

Usando Lógica Fuzzy para Determinar o Índice de Gravidade de Acidente Ferroviário

Renata Cristina do Carmo

MRS Logística

Giovanni Melo Carvalho Viglioni

MRS Logística / Instituto Metodista Granbery

RESUMO

Em uma companhia com grandes volumes transportados, qualquer acidente ferroviário pode acarretar consequências nos resultados. Não é coerente que, ao se avaliar acidentes, se compare somente a quantidade de acidentes ocorridos num período de tempo, desconsiderando o impacto que cada um trouxe para a companhia. Deve-se avaliar os parâmetros envolvidos, pois qualquer acidente, dependendo da complexidade, pode ser negativo para os resultados. Torna-se necessário definir uma taxa de gravidade para acidentes, baseada nos principais parâmetros que têm impacto nos resultados para que se possa comparar os acidentes ferroviários. Definidos os parâmetros será utilizada a lógica fuzzy para determinar um Índice de Gravidade de Acidentes Ferroviários (IGAF) que tornará possível identificar as áreas mais críticas onde melhorias devem ser efetuadas para evitar novas ocorrências. Um método heurístico *fuzzy* será apresentado para apurar o IGAF. O objetivo é aumentar a segurança em todas as áreas da ferrovia e reduzir o número ocorrências.

Palavras-chave: Acidentes ferroviários, Índice de Acidentes, Segurança, Lógica-Fuzzy

ABSTRACT

In a company with large volume transported, any type of railroads accident can cause major consequences in the company's results. Thus, it is not coherent when evaluating accidents, to compare only the number of accidents in a period of time, disregarding the impact that each accident has brought to the company. All parameters involved must be evaluated, because any kind of accident, depending on its complexity, can be very detrimental to the results of a railroad. It becomes necessary, then, to set a rate of gravity for each accident, based on the main parameters that have impact on results of railroads, so it will be possible to compare rail accidents. Once defined the parameters that will be considered, the technology of fuzzy logic will be used to determine a gravity index that will make it possible to identify the most critical areas where improvements must be made to prevent recurrence of accidents. Thus, a fuzzy heuristic method will be presented to establish the Gravity Index (IGAF), seeking a better view of the problem in order to enable the actions to reduce accidents.

Keywords: Accidents, Gravity Index, Safety, Fuzzy Logic

1. INTRODUÇÃO

A MRS Logística S. A., empresa ferroviária brasileira, iniciou suas operações em primeiro de dezembro de 1996, assumindo a chamada Malha Sudeste da Rede Ferroviária Federal S. A. (RFFSA), por intermédio da privatização da mesma em um modelo que consistia na transferência dos serviços de transporte ferroviário de cargas e no arrendamento dos bens operacionais para o setor privado.

Desde o seu surgimento a MRS Logística vem apresentando um crescimento considerável nos volumes transportados, conforme pode ser visto na Figura 1. Este crescimento implica numa ocupação cada vez maior da malha ferroviária e faz com que a empresa busque a otimização dos recursos, como via permanente, vagões e locomotivas. Em cenários como este, com fluxo de transporte crescente e alta ocupação da malha, a ocorrência de acidentes ferroviários

acarreta cada vez mais impacto nos resultados das ferrovias.

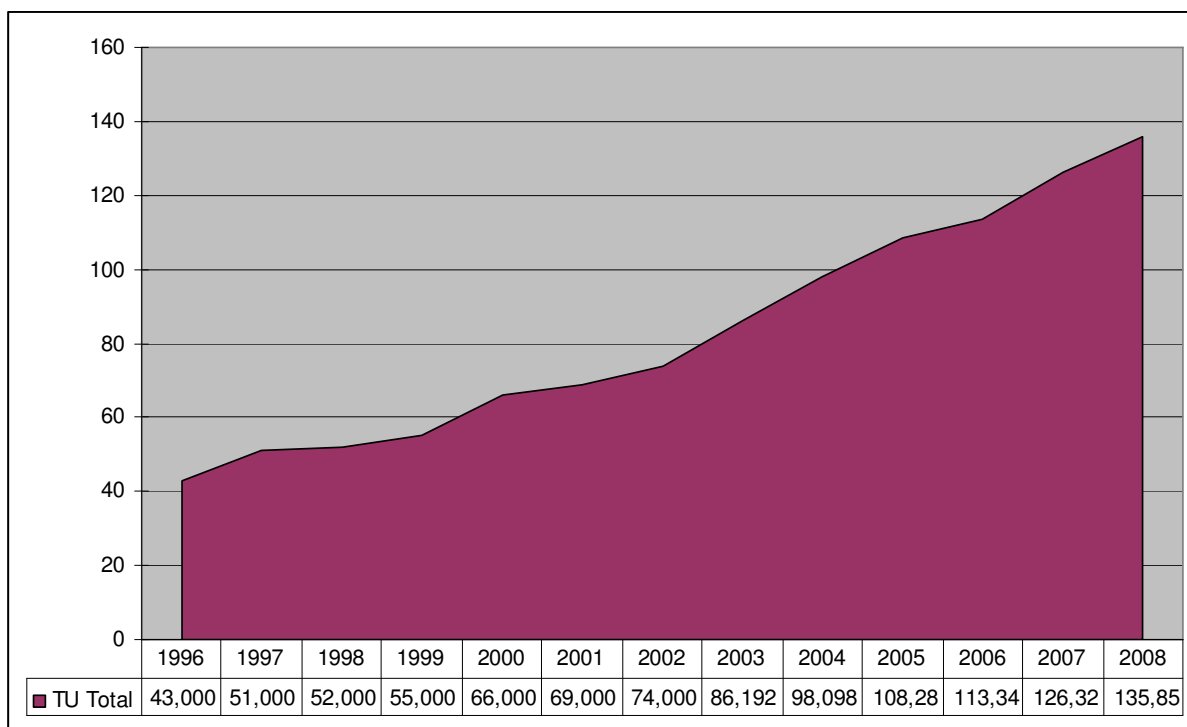


Figura 1: Produção Anual em Milhões de Toneladas Útil da MRS Logística

ANTT (2006), acidente ferroviário é toda ocorrência que, com a participação direta de veículo ferroviário, provocar danos a este, a pessoas, a outros veículos, a instalações, a obras-de-arte, à via permanente, ao meio ambiente e, desde que ocorra paralisação do tráfego, a animais.

Os acidentes ferroviários podem ser classificados como abalroamentos, atropelamentos, choques, encontros e esbarros de trens. Contudo, em uma companhia com grandes volumes transportados, qualquer tipo de acidente ferroviário pode acarretar impactos nos resultados. Desta forma, não é coerente que, ao avaliar acidentes, se compare o número total de acidentes, desconsiderando assim o impacto que cada um deles trouxe para a companhia.

Torna-se necessário então, definir uma taxa de gravidade para cada acidente, baseado nos principais parâmetros que têm impacto nos resultados da companhia, para que se possa comparar os acidentes ferroviários. Definidos os parâmetros que serão considerados, será utilizada a tecnologia da lógica fuzzy para determinar um Índice de Gravidade que tornará possível identificar as áreas mais críticas onde melhorias devem ser efetuadas para evitar novas ocorrências.

Neste trabalho, um método heurístico fuzzy será apresentado para apurar o Índice de Gravidade de Acidentes Ferroviários, uma vez que a sua arquitetura hierárquica condensa os valores encontrados em cada parâmetro, combinando todos os resultados em blocos de inferência que utilizam bases de regras fuzzy, para que o índice possa ser expresso por meio de uma nota, ou seja, o Índice de Gravidade de Acidente Ferroviário - IGAF, em uma escala entre 0 e 1. Em resumo, o IGAF é a nota apurada para o acidente ferroviário em estudo,

tornando mais simples a comparação da gravidade do acidente e por consequência o impacto nos resultados da empresa.

Portanto, o IGAF, baseado em parâmetros quantitativos e qualitativos, que serão estudados em uma revisão bibliográfica avaliados, segundo as regras fuzzy, buscando uma melhor visualização do problema de forma a permitir que as ações para redução de acidentes possam ser direcionadas para as causas que trazem acidentes de maior impacto para a companhia. A fim de manter o nível de acidentes em um número aceitável, a prevenção de acidentes precisa passar de um modo reativo para um modelo pró-ativo, com atuações pontuais buscando o gerenciamento correto das fontes de risco. O propósito desta definição é promover a segurança em todas as áreas da ferrovia e reduzir o número de acidentes e incidentes e, consequentemente, uma redução de custos.

2. TIPOS DE ACIDENTES

De acordo com o N-DSE.001 - Terminologia e Classificação – RFFSA, acidente ferroviário é toda ocorrência que, com a participação direta do trem ou veículo ferroviário, provoque danos à pessoas, ao veículo, às instalações fixas e / ou animal. Segundo a Resolução nº 1431 da ANTT, de 26 de abril de 2.006, os acidentes podem ser classificados:

I – Quanto à natureza: atropelamento, colisão, abalroamento, explosão, incêndio e descarrilamento (sem tombamento ou com tombamento total ou parcial);

II – Quanto à causa: falha humana, via-permanente, material rodante, sistemas de telecomunicações, sinalização e energia, atos de vandalismo e casos fortuitos ou de força maior.

Considerando a classificação segundo a natureza, os acidentes podem ser definidos como (N-DSE.001 - Terminologia e Classificação – RFFSA):

- Atropelamento: acidente que ocorre quando um trem ou veículo ferroviário colide com pessoas e/ou animal, provocando lesão ou morte;
- Colisão: acidente ferroviário resultante do impacto indevido de veículo ferroviário contra um obstáculo à sua livre circulação;
- Abalroamento: colisão de veículo ferroviário ou trem, circulando ou manobrando, com qualquer obstáculo, exceto outro veículo ferroviário;
- Explosão: acidente ferroviário ocorrido por explosão, em trem ou veículo ferroviário;
- Incêndio: acidente ferroviário ocorrido por incêndio, em trem ou veículo ferroviário;
- Descarrilamento: acidente em que uma ou mais rodas do veículo ferroviário saltam do boleto do trilho.

Entretanto, o tipo de acidente “colisão” ainda pode ser dividido em: choque, encontro ou esbarro de trem, que de acordo com o N-DSE.001 - Terminologia e Classificação – RFFSA, podem ser definidos como:

- Esbarro de trens: colisão de veículos ferroviários ou trens circulando ou manobrando

- em vias distintas, podendo um deles estar parado;
- Encontro de trens: colisão de veículos ferroviários ou trens circulando em sentidos opostos na mesma via, podendo um deles estar parado;
- Choque de trens: colisão de veículos ferroviários ou trens circulando no mesmo sentido, na mesma via, podendo um deles estar parado.

3. LÓGICA FUZZY

A lógica fuzzy (também conhecida como nebulosa ou difusa) representa um esquema de traduzir informações vagas, imprecisas em valores numéricos, Barron (1993). Possibilita a inclusão da experiência humana em controle computadorizado, tornando possíveis decisões em problemas complexos. O sucesso mundial de sistemas de modelagem e controle em lógica fuzzy aplicados na indústria o recomenda como uma ferramenta eficiente na engenharia de controle industrial, manufatura, comunicações homem-máquina e sistemas de tomada de decisão, Aguiar e Oliveira (1999).

Criada por L. A. Zadeh em 1965 e segundo Mendel (1995) tem como objetivo modelar o modo aproximado de raciocínio, permitindo o desenvolvimento de sistemas que imitem a habilidade humana de tomar decisões racionais em um ambiente de incerteza e imprecisão. Deste modo, a lógica fuzzy é uma ferramenta capaz de capturar informações imprecisas, em linguagem natural, e convertê-las em uma forma numérica.

Um sistema fuzzy é composto por quatro módulos, conforme a Figura 2.

Na Lógica Fuzzy, existe a possibilidade de um elemento pertencer a mais de um conjunto, e em graus diversos, diferentemente dos conjuntos tradicionais. A pertinência de um elemento em um conjunto fuzzy não é uma questão de afirmação ou negação, mas uma questão de grau, Klir e Yuan (1995). Este grau representa um nível de compatibilidade do elemento sobre o conjunto, na qual o valor zero significa não participação, o valor um significa participação plena e demais valores entre zero e um significam participação parcial.

Os graus de pertinência são obtidos através de funções denominadas *funções de pertinência*, que podem ser representadas por formas geométricas diversas. As principais são: triangular, trapezoidal e gaussiana. O formato da função de pertinência é inerente à relação dos dados com o que eles representam. Os responsáveis por modelá-las devem escolher uma representação que se aproxima melhor do comportamento das variáveis linguísticas relacionadas, segundo Cox (1994).

Outro tópico importante na Lógica Fuzzy está na definição de variável linguística. “Uma variável linguística é uma variável cujos valores são palavras ou sentenças na forma de linguagens naturais”, Silva (2001). Ela é usada para representar a semântica de seus conjuntos. Por exemplo: velocidade, temperatura, peso, altura, aceleração, beleza, satisfação.

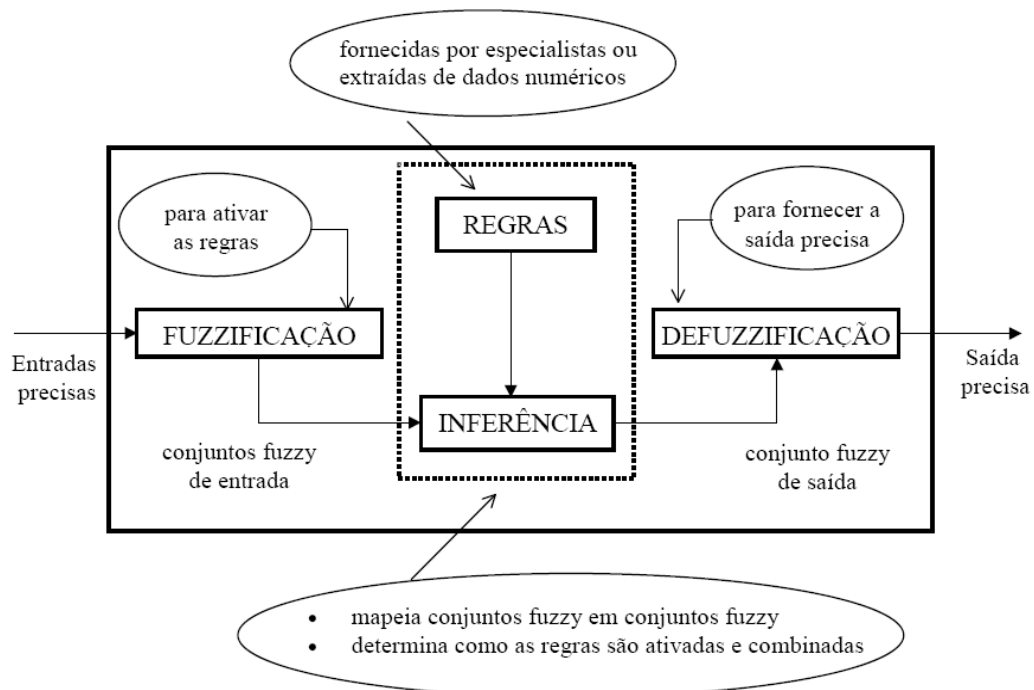


Figura 2: Sistema Fuzzy

As variáveis linguísticas são compostas por termos linguísticos – que representam conjuntos fuzzy. Por exemplo, a variável linguística temperatura pode ser composta pelos termos linguísticos: “muito quente”, “quente”, “morno”, “frio” e “muito frio”. O termo linguístico “quente”, por exemplo, comporta elementos cujo grau de pertinência está associado a esta semântica.

Uma aplicação da lógica fuzzy é a construção de sistemas fuzzy, que são sistemas especialistas compostos de entrada e saída de dados numéricos, método de fuzzificação, regras fuzzy, inferência fuzzy e método de defuzzificação, Silva (2001) e Kasabov (1998). Na Figura 2 são mostrados estes componentes.

As entradas são valores numéricos que serão traduzidos em termos linguísticos para serem usados no processo de inferência. A saída é um resultado numérico originado da inferência das regras sobre as entradas.

Regras fuzzy representam habilidades e conhecimento especialista, Kasabov (1998). Elas são expressas em sentenças SE-ENTÃO e são utilizadas na inferência para mapear o conjunto de entradas fuzzy para um conjunto de saídas fuzzy, Mendel (1995). Essas regras podem ser combinadas entre si através de conectivos lógicos como AND e OR.

O mecanismo de inferência define a maneira de como as regras são combinadas, provendo uma base para tomada de decisões, Mendel (1995). Existem muitos procedimentos inferenciais na lógica fuzzy, porém os mais utilizados são o Mamdani e o Takagi-Sugeno-Kang, Mendel (2001).

Fuzzificação é um mapeamento do domínio de números reais – discretos, em geral – para o domínio fuzzy. Este processo atribui valores linguísticos, definidos por funções de pertinência, às variáveis de entrada, Shaw e Simões (1999).

Defuzzificação é um método utilizado para decodificar as variáveis linguísticas de saída inferidas pelas regras fuzzy para valores reais – geralmente discretos. Os principais métodos de defuzzificação são o Centro-da-Área, o Centro-do-Máximo a Média-do-Máximo e a Média-Ponderada, Shaw e Simões (1999).

A lógica fuzzy permite obter maior generalidade, maior poder de expressão, habilidade de modelar problemas complexos, modelar o conhecimento de sistemas especialistas, manipular incertezas e reduzir complexidades de problemas, Klir e Yuan (1995) e Cox (1994). Devido às suas propriedades, a lógica fuzzy tem sido utilizada em áreas como: Sistemas Especialistas, Computação com Palavras, Raciocínio Aproximado, Linguagem Natural, Controle de Processos, Robótica, Modelagem de Sistemas Parcialmente Abertos, Reconhecimento de Padrões, Processos de Tomada de Decisão (*Decision Making*), entre outras.

3.1. Parâmetros

Para se avaliar acidentes ferroviários não é coerente que se compare somente a quantidade de acidentes ocorridos em um determinado período de tempo. Deve-se avaliar todos os parâmetros envolvidos, pois qualquer tipo de acidente, dependendo de sua complexidade, pode acarretar grandes impactos nos resultados de uma companhia ferroviária. A Figura 3 representa a estrutura do IGAF.

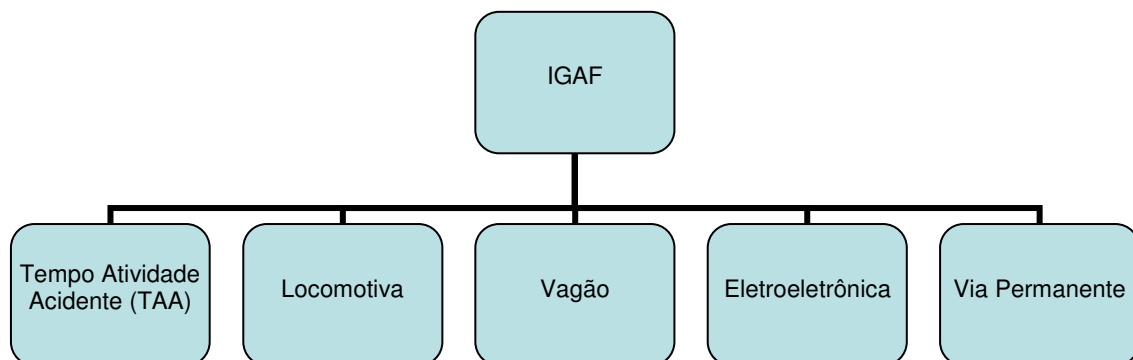


Figura 3: Estrutura do Índice de Gravidade de Acidente Ferroviário

Este impacto pode ser avaliado considerando-se diversos parâmetros, como os definidos a seguir.

I. Tempo de Atividade de Acidente (TAA)

Após a ocorrência de um acidente ferroviário a circulação normal de todas as composições que circulam pela malha pode ser prejudicada, ou seja, em função do acidente várias composições, e não necessariamente somente aquelas próximas ao local do acidente podem ser obrigadas a parar e só seguir o seu destino assim que o acidente esteja solucionado e o fluxo restabelecido. Este é o TAA, Tempo de Atividade de Acidente, tempo que todos os trens que circulam pela malha ficaram parados aguardando a liberação do movimento em função da ocorrência de um acidente ferroviário.

II. Custo de Recuperação

Acidentes (e incidentes) geram custos. Após um acidente ferroviário a companhia tem que dispor da quantia necessária à recuperação das condições iniciais dos ativos envolvidos. Assim, um acidente pode acarretar custos inerentes à recuperação da Via Permanente, da Eletroeletrônica, das locomotivas e vagões envolvidos. Quanto maior o custo para a reparação, maior o impacto deste acidente nos resultados da companhia.

4. MODELO PROPOSTO

Foi designado pela MRS Logística um grupo de especialista em transporte ferroviário e acidentes com a finalidade de definir os parâmetros de entrada do sistema, que na Lógica Fuzzy são chamados de variáveis linguísticas.

Na primeira etapa do projeto, os especialistas, definiram para cada parâmetro um conjunto de critérios com respectivos pesos, de modo que, o somatório de todos os pesos para todos critérios em todos os parâmetros apurasse 100. Este valor é o maior possível de ser encontrado no processo e representa o acidente de maior gravidade.

As definições dos termos linguísticos para cada variável linguística foram obtidas a partir do grupo de especialistas, que transformaram cada parâmetro em uma variável linguística, porém, os valores numéricos limites associados a estes termos foram obtidos por meio de informações dos analistas ferroviários e ajustes posteriores.

Diante destas informações, foi possível modelar a estrutura do sistema fuzzy.

Foram definidas cinco variáveis de entrada (tempo de atividade de acidente, locomotiva, vagão, eletroeletrônica, via-permanente) e uma de saída (índice de gravidade de acidente ferroviário - IGAF). Estas variáveis e seus termos linguísticos são definidos a seguir.

Tempo de Atividade de Acidente (TAA) - Tempo que todos os trens que circulam pela malha ficaram parados aguardando a liberação do movimento em função da ocorrência de um acidente ferroviário. Ela é composta dos termos: baixo, médio e alto, conforme Figura 4.

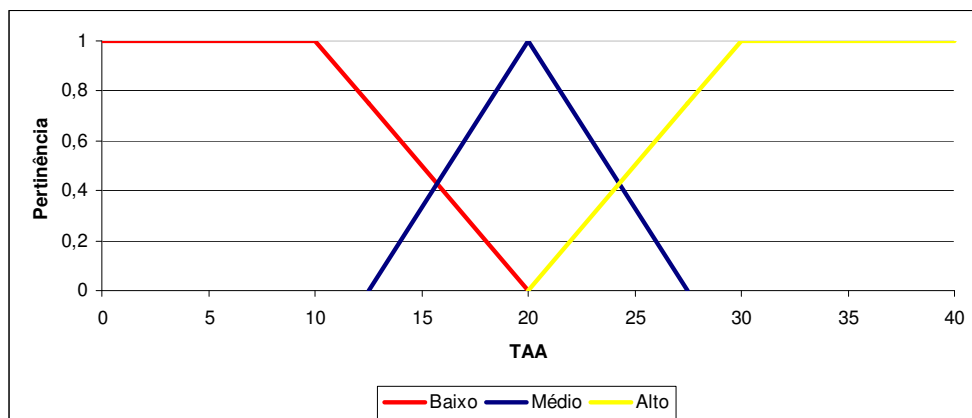


Figura 4: Variável linguística TAA e seus termos

Locomotiva – custo de recuperação das locomotivas envolvidas no acidente ferroviário. Os valores estão representados em milhares de reais. Ela é composta dos termos: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, conforme Figura 5.

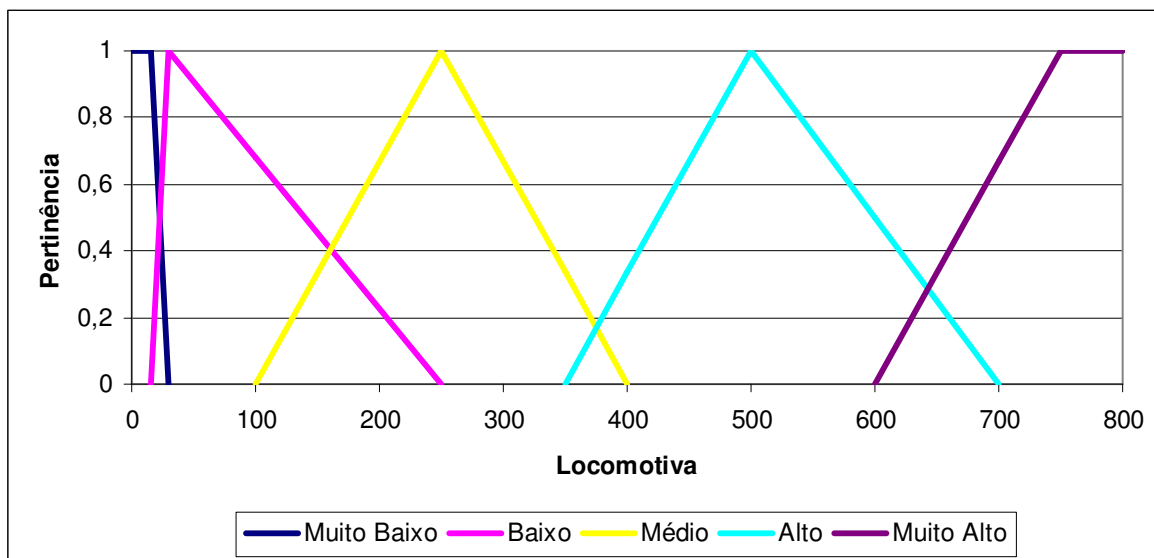


Figura 5: Variável linguística Locomotiva e seus termos

Vagão – custo de recuperação dos vagões envolvidos no acidente ferroviário. Os valores estão representados em milhares de reais. Ela é composta dos termos: baixo, médio e alto, conforme Figura 6.

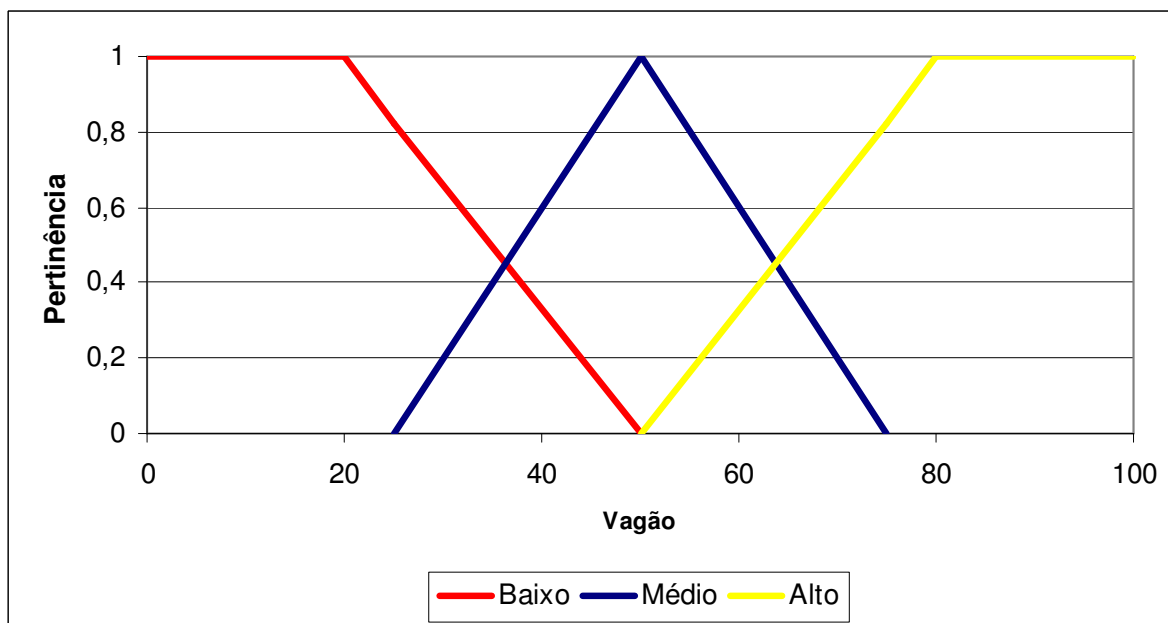


Figura 6: Variável linguística Vagão e seus termos

Eletroeletrônica – custo de recuperação dos equipamentos de eletroeletrônica que foram afetados pelo acidente ferroviário. Os valores estão representados em milhares de reais. Ela é

composta dos termos: baixo, médio, e alto, conforme Figura 7.

Via-permanente – custo de recuperação dos equipamentos e materiais referentes a via-permanente da ferrovia afetados pelo acidente ferroviário. Os valores estão representados em milhares de reais. Ela é composta dos termos: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, conforme Figura 8.

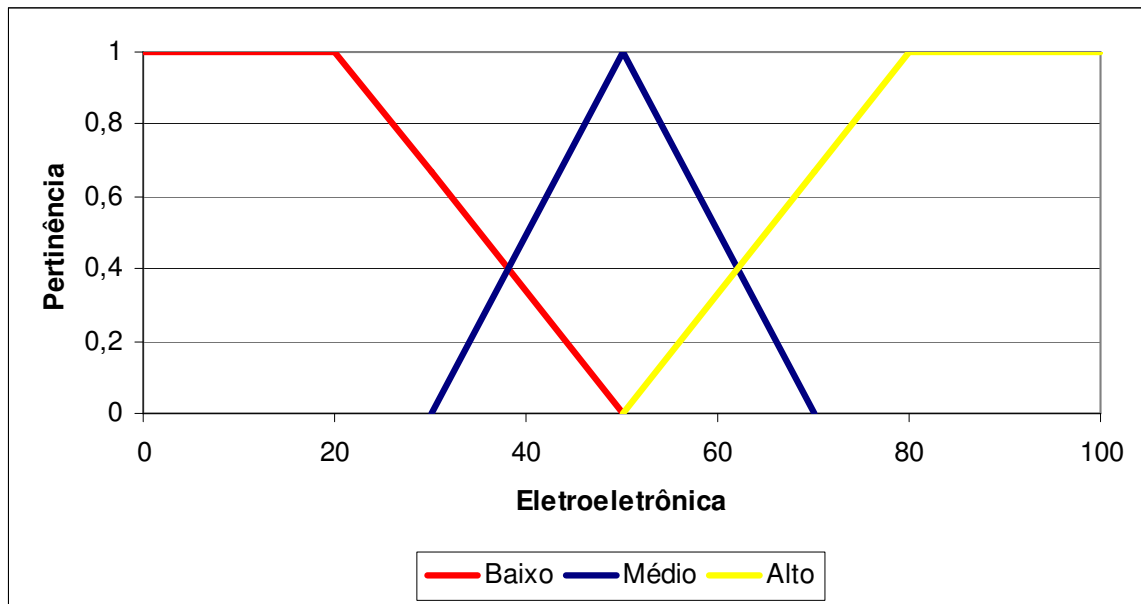


Figura 7: Variável linguística Eletroeletrônica e seus termos

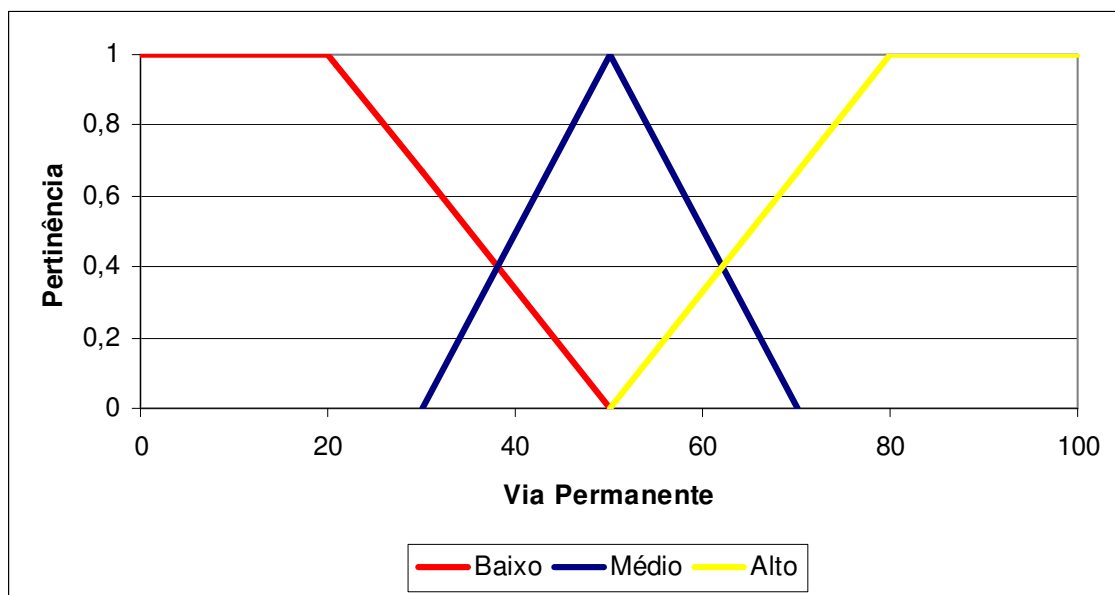


Figura 8: Variável linguística Via Permanente e seus termos

IGAF – variável que representa o índice de acidente ferroviário a ser passado para o tomador de decisão. Foram identificados cinco níveis de autorização: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto.

Com as variáveis e termos linguísticos já definidos, o próximo passo foi escolher o método de inferência adequado. O escolhido foi o de Takagi-Sugeno-Kang de ordem zero, Mendel (2001), pois as funções de pertinência de saída do modelo proposto são constantes (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto) e não são permitidas ambiguidades ou interpolações dos conjuntos fuzzy de saída, diferentemente do método de Mamdani, cujas funções de pertinência de saída são conjuntos fuzzy, Mathworks (2009). O operador de intersecção escolhido foi o *mínimo* e o de união foi o *máximo*, pois são os mais utilizados, Mendel (2001), e o método de defuzzificação escolhido foi a Média-Ponderada.

A base de regras fuzzy foi definida através do grupo de especialistas e consistiu de 48 regras. Na Figura 9 são mostradas algumas destas regras no formato utilizado pelo *Matlab*®.

1. If (TAA is Baixo) and (Locomotiva is Muito_Baixo) and (Vagao is Baixo) and (Eletroneletronica is Baixo) and (ViaPermanente is Baixo) then (IGAF is Muito_Baixo) (1)
2. If (TAA is Baixo) and (Locomotiva is Medio) and (Vagao is Baixo) and (Eletroneletronica is Baixo) and (ViaPermanente is Baixo) then (IGAF is Alto) (0.6)
3. If (TAA is Baixo) and (Locomotiva is Alto) and (Vagao is Alto) and (Eletroneletronica is Baixo) and (ViaPermanente is Baixo) then (IGAF is Alto) (0.22)
4. If (TAA is Baixo) and (Locomotiva is Medio) and (Vagao is Medio) and (Eletroneletronica is Baixo) and (ViaPermanente is Alto) then (IGAF is Alto) (0.26)
5. If (TAA is Baixo) and (Locomotiva is Muito_Baixo) and (Vagao is Baixo) and (Eletroneletronica is Alto) and (ViaPermanente is Baixo) then (IGAF is Alto) (0.5)
6. If (TAA is Alto) and (Locomotiva is Baixo) and (Vagao is Medio) and (Eletroneletronica is Alto) and (ViaPermanente is Medio) then (IGAF is Muito_Alto) (0.38)
7. If (TAA is Baixo) and (Locomotiva is Muito_Baixo) and (Vagao is Alto) and (Eletroneletronica is Baixo) and (ViaPermanente is Baixo) then (IGAF is Alto) (0.85)

Figura 9: Algumas regras Fuzzy utilizadas

O *FIS* (*Fuzzy Inference System*) do *Matlab*, Mathworks (2009), foi a ferramenta escolhida para implementação, pois ela traz vários recursos gráficos que auxiliam na construção de sistemas fuzzy. Um dos recursos é o editor *FIS*, onde são definidos a quantidade e os nomes das variáveis linguísticas, escolha do método de inferência e método de defuzzificação do sistema Figura. 10. Outras funcionalidades são o editor de funções de pertinência e editor de regras fuzzy.

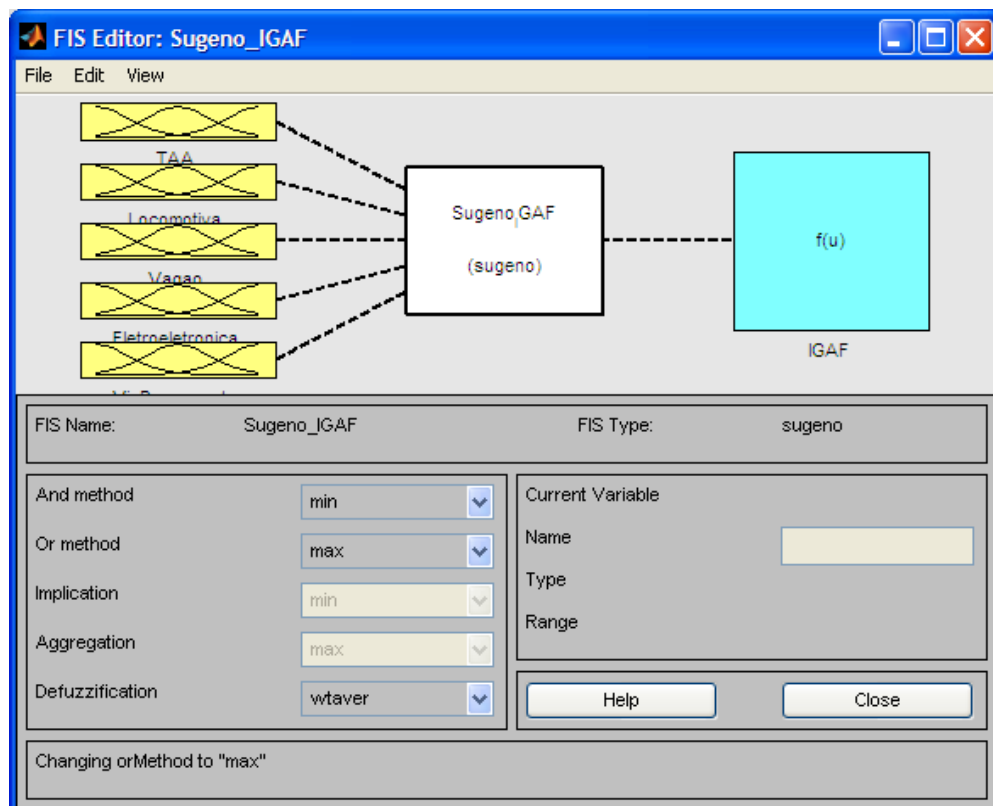


Figura. 10: Editor FIS (Matlab, 2006)

5. CONCLUSÃO

A análise dos resultados deste modelo demonstra que é viável criar ferramentas baseadas em lógica fuzzy para o auxílio à tomada de decisão na apuração do Índice de Gravidade de Acidente Ferroviário (IGAF), desde que estas ferramentas possam ser amplamente testadas e validadas. Com os testes desenvolvidos foi possível verificar quais os acidentes que trazem mais impactos para os resultados da companhia. Os resultados permitem uma melhor visualização do problema de forma que as ações para redução de acidentes poderão ser direcionadas para as causas que trazem acidentes de maior impacto. Com a utilização desta metodologia busca-se promover a segurança em todas as áreas da ferrovia e reduzir o número de acidentes e incidentes, reduzindo assim os custos relativos a estas ocorrências.

O modelo pode ser melhorado, porque apenas algumas variáveis são contempladas. Para tornar o modelo mais completo sugere-se a inclusão de novas variáveis (como por exemplo, tipo de acidente, se houve vítimas e a quantidade de veículos envolvidos) será necessária uma nova modelagem, pois as tomadas de decisão dos especialistas passam a ser diferentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTT (2006) *Resolução n.º 1431 de 26 de abril de 2006*, Estabelece procedimentos para a comunicação de acidentes ferroviários à ANTT, Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- Barron, J. J. (1993) *A Lógica Fuzzy em Foco*, Byte Nº 6, pág 94 a 100 – Junho 1993.
- Aguiar, H. e Oliveira, J.R. (1999) *Lógica Difusa – Aspectos Práticos e Aplicações*. Editora Interciência.
- Mendel, J. M. (1995) *Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial, Proceedings of the IEEE*, Vol. 83, nº 3, Março 1995, pp. 345-377.
- Klir, G. J. e Yuan, B. (1995) *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Prentice Hall. London.
- Cox, E. (1994) *The Fuzzy Systems Handbook: A practitioner's guide to building, using and maintaining fuzzy systems*. London.
- Silva, A. N. (2001) *Gerenciamento Pró-Ativo de Redes de Computadores baseado em Agentes Móveis e Lógica Fuzzy*. Universidade Federal de Pernambuco. Recife.
- Kasabov, N. K. (1998) *Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering*. Massachusetts Institute of Technology.
- Mendel, J. M. (2001) *Uncertain rule-based fuzzy logic systems: introduction and new directions*. Prentice Hall. London.
- Shaw, I. S. e Simões, M. G. (1999) *Controle e Modelagem Fuzzy*. Editora Edgard Blucher. São Paulo.
- The Mathworks Inc. (2009) *Fuzzy Logic Toolbox for use in Matlab User's Guide*.