

LÓGICA NEBULOSA APLICADA À VALIDAÇÃO DE JULGAMENTOS DE VALOR OBTIDOS POR VOTAÇÃO: UM EXEMPLO DE APLICAÇÃO À ANÁLISE DE FALHAS

**Hélvio Pessanha Guimrães Santafé Jr.
Helder Gomes Costa**

Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF)
e-mail: santafe@uenf.br

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação da lógica nebulosa na análise de falhas. Mais especificamente utiliza-se uma técnica de validação de julgamentos obtidos por votação, proposta em Machado et al (1995). Esta técnica é aqui empregada para se determinar o grau de aceitação de julgamentos, obtidos através de votação por especialistas, à respeito da importância da contribuição da falha de um equipamento ao comprometimento do desempenho de um sistema produtivo.

ABSTRACT

This work presents a fuzzy logic application to failure analysis. More specifically a technique to validate judgements obtained by voting is applied, proposal in Machado et al (1995). This technique is used here to determine the degree of acceptance of judgements, obtained through voting by specialists, regarding the importance of equipment failure over a production system.

1 – INTRODUÇÃO

Os seres humanos têm a capacidade de avaliar objetos e eventos. Em diversas situações é necessária uma análise complexa dos fatores que influem nessa decisão. Dentre estas situações destacam-se aquelas à respeito da análise do risco associados a ocorrência de um evento. Santafé Jr. (1999) e Santafé Jr. et. al. (1998) tratam desta questão propondo a integração da Análise Multicritério à Análise de riscos. Mais especificamente, propõem-se a integração do Método ELECTRE III (ELeciton Et Choice Traidusànt la REalité) à Matriz de Classificação de Riscos.

Associada a Análise Risco é necessário buscar entender as causas que possam gerar falhas. No presente trabalho, apresenta-se um desdobramento dos trabalho de Santafé Jr. et. al. (1999), enfocando a Análise de Falhas, este desdobramento está fundamentado no trabalho de Machado (1995), que propõe a aplicação de vários conceitos da lógica nebulosa na análise de risco.

Dentre as aplicações da lógica nebulosa à análise de riscos propostas por Machado et. al. (op. cit.) destaca-se uma metodologia para avaliar o grau de aceitação de um conjunto nebuloso obtido a partir de uma votação estabelecida por um conjunto de especialistas.

2 - OBJETIVO

Objetivando destacar a importância desta metodologia, além de facilitar a sua utilização, no presente trabalho apresenta-se uma simulação da aplicação da metodologia proposta em Machado

et. al. (op. cit.) acompanhada de um roteiro para aplicação da mesma. Mais especificamente, na simulação busca-se identificar e avaliar o grau de aceitação, das opiniões fornecidas por especialistas à respeito da importância da contribuição de um equipamento, que ao falhar, pode comprometer um sistema produtivo fazendo que este não funcione adequadamente.

3 – Breve descrição da lógica nebulosa

Em diversas situações existem classes de propriedade ou critérios para os quais há uma grande dificuldade de se associar uma escala quantitativa de mensuração. Por exemplo, quando se deseja classificar elementos como pertencentes aos seguintes conjuntos: conjunto das pessoas jovens, pessoas velhas, carros caros, doenças perigosas. Estes conjuntos, dentre muitos outros, não possuem uma fronteira bem definida que permitam delimitar com certeza os elementos pertencentes aos mesmos. Em tais casos, fica muito difícil utilizar a teoria clássica onde se aplica o conceito “*crisp*” do “tudo ou nada”. Ou seja: a lógica booleana que lida com variáveis assumindo apenas dois possíveis estados: “falso”, e “verdadeiro”. Em boa parte dos casos, estas representações são suficientes. No entanto, existem situações em que desejamos trabalhar com valores que sejam intermediários.

O mundo em que vivemos não é constituído apenas por variáveis booleanas. Conforme reportado em Arbex (1994), Zadeh propõe a lógica nebulosa para tratar e representar incertezas associadas a variáveis não booleanas e situações ambíguas presentes em problemas de natureza industrial, biológica ou química, os quais não podiam ser abordados utilizando lógica computacional fundamentada na lógica booleana.

A lógica nebulosa ou difusa, objetiva fazer com que as decisões tomadas pela máquina se aproximem cada vez mais das decisões humanas de forma que a decisão de uma máquina não se resume apenas a um “sim” ou um “não”, principalmente ao se trabalhar com uma grande variedade de informações vagas e incertas, as quais, podem ser traduzidas por expressões do tipo: “a maioria,” “mais ou menos”, “talvez sim”, “talvez não”, “um pouco mais”, e outras tantas variáveis que representem as decisões humanas. Os conjuntos nebulosa constituem uma “ponte” no caminho de aproximar a lógica executada pela máquina ao raciocínio humano. Aplicando-se algumas técnicas desta lógica, pode-se medir o grau da “aceitação” da subjetividade utilizando-se algumas modelagens específicas.

A lógica nebulosa pode também utilizar variáveis lingüísticas no lugar de variáveis numéricas. Variáveis lingüísticas admitem como valores apenas expressões lingüísticas, como: “muito grande”, “pouco frio”, “mais ou menos jovem”, que são representadas por conjuntos nebulosos.

A lógica nebulosa permite representar valores de pertinência (grau de verdade) intermediários entre os valores de verdadeiro e falso da lógica tradicional, esta lógica tem a vantagem de poder ser aplicada às informações que não são totalmente verdadeiras ou falsas, podendo variar entre 0,0 (não pertinência) e 1,0 (pertinência absoluta) os valores intermediários do intervalo [0,0; 1,0] representam os graus de pertinência do objeto em relação ao conjunto nebuloso. O grau de pertinência não é probabilidade. Basicamente é uma medida da compatibilidade do objeto com o conceito representado pelo conjunto nebuloso.

A lógica difusa destaca-se na área de tomada de decisões, descrevendo valores subjetivos como: altura (alto, baixo), velocidade (rápido, lento), tamanho (grande, médio, pequeno), quantidade

(muito, razoável, pouco), idade (jovem, velho), sendo aplicada em algumas áreas mais específicas. como: análise de riscos, localização industrial, arranjo físico, análise de projetos, análise de dados, construção de sistemas especialistas, controle e otimização, reconhecimento de padrões e tantas outras. Para que essas aplicações sejam feitas é necessário se estabelecer parâmetros de pertinência.

Zimmermann (1996), define um sistema nebuloso, como uma coleção de variáveis de entrada (sendo cada, uma coleção de conjuntos), uma coleção de conjuntos para a variáveis de saída e uma coleção de regras que associam as entradas para resultar em conjuntos para a saída. É necessário ainda, que exista uma função que "defuzzifique" a saída, ou seja, que a partir dos graus de participação de cada variável baseado em uma regra, se determine o grau de participação da saída e consequentemente o valor real desta saída.

O controle de um operador humano, nesta lógica, pode ser representado como um conjunto de relações condicionais difusas que formam um conjunto de regras de decisão.⁴

Na construção de um sistema de controle nebuloso, deve-se incorporar "experiência" ou "conhecimento" especialista de um operador humano para se obter a melhor estratégia de controle. Assim sendo, as formas das regras empregadas dependem do processo a ser controlado.

4 - METODOLOGIA

A metodologia apresentada é baseada na proposta de Machado et. al. (op. cit.), que utiliza conceitos da lógica nebulosa aplicada a análise de risco.

O presente trabalho, apresenta um roteiro baseado na proposta supracitada, que será usado para auxiliar o cálculo do grau de aceitação dos resultados dos graus de pertinência, determinados por especialistas, de um conjunto nebuloso aplicado à análise de falhas. A apresentação deste roteiro consiste em:

a - Escolhe-se a variável X_i , a qual, será representada por um conjunto numérico.

b - Alguns especialistas vão analisar o sistema e farão uma votação baseada nos subconjuntos do conjunto X_i a fim de verificar o "quanto" um equipamento contribui para que o sistema não funcione bem, adota-se variáveis numéricas relacionadas às seguintes variáveis linguísticas:

- Se o equipamento tem uma *pequena contribuição* para que o sistema não tenha um bom funcionamento.
- Se o equipamento tem uma *média contribuição* para que o sistema não tenha um bom funcionamento.
- Se o equipamento tem uma *grande contribuição* para que o sistema não tenha um bom funcionamento.

c - De posse dos votos determinados pelos especialistas determina-se o grau de pertinência (μ_j) referente a cada um dos tipos de contribuição fornecidos pelos elementos do conjunto (X_i) formando-se os pares (X_i, μ_j) gerando assim um conjunto fuzzy **A**.

d – Efetua-se a normalização do conjunto fuzzy **A**, que consiste em dividir todos os graus de pertinência do conjunto pelo maior grau de pertinência deste mesmo conjunto, gerando assim o conjunto normalizado, A^n . Após se determinar este conjunto, calcula-se sua cardinalidade. Segundo Zimmerman (op. cit.), a cardinalidade de um conjunto fuzzy é determinada somando-se todos os graus de pertinência do mesmo conjunto ($\sum \mu_j$). A cardinalidade será representada por card_{μ_j} .

e - Seleção de um conjunto nebuloso, **B** (tabelado, em Machado, (op.cit.)), para comparação com o conjunto normalizado A^n . O conjunto **B** deve ter o valor da cardinalidade o mais próximo possível do valor da cardinalidade de A^n .

f– Cálculo da semelhança **S**, que é determinada da seguinte forma:

- determina-se a *interseção* da cardinalidade dos conjuntos A^n e **B**, ou seja, $(\text{card}_{\mu_j A^n} \cap \text{card}_{\mu_j B})$. Zimmermann (op. cit), afirma que para se determinar a *interseção*, compara-se os graus de pertinência entre os dois conjuntos analisados escolhendo-se o menores entre eles, para então soma-los determinando-se assim sua cardinalidade,

- determina-se a *união* da cardinalidade dos conjuntos A^n e **B**, ou seja, $(\text{card}_{\mu_j A^n} \cup \text{card}_{\mu_j B})$. De acordo com o autor supracitado, para se determinar a *união*, compara-se os graus de pertinência entre os dois conjuntos escolhendo-se os maiores entre eles para então soma-los determinando-se assim sua cardinalidade,

- divide-se a $(\text{card}_{\mu_j A^n} \cap \text{card}_{\mu_j B})$ por $(\text{card}_{\mu_j A^n} \cup \text{card}_{\mu_j B})$, determinando-se a semelhança **S** entre os conjuntos.

g - Adota-se um *filtro rígido*, **F**, que é um conjunto nebuloso utilizado para se dar uma importância razoável aos resultados, afim de se ter alguma confiança nos mesmos. Este conjunto que representa o filtro rígido pode ser o mesmo conjunto **B**, já determinado no item **e**.

h - Calcula-se a aceitação do resultado, a_A^n , da seguinte forma:

- calcula-se a cardinalidade dos graus de pertinência da interseção de $A^n \cap F$, representada por $\text{card}(\mu_{j A^n} \cap \mu_{j F})$,

- divide-se $\text{card}(\mu_{j A^n} \cap \mu_{j F})$, pela card_{A^n} , determinando-se assim a aceitação do resultado.

i - A não aceitação do resultado, i_A^n , é determinada do seguinte modo:

- calcula-se do complementar do conjunto **F**, denotado neste trabalho por $\complement F$, e a cardinalidade do mesmo, que é representado por $\text{card}_{\mu_j \complement F}$.

- Divide-se $\text{card}(\mu_{j A^n} \cap \mu_{j \complement F})$ por card_{A^n} , determinando-se deste modo a não aceitação do resultado.

j - Finalmente, calcula-se o grau de aceitação, ga_A^n , efetuando-se a subtração da aceitação do resultado pela não aceitação do resultado, ou seja, $ga_A^n = a_A^n - i_A^n$.

Após a apresentação do roteiro acima, a descrição das etapas do mesmo são apresentadas a seguir:

Zadeh considera que um grau de aceitação $ga_A^n < 0,6$ é insatisfatório devendo o resultado ser desconsiderado, levando os especialistas a reavaliarem o problema e os graus de pertinência μ_j adotados.

A seguir, demonstra-se um exemplo de aplicação da metodologia descrita acima onde os dados de entrada foram arbitrados, portanto, sem nenhum compromisso com uma aplicação real.

5 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DESCRITA.

Este exemplo de aplicação funciona como ilustração demonstrativa da metodologia.

a - Supondo que a variável X_i = contribuição de quanto uma bomba hidráulica centrífuga, com mau funcionamento pode influir para que um determinado sistema não execute bem sua função. Ele é representado na forma abaixo descrita:

Determinação do conjunto $X_i = \{0, 2, 4, 6, 8, 10\}$.

b – Determinação de escalas numéricas associadas às variáveis lingüísticas, onde existiu uma votação de 25 especialistas. As escalas são subconjuntos de X_i e estão demonstradas abaixo:

$\{0 \text{ e } 2\}$ se for esta a votação; a bomba tem uma pequena contribuição para que o sistema não tenha um bom funcionamento.

$\{4 \text{ e } 6\}$ se for esta a votação; a bomba tem uma média contribuição para que o sistema não tenha um bom funcionamento.

$\{8 \text{ e } 10\}$ se for esta a votação; a bomba tem uma grande contribuição para que o sistema não tenha um bom funcionamento.

c – Determinação dos graus de pertinência μ_j e do conjunto fuzzy **A**. Os graus de pertinência são escolhidos de forma subjetiva e determinados pelos especialistas. A votação dos 25 especialistas na escala pré estabelecida no item anterior gerou a seguinte tabela:

	Pequena contribuição		Média contribuição		Grande contribuição	
X_i	0	2	4	6	8	10
Quantidade de votos	3	4	6	5	4	3
μ_j	0,10	0,15	0,25	0,20	0,15	0,10

Tabela 1: Determinação dos pares $(X_i; \mu_j)$ do conjunto fuzzy baseado na distribuição de votos dos especialistas

Assim sendo, o conjunto fuzzy **A** será representado pelos pares (X_i, μ_j) e será denotado da seguinte forma:

$$A = \{(0, 0,10); (2, 0,15); (4, 0,25); (6, 0,20); (8, 0,15); (10, 0,10)\}$$

d – Normalização do conjunto fuzzy **A**. O maior grau de pertinência do conjunto fuzzy **A** é o 0,25. Deste modo, divide-se todos os demais graus de pertinência de **A** pelo 0,24 obtendo-se o conjunto normalizado **Aⁿ**. Logo após, calcula-se a cardinalidade deste novo conjunto:

$$\mathbf{A}^n = \left\{ (0, 0,40); (2, 0,60); (4, 1,0); (6, 0,80); (8, 0,60), (10, 0,40) \right\}$$

Calculando a cardinalidade(**cr**) do conjunto **Aⁿ** :

$$\mathbf{card}_{\mathbf{A}^n} = \sum \mu_j = 0,40 + 0,60 + 1,0 + 0,80 + 0,60 + 0,40 = 3,80$$

e – Seleção de um conjunto nebuloso. Dentre os conjuntos nebulosos tabelados, foi escolhido um que tenha o valor da cardinalidade a mais próxima possível ao valor da cardinalidade do conjunto **Aⁿ**, que será denotado por **B** e terá a seguinte representação.

$$\mathbf{B} = \left\{ (0, 0,25); (2, 0,5), (4, 0,75); (6, 1,0); (8, 0,75); (10, 0,5) \right\}$$

$$\mathbf{card}_{\mathbf{B}} = \sum \mu_j = 0,25 + 0,5 + 0,75 + 1,0 + 0,75 + 0,5 = 3,75$$

f – Determinação da semelhança (**S**) entre **Aⁿ** e **B**. Segundo Machado, M., A , S. (et. al op. cit.), para se determinar a semelhança entre dois conjuntos fuzzy, deve-se antes explicitar a união dos graus de pertinência dos conjuntos fuzzy $\mu_{jA^n} \cup \mu_{jB}$ e da interseção $\mu_{jA^n} \cap \mu_{jB}$ dos mesmos os quais serão representados na tabela abaixo.

Xi Graus. de pertinência	0	2	4	6	8	10
μ_{jA^n}	0,40	0,60	1,0	0,8	0,60	0,40
μ_{jB}	0,25	0,50	0,75	1,0	0,75	0,50
$\mu_{jA^n} \cap \mu_{jB}$	0,25	0,50	0,75	0,8	0,60	0,40
$\mu_{jA^n} \cup \mu_{jB}$	0,40	0,60	1,0	1,0	0,75	0,50

Tabela 2: Determinação da união e da interseção entre os graus de pertinência de **Aⁿ** e de **B**

Após esta etapa calcula-se a cardinalidade de ambos e efetua-se a semelhança **S**.

$$\mathbf{card}(\mu_{jA^n} \cap \mu_{jB}) = \sum (\mu_{jA^n} \cap \mu_{jB}) = 0,25 + 0,50 + 0,75 + 0,8 + 0,60 + 0,40 = 2,7$$

$$\mathbf{card}(\mu_{jA^n} \cup \mu_{jB}) = \sum (\mu_{jA^n} \cup \mu_{jB}) = 0,40 + 0,60 + 1,0 + 1,0 + 0,75 + 0,50 = 4,25$$

$$S = \frac{|\sum (\mu_{jA^n} \cap \mu_{jB})|}{|\sum (\mu_{jA^n} \cup \mu_{jB})|} = \frac{2,7}{4,25} = 0,635$$

g - Adota-se um filtro rígido **F**, no caso utiliza-se o próprio conjunto **B** já definido. Sendo assim, **B** = **F**. Este filtro é utilizado afim de se ter uma maior confiança no resultado final do grau de aceitação.

O filtro adotado será:

$$F = \{(0, 0,25); (2, 0,5), (4, 0,75); (6, 1,0); (8, 0,75); (10, 0,5).\}$$

De posse da definição do filtro utiliza-se a tabela abaixo que fornecerá dados que serão úteis na resolução do cálculo da não aceitação do resultado .

Xi Graus. de pertinência	0	2	4	6	8	10
$\mu_{j A^n}$	0,40	0,60	1,0	0,8	0,6	0,40
$\mu_{j F}$	0,25	0,50	0,75	1,0	0,75	0,50
$\mu_{j A^n} \cap \mu_{j F}$	0,25	0,50	0,75	0,80	0,60	0,40
$\phi \mu_{j F}$	0,75	0,5	0,25	0	0,25	0,50
$\mu_{j A^n} \cap \phi \mu_{j F}$	0,40	0,50	0,25	0	0,25	0,40

Tabela 3: Determinação da interseção entre os graus de pertinência de **Aⁿ**, de **F** e do complementar de **F**.

h – Para calcular a aceitação do resultado **a_{Aⁿ}** será necessário primeiramente determinar a cardinalidade de $\mu_{j A^n} \cap \mu_{j F}$.

$$\text{card}(\mu_{j A^n} \cap \mu_{j F}) = \sum(\mu_{j A^n} \cap \mu_{j F}) = 0,25 + 0,50 + 0,75 + 0,80 + 0,60 + 0,40 = 3,3$$

$$\text{card}_{A^n} = \sum \mu_{j A^n} = 0,40 + 0,60 + 1,0 + 0,8 + 0,6 + 0,40 = 3,80$$

$$a_{A^n} = \frac{|\text{card}(\mu_{j A^n} \cap \mu_{j F})|}{|\text{card} \mu_{j A^n}|} = \frac{3,30}{3,80} = 0,87$$

i - No cálculo da não aceitação do resultado **i_{Aⁿ}**, calcula-se primeiramente a cardinalidade de $\mu_{j A^n} \cap \phi \mu_{j F}$:

$$\text{card}(\mu_{j A^n} \cap \phi \mu_{j F}) = \sum(\mu_{j A^n} \cap \phi \mu_{j F}) = 0,40 + 0,50 + 0,25 + 0 + 0,25 + 0,40 = 1,80$$

$$i_{A^n} = \frac{|\text{card}(\mu_{j A^n} \cap \phi \mu_{j F})|}{|\text{card} \mu_{j A^n}|} = \frac{1,80}{3,80} = 0,47$$

j – Finalmente calcula-se o grau de aceitação do problema, no qual se considera se os graus de pertinência foram bem especificados pelos especialistas. Segundo Machado (op. cit), Zadeh afirma para que as informações representadas pelos conjuntos nebulosos sejam aceitas, deve-se estabelecer um critério de aceitação tal que o grau de aceitação mínimo seja arbitrado em 0,60.

O grau de aceitação ga_A^n , que será calculado efetuando-se a subtração da aceitação do resultado com a não aceitação do resultado.

$$ga_A^n = a_A^n - i_A^n$$

$ga_A^n = 0,87 - 0,47 = 0,40$, resultado não aceitável pois, $ga_A^n < 0,60$ que é o mínimo aceitável. Assim sendo os especialistas devem rever os graus de pertinência arbitrados para o problema apresentado.

6 - CONCLUSÕES

A grande vantagem da lógica fuzzy sobre a clássica é que esta permite representar valores de pertinência (grau de verdade) intermediários entre os valores de verdadeiro e falso da lógica clássica. Estimulados pelo desenvolvimento e pelas enormes possibilidades práticas de aplicações que se apresentaram os estudos sobre sistemas fuzzy, foi criada em 1984 a Sociedade Internacional de Sistemas Fuzzy, constituída principalmente, por pesquisadores dos países mais avançados tecnologicamente. A propósito disto, apenas a título de ilustração, mais de 30% dos artigos sobre fuzzy publicados até 1998 são de origem japonesa.

Existem várias aplicações para lógica fuzzy, destacando-se por exemplo: análise de riscos, localização industrial, arranjo físico, controladores fuzzy de plantas nucleares e refinarias, processos biológicos e químicos, trocadores de calor, máquinas diesel, tratamento de água, operação automática de trens e muitas outras

O trabalho apresentado é mais um exemplo de aplicação, no qual os dados de entrada do conjunto nebuloso foram arbitrados.

No futuro no entanto este problema pode ser estendido para o cenário industrial real, desde que existam especialistas que conheçam um processo produtivo em partes e como um todo e que sejam capazes de expressarem opiniões abalizadas sobre um problema similar ao apresentado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arbex, Roberto Taiar. - Controle Fuzzy Circuito e aplicações - Revista Instec, junho/94, pg. 18-22

Machado, Maria Augusta Soares; Braga, Mário Jorge Ferreira; Barreto, Jorge Muniz - Conceitos da Matemática Nebulosa na Análise de Riscos - 1995, 95 pg, Editora Artes e Rabiscos Comunicação empresarial Ltda.

Zimmermann, Hans Jurgen – Fuzzy Set Theory And Its Applications – 1996, 429 pg – Editora, Kluwer Academic Publishers – Boston/Dordrecht/London.

AGRADECIMENTOS

Os autores registram o apoio da UENF, da UFF, do CNPq e da FAPERJ.