



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

ABORDAGEM FUZZY PARA AVALIAR O INCÔMODO CAUSADO PELO RUÍDO AERONÁUTICO BASEADO NA NORMA ABNT NBR 10151.

Tarcilene Aparecida Heleno, tarcileneheleno@yahoo.com.br¹

Jules Ghislain Slama, Juleslslama@yahoo.com.br¹

¹PEM/COPPE/UFRJ, Centro de Tecnologia - Bloco G - Sala 204 - Cidade Universitária - RJ – Brasil.

Resumo: *O ruído aeronáutico está presente no cotidiano de muitas pessoas que residem nas proximidades dos aeroportos. O incômodo sonoro depende de fatores acústicos, como o nível de pressão sonora e o espectro de frequência; fatores não-acústicos, como por exemplo, as características físicas do ambiente e principalmente de fatores subjetivos, como a sensibilidade individual, o status social, entre outros. O incômodo causado pelo ruído aeronáutico é inerentemente um conceito vago, logo o incômodo sonoro pode ser representado por um sistema especialista fuzzy. Neste trabalho, a modelagem “fuzzy” permitirá atribuir um valor “crisp”, ou seja, um número real que representa a percentagem de pessoas incomodadas pelo ruído aeronáutico. A elaboração do modelo fuzzy consiste na identificação das características do sistema e na definição das variáveis de entrada e saída. A partir disso, é necessário estabelecer as regras de inferência ou regras linguísticas que expressam as características do modelo fuzzy para o incômodo, e ainda, estabelecer o método de defuzzificação para transformar as afirmações fuzzy em um único valor “crisp” obtendo assim o valor para o percentual de pessoas incomodadas. Através dos modificadores fuzzy, é possível estabelecer a relação de pessoas altamente incomodadas e estas métricas. As variáveis de entrada deste sistema fuzzy são os níveis sonoros nas métricas LAeqD e LAeqN da Norma ABNT NBR 10151 para áreas residenciais.*

Palavras chaves: Exposição sonora, ruído aeronáutico, lógica Fuzzy

1. INTRODUÇÃO

O incômodo causado pela poluição sonora é um fenômeno global, e torna-se um efeito importante quando se trata do ruído aeronáutico.

O incômodo sonoro apresenta grande subjetividade. O incômodo causado às populações expostas ao ruído ambiente não depende apenas de características acústicas do ruído (fonte de ruído, níveis sonoros associados, amplitude e frequência das flutuações do nível, espectro sonoro), mas também de fatores não-acústicos de natureza social, psicológica ou econômica. (Fields 1993). Estes fatores incluem medo da queda de aeronaves, sensibilidade individual à variadas fontes de ruído, distância do aeroporto, disposição individual de aceitar um aumento na exposição aos ruídos de aeronaves. Variáveis demográficas, como idade, sexo e situação socioeconômica, são fortemente associados a um menor incômodo. A correlação entre a exposição sonora e o incômodo é muito mais elevada a nível geral ao nível individual.

O DNL (Day Night Level) é uma média de energia sonora produzida por todos os eventos aeronáuticos ocorridos durante um período de 24 horas, com a penalidade de 10 dB durante o período noturno devido a maior sensibilidade neste período. No entanto, o uso da métrica DNL não é suficiente para avaliar o incômodo causado pelo ruído, pois este deve ser baseado nas atividades diurnas e noturnas. O efeito causado pelo ruído durante o dia ou durante a noite influi de maneira diferente na realização de atividades.

A relação entre a métrica DNL e o percentual de pessoas altamente incomodadas foi estudada pela primeira vez por Schultz. A curva média Fig. (1) é uma expressão razoável da relação entre exposição ao ruído de transportes e a resposta da comunidade.

A regulamentação do zoneamento aeroportuário em muitos países é baseada no DNL. No Brasil, por exemplo, residências são autorizadas pelo aeroporto em áreas cujo $DNL \leq 65$ dB(A). Um impacto significativo seria a exposição sonora em zonas sensíveis iguais ou superiores a 65 dB(A).

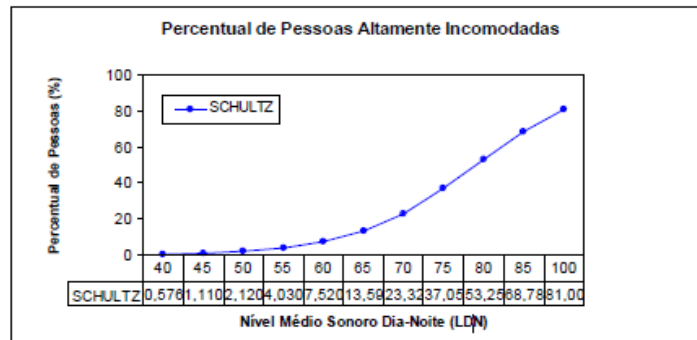


Figura 1: Relação de pessoas altamente incomodadas e a métrica DNL, proposta por Schultz em 1978.

A tabela 5 representa o percentual de pessoas altamente incomodadas de acordo com a análise de Schultz. Para o nível sonoro 65dB(A) apenas 13,59% das pessoas são consideradas como altamente incomodadas.

Tabela 1: Relação entre DNL e HAP.

DNL	HAP (%)
45	1,1102
50	2,120
55	4,030
60	7,52
65	13,59
70	23,32
75	37,05

Fonte: Schultz, 1978

Como já foi dito, o incômodo sonoro pode ser associado a variáveis objetivas e na maioria das vezes a variáveis subjetivas. Por isso este pode ser modelado através de um sistema *fuzzy*. Neste trabalho, a modelagem “*fuzzy*” permitirá atribuir o incômodo a um valor “discreto” (“*crisp*”), ou seja, um número real que representa a percentagem de pessoas altamente incomodadas pelo ruído aeronáutico.

2. MODELO FUZZY BASEADO NAS MÉTRICAS LAEQD E LAEQN

A utilização da lógica *fuzzy* neste trabalho se deve ao fato da complexidade no processo de decisão, e que seriam de difícil solução com a aplicação de técnicas matemáticas convencionais. Os modelos *fuzzy* foram desenvolvidos de acordo com os programas disponibilizados pelo *Fuzzy Logic toolbox* do MATLAB versão 7.0. O estudo para avaliar o incômodo foi feito pelo controlador tipo *Método de Mamdani*.

O modelo *fuzzy* baseado na NBR 10151/2000 a partir dos níveis critério de avaliação diurno e noturno para avaliar o percentual de pessoas altamente incomodadas. O modelo *fuzzy* é mais interessante para o ruído aeronáutico, pois há de uma diferenciação dos níveis sonoros, diurno e noturno, o que o torna de extrema importância para avaliar os efeitos adversos do ruído. A vantagem deste modelo, é que a partir de qualquer combinação de LAeqD e LAeqN desejada, é possível obter o percentual de incômodo.

2.1 DESCRIÇÃO DO MODELO FUZZY

O método baseia-se em quatro etapas: fuzzificação, inferência de regras, agregação das regras e defuzzificação. As funções de pertinências utilizadas foram as triangulares, as implicações de cada uma das regras foram calculadas pelos operadores *AND* e *THEN*, por meio da definição de um conjunto de regras de controle *fuzzy*, ou seja, um algoritmo *fuzzy*. Essas regras podem ser apresentadas como:

$$\begin{aligned} &\text{Antecedente: } x \text{ é } A' \text{ e } y \text{ é } B' \\ &\text{Regra } (R_i): \text{ Se } x \text{ é } A_i \text{ e } y \text{ é } B_i \text{ ENTÃO } z \text{ é } C_i \\ &\text{Consequente: } z \text{ é } C'_i \end{aligned}$$

Nos quais x e y são as variáveis linguísticas relacionadas ao modelo *fuzzy* e z é a variável linguística de saída. A' , A_i , B' , B_i , C_i , C'_i são conjuntos *fuzzy* de x , y e z .

No algoritmo *fuzzy* do modelo de Mandani, cada regra é uma hipótese condicional *fuzzy* e diferentes relações *fuzzy* podem ser derivadas desta. A implementação de cada regra é feita mediante a definição de operadores para o

processamento das variáveis de *input* e a função de implicação irá definir a variável *output*. A ação do controlador *fuzzy* é definida pela agregação de n regras que compõem o algoritmo *fuzzy*, mediante o uso de conectivos, como por exemplo, “SE”, “ENTÃO”. A saída é obtida por meio do processo *defuzzificação* da variável de saída através do método *centroid*.

As variáveis de entrada utilizadas no modelo *fuzzy* foram LAeqD e LAeqN e os termos lingüísticos utilizados para quantificá-las foram: “ *muito baixo*”, “*baixo*”, “*médio*”, “*alto*”, “*muito alto*”. E a variável de saída para este modelo é o *percentual de incômodo*, e os termos lingüísticos utilizados para caracterizá-la, foram: “*nulo*”, “*pequeno*”, “*moderado*”, “*forte*” e “*muito forte*” como nas Fig. (2), (3), (4) e (5).

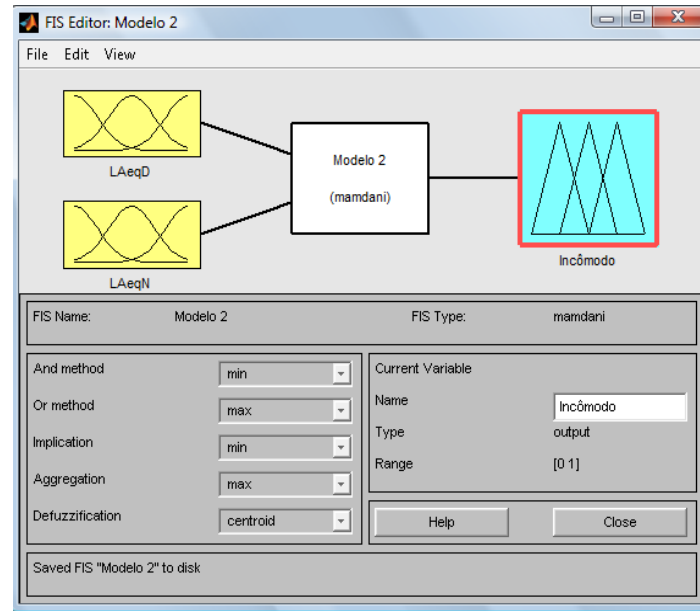


Figura 2: Variáveis de entrada (LAeqD e LAeqN) e a variável de saída (percentual de incômodo) do modelo *fuzzy* .

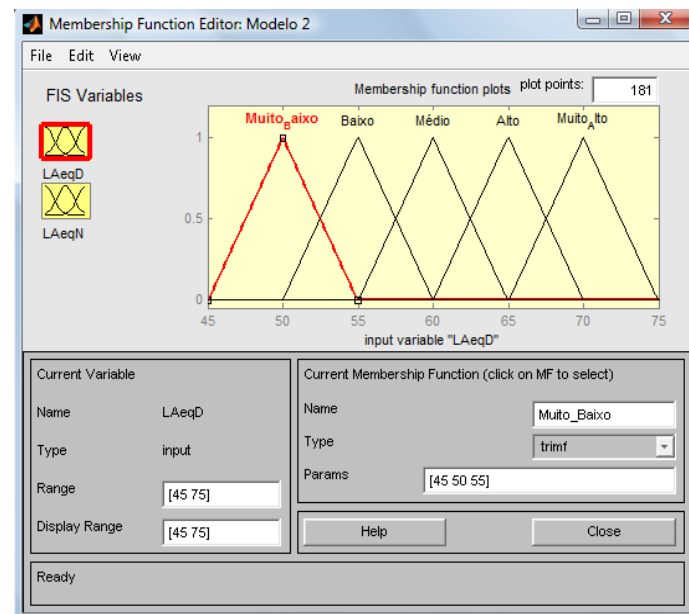


Figura 3: Representação do processo de Fuzzificação da variável LAeqD com os termos lingüísticos utilizados no modelo.

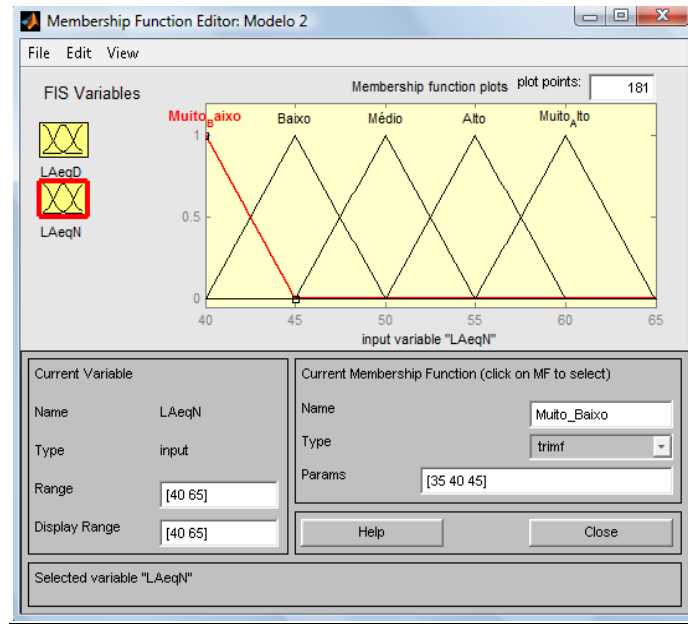


Figura4: Representação do processo de Fuzzificação da variável LAeqD com os termos linguísticos utilizados no modelo.

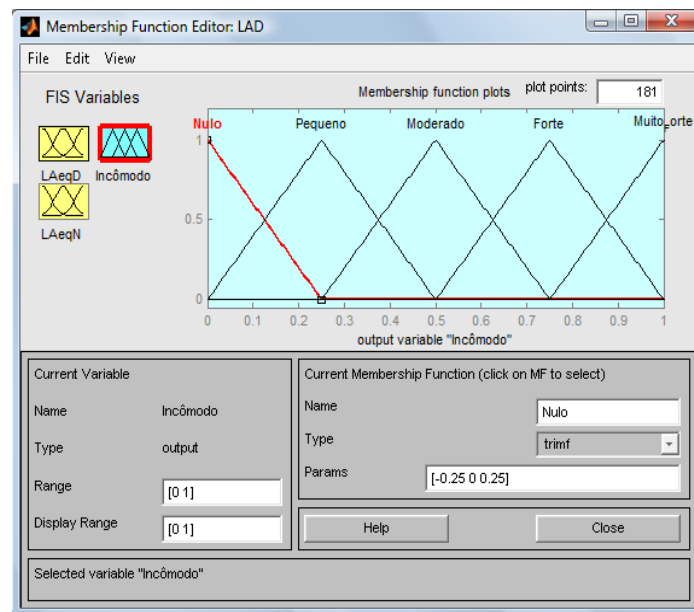


Figura 5: Representação do processo de Fuzzificação da variável de saída com os termos linguísticos utilizados no modelo.

A partir dos dados inseridos no modelo *fuzzy* para avaliar o percentual de incômodo, foram elaboradas 25 regras de inferência como a seguinte:

Regra: SE LAeqD é baixo e LAeqN é muito alto ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.

A tabela (2) representa o mapa de regras para as variáveis de entrada LAeqD e LAeqN e para a variável de saída, o percentual de incômodo. A figura (6) representa as regras inferidas no sistema especialista *fuzzy*.

Tabela 2: Mapa de regras.

L_{AeqD} \ L_{AeqN}	<i>Muito Baixo</i>	<i>Baixo</i>	<i>Médio</i>	<i>Alto</i>	<i>Muito Alto</i>
<i>Muito Baixo</i>	<i>Nulo</i>	<i>Pequeno</i>	<i>Moderado</i>	<i>Forte</i>	<i>Muito forte</i>
<i>Baixo</i>	<i>Pequeno</i>	<i>Pequeno</i>	<i>Moderado</i>	<i>Forte</i>	<i>Muito forte</i>
<i>Médio</i>	<i>Moderado</i>	<i>Moderado</i>	<i>Moderado</i>	<i>Forte</i>	<i>Muito forte</i>
<i>Alto</i>	<i>Forte</i>	<i>Forte</i>	<i>Forte</i>	<i>Muito forte</i>	<i>Muito forte</i>
<i>Muito Alto</i>	<i>Muito forte</i>	<i>Muito forte</i>	<i>Muito forte</i>	<i>Muito forte</i>	<i>Muito forte</i>

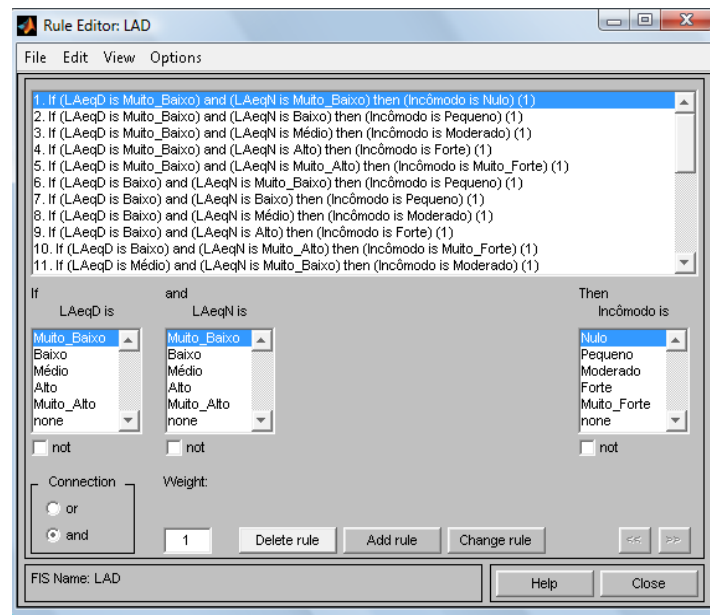


Figura 6: Regras de inferência inseridas no *fuzzy* do modelo.

A figura 7 apresenta o resultado do modelo fuzzy desenvolvido a partir das métricas L_{AeqD} e L_{AeqN}, e dos níveis sonoros da NBR 10151. A primeira e a segunda coluna apresentam as variáveis de *input* do modelo. Enquanto a terceira coluna representa a variável *output*, o *percentual de incômodo*. As linhas centrais que aparecem na primeira e segunda coluna são móveis e permitem a modificação dos valores das variáveis de input, e assim, obtém-se o percentual de pessoas incomodadas pelo ruído aeronáutico. Para ilustrar o processo foi feito: L_{AeqD} = 60 dB(A) e L_{AeqN} = 52,5 obtendo 62,5% de pessoas incomodadas.

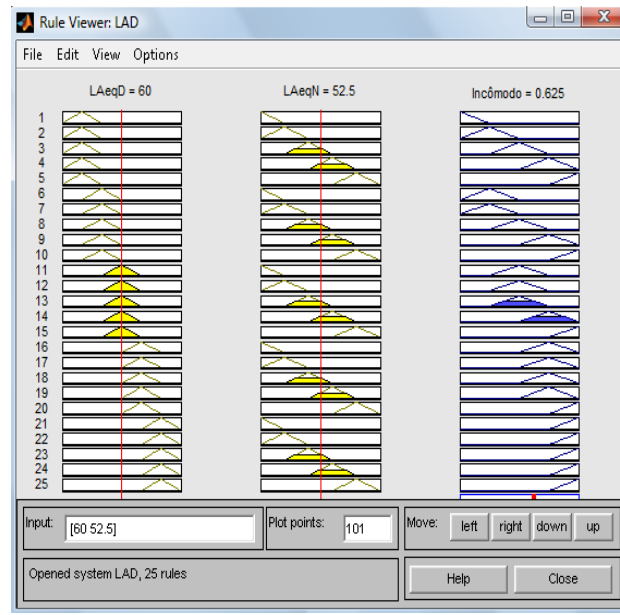


Figura 7: Representação dos valores para LAeqD e LAeqN e o percentual de incômodo.

3. ZONEAMENTO AEROPORTUÁRIO A PARTIR DE UMA CONDIÇÃO LÓGICA.

O atual zoneamento aeroportuário é baseado na métrica DNL que define duas curvas (75dB(A) e 65dB(A)) delimitando três áreas (Área 1, Área 2 e Área 3) com restrições de uso e ocupação do solo nas área 1 e 2, no entorno do aeroporto. A legislação aeronáutica não se pronuncia em relação à área 3. No entanto, Os níveis sonoros em DNL não representam o real incômodo gerado pelo aeroporto na sua vizinhança.

Desta forma, foi proposto um zoneamento aeroportuário baseado nos níveis sonoros da NBR 10151, através de uma condição lógica para cada área da especificada na norma ABNT (Tab. 2). As curvas de ruído geradas das métricas LAeqD e LAeqN para os aeroportos de Recife e de Congonhas. A figura (8) apresenta as curvas de ruído, DNL = 65dB(A) e a curva resultante da condição lógica para uma área estritamente residencial para o Aeroporto de Congonhas.

Tabela 3: Condição Lógica a partir dos níveis sonoros da NBR 10151.

LAeqD	LAeqN	Condição Lógica	Tipo de área da NBR 10151
50	45	$LAeqD \leq 50 \cup LAeqN \leq 45$	Área residencial urbana ou de hospitais e escolas
55	50	$LAeqD \leq 55 \cup LAeqN \leq 50$	Área mista, predominantemente residencial
60	55	$LAeqD \leq 60 \cup LAeqN \leq 55$	Área mista, com vocação comercial
65	55	$LAeqD \leq 65 \cup LAeqN \leq 55$	Área mista, com vocação recreacional
70	60	$LAeqD \leq 70 \cup LAeqN \leq 60$	Área predominantemente industrial

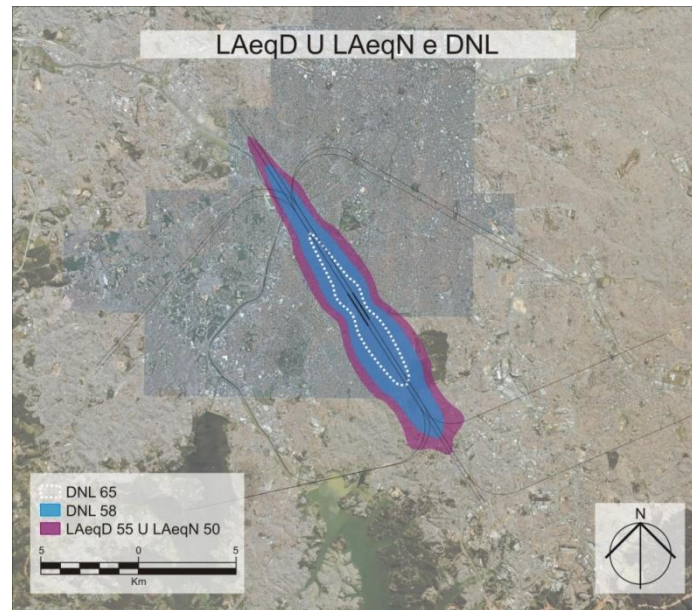


Figura 8: Zoneamento proposto através da condição Lógica para o Aeroporto de Congonhas.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através de um sistema de informação geográfica foi determinado o número de pessoas no interior de cada curva de ruído obtida a partir de uma condição lógica para cada combinação LAeqD e LAeqN referentes aos tipos de áreas da NBR10151.

Foram geradas várias combinações de LAeqD e LAeqN (fig.7), e estes valores foram inseridos no modelo fuzzy para obter o percentual de incômodo. No entanto, para comparar os resultados obtidos com os estudos de Schultz é preciso conhecer o percentual de pessoas *altamente* incomodadas, e este foi obtido a partir dos modificadores *fuzzy*.

Através dos modificadores linguísticos é possível um conjunto maior de valores para uma variável linguística através de uma pequena coleção de termos primários. Um modificador h pode ser considerado como um operador que modifica o conjunto *fuzzy* $M(x)$, representando o significado de x no conjunto *fuzzy* $M(hx)$.

Por exemplo, usando o modificador *muito* em conjunção com *não, e*, e o termo primário *incomodado*, obteve-se os conjuntos *fuzzy* *muito incomodado, muito incomodado, não muito incomodado*.

Os modificadores *mais e menos* são utilizados com a intenção de amenizar os graus relacionados à concentração e dilatação. Os operadores *mais e menos e muito* agindo num conjunto *fuzzy* rotulado x , são definidos por:

$$\text{muito } x \Delta x^2 \quad (1)$$

$$\text{mais } x \Delta x^{1,25} \quad (2)$$

$$\text{menos } x \Delta x^{0,75} \quad (3)$$

Como conseqüência, das relações 1, 2 e 3 têm-se:

$$\text{mais mais } x = \text{menos muito } x$$

Desta forma o modificador *altamente* foi definido como:

$$\text{altamente} = \text{menos muito muito}$$

Através destas combinações obteve-se o valor do percentual e o número de pessoas altamente incomodadas para qualquer condição desejada, dependendo dos níveis sonoros aceitáveis para cada tipo de área. Neste trabalho, foram utilizadas apenas as combinações de LAeqD e LAeqN referentes à NBR 10151.

Tabela 4: Relação de (%HAP) no Aeroporto de Recife.

LAeqD	LAeqN	% Incômodo	% HA	Nº de pessoas no interior da curva resultante	Nº de HAP
50	45	0,25	0,016	160.753	2.512
55	50	0,50	0,125	66.793	8.350
60	55	0,75	0,422	26.730	11.277
65	55	0,75	0,219	59.015	12.909

Tabela 5: Relação de (%) HAP no Aeroporto de Congonhas

LAeqD	LAeqN	% Incômodo	% HA	Nº de pessoas no interior da curva resultante	Nº de HAP
50	45	0,25	0,016	311.623	4.869
55	50	0,50	0,125	138.961	17.370
60	55	0,75	0,422	59.015	24.897
65	55	0,75	0,219	20.730	4.535

O modelo *fuzzy* é mais interessante para níveis sonoros mais elevados. Para áreas residenciais, o percentual de pessoas altamente incomodadas é muito pequeno, já que os níveis sonoros são adequados para este uso, no entanto para níveis superiores aos aceitos para áreas mistas com vocação comercial (LAeqD = 60 dB(A) e LAeqN = 55 dB(A)) o percentual de pessoas *altamente* incomodadas é muito maior do que Schultz considera. Para o nível sonoro DNL 65dB(A) apenas 13,59% das pessoas são consideradas altamente incomodadas de acordo com a análise de Schultz.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho proporcionou um método para relacionar as métricas de ruído ao incômodo utilizando a lógica *fuzzy*. Com isso foi possível obter uma análise entre as métricas de ruído e o número de pessoas *altamente incomodadas* proposto inicialmente por Schultz e pelo modelo *fuzzy* desenvolvido.

Baseado nos cálculos expostos pode-se afirmar que os modelos *fuzzy* desenvolvidos são mais apropriados para avaliar o incômodo, pois levam em consideração os níveis sonoros diurnos e noturnos e uma condição adequada para cada tipo de área, e assim obtém-se o percentual de pessoas altamente incomodadas para diversas situações.

6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e ao CAPES pelo apoio financeiro concedido para o desenvolvimento deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- ABNT (2000) NBR 10151 - Acústica – “Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade” – Apresentação, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- BRASIL. Ministério da Aeronáutica. Portaria 1.141/ GM5 de 8 dez. 1987. Dispõe sobre Zonas de Proteção e Aprova o Plano Básico de Zona de Proteção de Aeródromos, o Plano Básico de Zoneamento de Ruído, o Plano Básico de Zona de Proteção de Heliportos e o Plano de Zona Proteção de Auxílios à Navegação Aérea e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, p. 21190-21198.
- Schultz, T. J., 1978, “Synthesis of social surveys on noise annoyance. Journal of Acoustical Society of America”, v. **64**, pp. 377–405.
- Zadeh, L. A., 1965 “Fuzzy Set”, Information and Control, v. 8, pp.338 -353,.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no trabalho.

FUZZY APPROACH FOR ASSESSMENT AIRPORT NOISE ANNOYANCE BASED ON STANDARD NBR10151.

Tarcilene Aparecida Heleno, tarcileneheleno@yahoo.com.br¹
Jules Ghislain Slama, Juleslama@yahoo.com.br¹

¹PEM/COPPE/UFRJ, Centro de Tecnologia - Bloco G - Sala 204 - Cidade Universitária - RJ – Brasil.

Abstract: *The aircraft noise is present in the daily life of many people who live near airports. Noise annoyance depends on factors such as sound pressure level and frequency spectrum; non-acoustic factors, such as the physical environment and mainly subjective factors, individual sensitivity, social status, among others. The annoyance caused by airport noise is inherently a vague concept. Thus the noise annoyance can be represented by a fuzzy expert system. In this paper, the modeling fuzzy will attribute a crisp value, in the words, a real number that represents the percentage of people disturbed by airport noise. The development of the fuzzy model consists in identifying the characteristics of the system and the definition of input and output variables. After it is necessary to establish the inference rules or linguistic terms to express the characteristics of the fuzzy model for the annoyance, and also establish a method of defuzzification to turn statements into a single fuzzy crisp value to obtain the percentage of annoyed people. Even through the fuzzy modifiers it is possible to establish the relationship of highly annoyed people and these metrics. Input variables of fuzzy system are noise levels on metrics L_{aeqD} and L_{aeqN} derivatives from the Standard NBR 10151 for residential areas.*

Key Words: *Sound exposure, airport noise, Fuzzy Logic.*