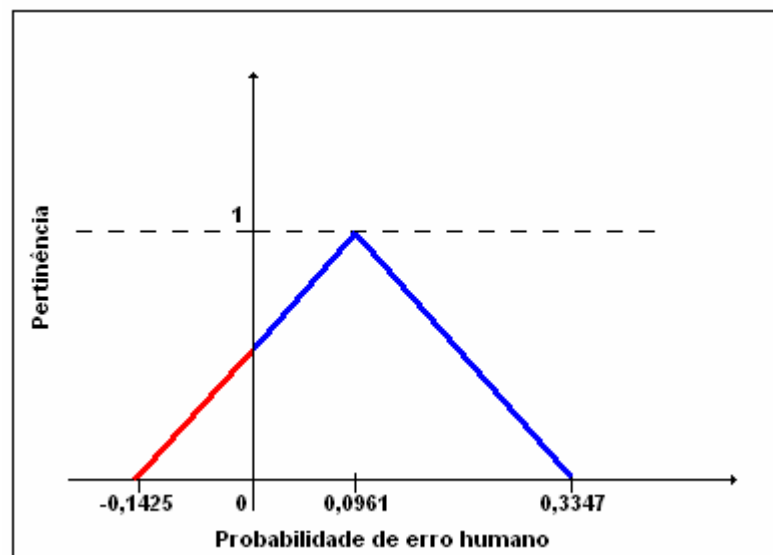


Figura 7.28 – Representação fuzzy para a probabilidade do eletricitista cometer um erro

Uma grande vantagem das RBs é o fato de ser possível atualizar o conhecimento sobre o erro humano à medida que novas evidências são obtidas. Isto é útil quando se está avaliando a tarefa em uma determinada circunstância. Esta flexibilidade é ilustrada no caso da RB fuzzy dos FDs do eletricista auxiliar.

Caso exista a evidência de que o estado emocional do operador está inadequado, ou seja, $P(EE) = (0,0,0)$ e $P(-EE) = (1,1,1)$, tem-se como resultado para a probabilidade de erro humano o seguinte valor fuzzy:

$$P(\text{Erro Humano} \mid -EE) \approx (0,1062; 0,2758; 0,4455)$$

Isto significa que o fator de desempenho estado emocional é muito importante para a composição do erro humano, já que o conjunto *fuzzy* foi bastante deslocado para o lado direito (veja figura 7.29). Neste caso, recomenda-se que sendo detectada uma evidência desse tipo o eletricista seja substituído da operação.

Caso a evidência seja a de que a carga de trabalho não está adequada, isto é, $P(CT) = (0,0,0)$ e $P(-CT) = (1,1,1)$ percebe-se que a probabilidade do erro humano também é deslocada para a direita:

$$P(\text{Erro Humano} \mid -CT) \approx (-0,0350; 0,1385; 0,3120)$$

Entretanto, a carga de trabalho não contribui com a mesma significância que o estado emocional para o aumento do erro, como pode ser observado na figura 7.29.

Considerando-se a evidência de que o eletricista está em plenas condições físicas, ou seja, $P(CF) = (1,1,1)$, e $P(-CF) = (0,0,0)$, percebe-se que a probabilidade de erro humano fica sendo representada pelo número *fuzzy*:

$$P(\text{Erro Humano} \mid CF) \approx (-0,0751; 0,0938; 0,2626)$$

Isto mostra que se o eletricista estiver em plenas condições físicas, a probabilidade de erro humano irá deslocar para a direita (ver figura 7.29), ou seja, boas condições físicas implicam em uma menor chance de erro humano.

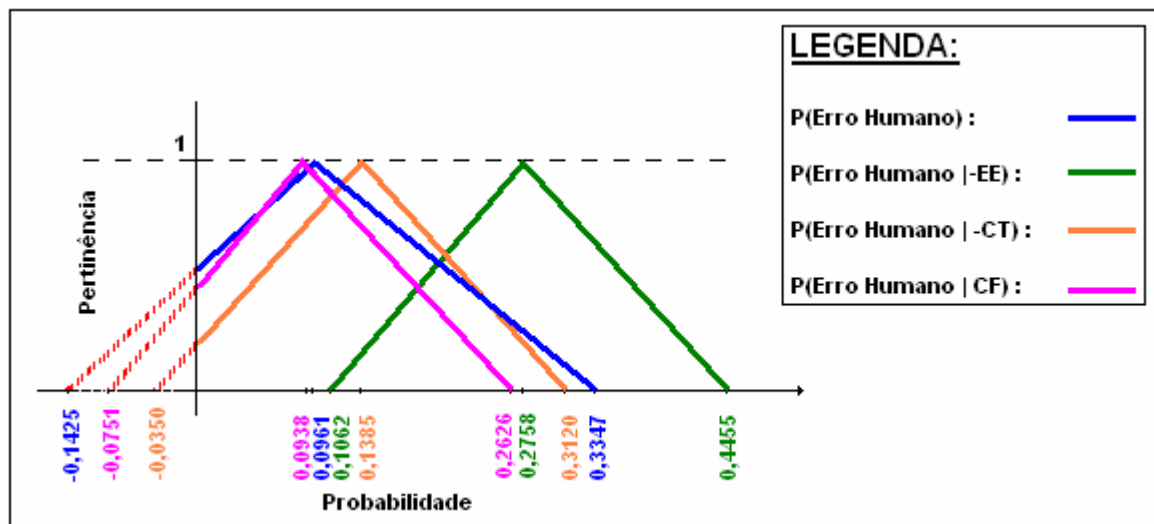


Figura 7.29 – Representação *fuzzy* para a probabilidade do eletricista cometer um erro considerando algumas evidências.

Os resultados *fuzzy* encontrados podem ser defuzificados utilizando algum dos métodos apresentados na seção 2.1.5. A defuzificação é necessária para uma melhor compreensão do analista. No entanto, como neste trabalho foi feito uso de números *fuzzy* triangulares simétricos, a defuzificação feita através de qualquer um dos métodos apresentados (CDG, MDM ou CDA), resulta no mesmo resultado, ou seja, o valor obtido será o valor cuja pertinência é máxima, isto é, o valor central do número *fuzzy*. A tabela 7.22 apresenta os resultados da defuzificação:

Tabela 7.22 – Valores Defuzificados

Probabilidades	Número Fuzzy Triangular (Simétrico)	Valor Defuzificado		
		CDG	MDM	CDA
P(Erro Humano)	(-0,1425; 0,0961; 0,3347)	0,0961	0,0961	0,0961
P(Erro Humano -EE)	(0,1062; 0,2758; 0,4455)	0,2758	0,2758	0,2758
P(Erro Humano -CT)	(-0,0350; 0,1385; 0,3120)	0,1385	0,1385	0,1385
P(Erro Humano CF)	(-0,0751; 0,0938; 0,2626)	0,0938	0,0938	0,0938

8 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho foi proposta uma metodologia lingüística para a educação da distribuição de probabilidade dos parâmetros referentes a uma RB *fuzzy*. Como forma de representar tais parâmetros também foi proposta uma medida a qual foi chamada de mediana *fuzzy*. Para o desenvolvimento do trabalho foi feita inicialmente uma fundamentação teórica sobre a teoria *fuzzy* e as Redes Bayesianas para, desta forma, ser possível entrar no hibridismo entre essas duas técnicas. Também foram abordados assuntos como análise de confiabilidade humana e alguns métodos de educação existentes na literatura. Um exemplo de aplicação foi apresentado no contexto de uma atividade em que era feita a substituição de cadeias de isoladores em linhas de transmissão. Uma RB *fuzzy* para os FDs de um eletricista auxiliar envolvido em tal atividade teve os parâmetros quantificados através do método de educação proposto. A seguir, será feito um apanhado geral sobre os resultados obtidos além de comentários sobre perspectivas para trabalhos futuros.

8.1 Performance do Método de Educação

O capítulo 6 tratou da avaliação do método de educação apresentado neste trabalho. Para tanto foi realizado um experimento no qual foi simulado um sistema operando sobre demanda. Participaram do experimento 5 estudantes, que após algumas evidências sobre o sistema foram eduzidos sobre a probabilidade do sistema falhar sobre demanda. Os resultados foram bastante condizentes com as evidências que os estudantes receberam (ver tabela 6.7).

Em relação à simplicidade, o destaque do método se dá pela utilização de variáveis lingüísticas, facilitando o entendimento do especialista. Quanto à eficiência pode-se dizer que os intervalos menos prováveis de conter o parâmetro são descartados, tornando o método mais eficiente e rápido. Em se tratando de refinamento, pode-se dizer que o método proposto utiliza questões de decisão, onde cada uma dessas questões envolve a metade do intervalo utilizado na questão anterior de forma a convergir para o intervalo modal. O controle empírico é feito na medida em que o nível de detalhamento das questões de decisão é elevado. Quando isso ocorre é esperado que os níveis de credibilidade atribuídos sejam menores, ou seja, a credibilidade deve ser inversamente proporcional ao refinamento. Se esta relação não é observada, o especialista deve ser convidado a explicar a sua resposta.

8.2 Aplicação nas Redes Bayesianas-Fuzzy

As redes RBs *fuzzy* são uma tecnologia com possibilidade de aplicação em vários domínios. O método proposto foi utilizado para a obtenção dos parâmetros de uma RB *fuzzy*, para estimar a probabilidade de erro humano de um eletricista auxiliar envolvido na atividade de substituição de cadeias de isoladores em linhas de transmissão. Na aplicação (apresentada no capítulo 7), foi feita a educação de probabilidades condicionais relacionadas aos fatores de desempenho envolvidos na atividade analisada. De posse dos parâmetros quantitativos da RB *fuzzy*, foi possível estimar a probabilidade de erro humano. Além disso, foi feita uma análise supondo algumas evidências, possibilitando desta forma a atualização das crenças da rede, sendo assim possível a categorização da importância relativa de um determinado fator na probabilidade de erro humano.

8.3 Comentário Geral

O método proposto neste trabalho mostrou-se bastante interessante já que ele é capaz de captar do especialista as informações necessárias para estimar uma distribuição de probabilidade, de forma simples e eficiente. O método utiliza variáveis lingüísticas durante o processo de educação, proporcionando perguntas mais claras e de melhor entendimento para o especialista sobre um determinado parâmetro. Durante o experimento apresentado no capítulo 6, foi possível observar que o método permitiu chegar a estimativas *fuzzy* de probabilidades condizente com as experiências adquiridas pelos especialistas. Isso mostra que o método proposto é eficiente e realmente cumpre com as expectativas geradas.

8.4 Perspectivas Futuras

Algumas perspectivas sobre a utilização do método e sugestões para melhorias são apresentadas a seguir:

- Espera-se que a metodologia desenvolvida possa ser aplicada em um contexto mais amplo, considerando um problema mais complexo a ser investigado permitindo tomadas de decisões estruturadas por raciocínio *fuzzy*;
- A utilização de outros tipos de números *fuzzy* como trapezoidal e gaussiano, deve ser estudada. Com isso será possível identificar vantagens e desvantagens na utilização de um determinado tipo de número *fuzzy* em detrimento a outro.

Sugere-se também que seja analisada a utilização de mais de um tipo de número *fuzzy* para o mesmo problema.

- Verificar se a partir dos resultados obtidos do teste de calibração, é possível traçar perfis de especialistas que se ajustem de maneira mais adequada a um determinado tipo de número *fuzzy*.
- Desenvolver uma forma de aplicação do método que considere a utilização de variáveis dinâmicas, ou seja, variáveis que podem sofrer mudanças de acordo com a variação do tempo.
- O desenvolvimento de uma forma barata e eficiente para que o especialista possa estar diretamente envolvido na definição das funções de pertinência de cada conjunto seria bastante interessante, já que esta pode ser a maior deficiência do método proposto. Dada a viabilidade de tal método deve-se verificar se há um maior controle lingüístico sobre as respostas dos especialistas quanto à educação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYYUB B. M. (2001) - *Elicitation of expert opinions for uncertainty and risks*. Boca Raton: CRC.

BANDEMER, H.; NÄTHER, W. (1992) - *Fuzzy Data Analysis*. Kluwer Academic Publishers – Dordrecht.

BEDFORD, T.; REVIE, M.; WALLS, L. (2006) - Applications of bayes linear methods to reliability. In *8th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management*. Louisiana: ASME.

Bernardo, J. M., Smith, A. F.(1995) - *Bayesian theory*, 3 ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

BOBBIO, A.; PORTINALE, L.; MINICHINO, M. & CIANCAMERLA, E. (2001) - Improving the Analysis of Dependable Systems by Mapping Fault Trees into Bayesian Networks. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 71, p. 249-260.

BORGES, P. S. S. (2003) - Lógica Fuzzy e suas Aplicações. *IX Ciclo de Cursos e Palestras da Engenharia Elétrica. Apostila de Curso*. 28p.

BRENNER, L. A. (2003) - A Random Support Model of The Calibration of Subjective Probabilities. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, Vol. 90, p. 87-110, 2003.

CAMPELLO, F. M. (2002) - *Sistemas Probabilísticos*. Talus. Recife - Pernambuco.

COOKER. (1991) - *Experts in Uncertainty: Opnion and subjective probability in science*. New York: Oxford University Press.

COOLEN F. P. A. (1996) - On Bayesian reliability analysis with informative priors and censoring. *Reliability Engineering and System Safety* ; 53: 91-98.

COSENZA, C. (2003) - *Ementa de Lógica Fuzzy, Curso de Introdução à Fuzzy Set Theory*, COPPE/PEP/UFRJ.

DRIANKOV, D.; HELLENDORF, H.; REINFRANK, M. (1993) - *An introduction to Fuzzy Control*. Berlin: Springer-Verlag.

DUBOIS, D., PRADE, H. (1980) - *Fuzzy Sets and Systems. Theory and Applications*. Academic Press, New York.

FIRMINO, P. R., DROGUETT, E. L. (2004) - *Redes Bayesianas Para a Parametrização da Confiabilidade em Sistemas Complexos*. Dissertação (Mestrado) - CTG/UFPE, M.Sc., Engenharia de Produção. Recife.

FIRMINO, P. R., MENÊZES, R., AND DROGUETT, E. L. (2007) - A Method For Eliciting Expert Opinions Based on Bayesian Intervals Estimation and Computational Searching Algorithms, *Under appreciation by Reliability Engineering and Systems Safety*.

FINETTI B. D. (1974) - *Theory of Probability*. vol. 1, 5 ed. London: JohnWiley.

FURTHSNTN-SCHNATER, S. (1993) - On Fuzzy Bayesian Inferences. *Fuzzy Sets and Systems*, vol.1.60.

HOKSTAD, P., OIEN, K., REINERTSEN, R. (1998) - Recommendations on the use of expert judgment in safety and reliability engineering studies. Two offshore case studies. *Reliability Engineering and System Safety*; 61: 65-76.

HALLIWELL J., KEPPENS J., SHEN Q. (2003) - Linguistic Bayesian Networks For Reasoning With Subjective Probabilities in Forensic Statistics, *Proceedings of the 5th International Conference on AI and Law*, 42-50.

HOLLNAGEL, E. (1998) - *Cognitive Reliability and Error Analysis*. Elsevier Science, England.

JOHNSON, J. E. V. (2001) - Calibration of subjective probability judgments in a naturalistic setting. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, Vol. 85, p. 265-290.

KANDEL, A.; LEE, S. C. (1979) - *Fuzzy Switching and Automata: Theory and Applications*. New York: Crane Russak.

KAUFMANN, A.; GUPTA, M. M. (1988) - *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*. Elsevier Science Publishers, Estados Unidos.

KIM, I. S. (2001) Human reliability analysis in the man-machine interface design review. *Annals of Nuclear Energy*. v. 28, p.1069-1081.

KLIR, G.; YUAN, B. (1995) - *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic - Theory and Applications*, Prentice-Hall.

KORB, K. B. & NICHOLSON, A. E. (2003) - *Bayesian Artificial Intelligence*. Chapman & Hall/CRC. Florida.

KOSKO, B. (1992) - *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

KIRWAN, B. & AINSWORTH, L.K.(1993) - *A Guide to Task Analysis*. Taylor & Francis. Washington, DC.

KUMAMOTO, H. & HENLEY, E.J. (1996) - *Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists*, 2nd ed.

MENÊZES, R. C. S., DROGUETT, E. L. (2005) - *Uma Metodologia para Avaliação da Confiabilidade Humana em Atividades de Substituição de Cadeias de Isoladores em Linhas de Transmissão*, Dissertação (Mestrado) - CTG/UFPE, M.Sc., Engenharia de Produção. Recife.

MENÊZES, R. C. S., DROGUETT, E. A. L. (2007) - Análise da confiabilidade humana via redes Bayesianas: uma aplicação à manutenção de linhas de transmissão. *Revista Produção* v. 17, n. 1, p. 162-185, Jan./Abr.

MOSLEH, A.; CHANG, Y. H. (2004) - Model-based human reliability analysis: prospects and requirements. *Reliability Engineering and System Safety*. v. 83, p. 241-253.

NADLER G. C. , CAMPELLO F. M. (2001) - A protocol for the elicitation of prior distributions. In *2nd International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications*. New York.

NEAPOLITAN, R. E. (2004) - *Learning Bayesian Networks*. Pearson Prentice Hall. New Jersey.

NOORTWIJK, J. M.; DEKKER, R.; COOKE, R. M.; MAZZUCHI, T. A. (1992) - Expert Judgment in Maintenance Optimization. *IEEE Transactions on Reliability* 1992; 41 (3).

OAKLEY, J. (2002) - Eliciting Gaussian process priors for complex computer codes. *The Statistician*,; 51: 81-97.

O'HAGAN A.; OAKLEY J. E. (2004) - Probability is perfect, but we can't elicit it perfectly. *Reliability Engineering and System Safety* ; 85: 239–248.

PEREIRA, S. C. A., Ebecken, N. F. F. (2002) - *Tratamento de Incertezas em Modelagens de Bacias*. Tese (Doutorado) - COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil. Rio de Janeiro.

REN J.; JENKINSON I.; WANG J. (2005) - Fuzzy Bayesian Modelling in Maritime Risk Analysis, *EPSRC report*.

REN J., WANG J., JENKINSON I., XU D.L., YANG J.B. (2005b) - An offshore risk analysis method based on fuzzy Bayesian networks, *EPSRC report*.

SANDRI, S.; CORREA, C. (1999) - Lógica Nebulosa - *Anais da V Escola de Redes Neurais*, p.73-90. São José dos Campos.

SANTOS, W. B., DROGUETT, E. L. (2005) - *Análise Probabilística de Riscos Via Redes Bayesianas: Uma Aplicação na Construção de Poços Multilaterais*, Dissertação (Mestrado) - CTG/UFPE, M.Sc., Engenharia de Produção. Recife.

SPIEGEL, M. R. (1985) - *Estatística*, 2ª ed. - São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.

STAMATELATOS, M. et al. (2002) - *Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners*. NASA Headquarters, Washington, DC.

SWAIN, A.; GUTTMANN, H. E. (1983) - *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*. US Nuclear Regulatory Commission. Washington.

TANSCHKEIT, R. (2003) - *Lógica Fuzzy, Raciocínio Aproximado e Mecanismos de Inferência*. Pontifícia Universidade Católica - Rio de Janeiro.

WICKENS, C. D., GORDON, S. E.; LIU, Y. (1997) - *An introduction to human factors engineering*. Addison Wesley Educational Publishers Inc.

ZADEH, L. A. (1965) - Fuzzy Sets - *Inform. and Control* 8, 338-353.

ZADEH, L. A. (1978) - Fuzzy Sets As a Basis for a Theory of Possibility.- *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 1:3-28.

ZIMMERMANN, H. J. (1991) - *Fuzzy Set Theory - And Its Applications* - 2nd Edition - Kluwer Academic Publishers, Boston.