



UMA NOVA METODOLOGIA DE ZONEAMENTO AEROPORTUÁRIO COM O
OBJETIVO DE REDUZIR O *ENCROACHMENT* E OS EFEITOS ADVERSOS DO
RUÍDO.

Tarcilene Aparecida Heleno

Dissertação de mestrado apresentada
ao Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica, COPPE, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Jules Ghislain Slama

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2010

UMA NOVA METODOLOGIA DE ZONEAMENTO AEROPORTUÁRIO COM O
OBJETIVO DE REDUZIR O *ENCROACHMENT* E OS EFEITOS ADVERSOS DO
RUÍDO.

Tarcilene Aparecida Heleno

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Examinada por:

Prof. Jules Ghislain Slama, Ph.D.

Prof. Max Suell Dutra, Dr. Ing.

Prof. Webe João Mansur, Ph.D.

Prof. Carlos David Nassi, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO DE 2010

Heleno, Tarcilene Aparecida

Uma Nova Metodologia de Zoneamento Aeroportuário com o Objetivo de Reduzir o *Encroachment* e os Efeitos Adversos do Ruído / Tarcilene Aparecida Heleno – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XV, 121 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Jules Ghislain Slama

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Mecânica, 2010.

Referências Bibliográficas: p.105-110.

1. Ruído aeroportuário. 2. Incômodo sonoro. 3. Lógica *Fuzzy*. I. Slama, Jules Ghislain. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título

Dedico este trabalho aos meus pais que representam a grande força que me faz continuar em frente.

AGRADECIMENTOS

Á Deus, por me guiar sempre e dar-me a oportunidade e determinação para realizar mais esta conquista na minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Jules G. Slama, pela sua amizade, confiança, disponibilidade e pelo apoio fundamental na realização deste trabalho.

Aos meus pais, Maria da Anunciação e Tarcísio, pelo amor incondicional, pelo carinho, incentivo, exemplo, presença constante em minha vida e por sempre terem acreditado e apoiado minhas escolhas.

Aos meus irmãos Flávia e Adalberto pelo amor, força e apoio nos momentos mais difíceis durante esta fase.

Aos meus amigos e companheiros do grupo GERA, pela convivência e ajuda em algumas etapas da realização do meu trabalho, em especial, ao Adriano Belieny, Luiz André de Carvalho, Ana Paula Gama e Rafael Magina.

À amiga Cassiana pela ajuda na redação e formatação da dissertação.

Á amiga Nilséia pela amizade, força e apoio nos momentos mais difíceis durante a realização deste trabalho.

Aos professores, funcionários e amigos do Programa de Engenharia Mecânica.

A CAPES pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

Enfim a todos que de forma direta ou indiretamente ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

UMA NOVA METODOLOGIA DE ZONEAMENTO AEROPORTUÁRIO COM O
OBJETIVO DE REDUZIR O *ENCROACHMENT* E OS EFEITOS ADVERSOS DO
RUÍDO.

Tarcilene Aparecida Heleno

Fevereiro/2010

Orientadores: Jules Ghislain Slama

Programa: Engenharia Mecânica

Com o crescimento das áreas urbanas, as regiões adjacentes aos aeroportos estão se tornando densamente habitadas, causando um grande problema, conhecido como o *encroachment*. O *encroachment* pode ser considerado como a existência de uma significativa parcela da população submetida aos efeitos adversos do ruído, mesmo fora das áreas de restrição de uso, estabelecidas pelo zoneamento aeroportuário. A métrica utilizada para o zoneamento aeroportuário em muitos países e no Brasil é o DNL (Day Night Level). Essa métrica está associada à média da energia sonora produzida por todos os eventos aeronáuticos durante um período de 24h, com uma correção de 10dB durante o período noturno. No entanto, o uso do DNL para o zoneamento aeroportuário pode conduzir a resultados diferentes para os níveis sonoros diurnos e noturnos, dependendo do número de operações do aeroporto nesses períodos. O trabalho propõe um estudo de alternativas para o zoneamento aeroportuário baseado na Norma Brasileira NBR 10151/ ABNT. Apresenta também, uma análise comparativa entre os índices de *encroachment*, através de um sistema de informação geográfica para dois aeroportos brasileiros: o Aeroporto de Congonhas e de Recife, a fim de adequar o zoneamento municipal ao zoneamento aeroportuário. Além disso, são desenvolvidos modelos *fuzzy* do incômodo baseado na NBR 10151/1987 e nas métricas LAeqD e LAeqN, com a finalidade de avaliar o percentual de pessoas altamente incomodadas de forma alternativa àquela proposta por Schultz, a partir da métrica DNL.

Abstract of dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

A NEW METHODOLOGY OF AIRPORT ZONING AIMING TO REDUCE THE
ENCROACHMENT AND ADVERSE EFFECTS OF NOISE.

Tarcilene Aparecida Heleno

February/2010

Advisors: Jules Ghislain Slama

Department: Mechanical Engineering

With the growth of urban areas, the areas adjacent to airports are becoming densely inhabited, causing a big problem known as encroachment. The Encroachment occurs when a significant portion of the population is submitted to the adverse effects of noise, even outside the areas of restricted use established by the airport zoning. The metric used for the airport zoning in many countries and in Brazil is the DNL (Day Night Level). This metric is associated to the average sound energy produced by all aeronautical events during a period of 24 hours, with weighting of 10dB during the night. However, the use of DNL for airport zoning can lead to different results for noise levels, daytime and nighttime, depending on the seasonality of airport activity in those periods. The paper proposes a study of alternatives for the airport zoning based on the Brazilian Standard ABNT/NBR 10151. It also presents a comparative analysis between the indices of encroachment through a Geographic Information System for two Brazilian airports: the Congonhas Airport and the Recife Airport, aiming to adjust the municipal zoning to the airport zoning. Also, fuzzy models are developed on annoyance data, based on NBR 10151/1987 and LAeqD/LAeqN metrics, in order to assess the percentage of highly annoyed people, differently from the model proposed by Schultz, based on the DNL metric.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO.....	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	1
1.2 OBJETIVO	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
CAPÍTULO 2.....	4
RUÍDO AEROPORTUÁRIO	4
2.1 O RUÍDO E SUAS CARACTERÍSTICAS.....	4
2.2 O RUÍDO AERONÁUTICO	4
2.3 PERCEPÇÃO HUMANA DO SOM.....	5
2.4 MÉTRICAS DE RUÍDO MAIS UTILIZADAS	8
2.4.1 <i>Nível de pressão sonora equivalente ponderado em A (LAeq) - Equivalent Sound Pressure Level</i>	8
2.4.2 <i>LAeqD</i>	9
2.4.3 <i>LAeqN</i>	9
2.4.4 <i>(DNL Day - Night Level)</i>	9
2.4.5 <i>Nível de Exposição Sonora (SEL) – Sound Exposure Level</i>	10
2.5 AS CURVAS DE RUÍDO	11
2.6 INM: (INTEGRATED NOISE MODEL)	11
2.7 OS EFEITOS DO RUÍDO NO HOMEM	13
2.7.1 <i>Efeitos do ruído aeronáutico no homem</i>	14
2.7.1.1 Mascaramento da fala	14
2.7.1.2 Interferência no sono	17
2.7.1.3 Incômodo sonoro.....	19
2.8 ABORDAGEM EQUILIBRADA: CONTROLE DE RUÍDO AEROPORTUÁRIO	21
2.8.1 <i>Redução de ruído na fonte</i>	21
2.8.2 <i>Planejamento e gestão do uso do solo</i>	22
2.8.3 <i>Procedimentos operacionais</i>	23
2.8.4 <i>Restrições operacionais às aeronaves</i>	23
CAPÍTULO 3.....	25
LEGISLAÇÃO SOBRE RUÍDO EM COMUNIDADE E RUÍDO AERONÁUTICO NO BRASIL.....	25
3.1 RESOLUÇÃO CONAMA Nº8 DE MARÇO DE 2000 E NBR 10.151 /2000.....	25

3.2	PORTARIA Nº 1141/GM5	27
3.2.1	<i>Plano Básico de Zoneamento de Ruído</i>	28
3.2.2	<i>Plano Específico de Zoneamento de ruído</i>	28
3.3	INCOMPATIBILIDADES ENTRE A NBR 10151 E A PORTARIA 1141.....	29
CAPÍTULO 4.....		31
RELAÇÃO ENTRE DNL E INCÔMODO		31
4.1	RELAÇÃO ENTRE O DNL E A PERCENTAGEM DE PESSOAS ALTAMENTE INCOMODADAS	31
4.2	O CONTEXTO DA ANÁLISE DE SCHULTZ.	33
4.2	PROBLEMAS NA ANÁLISE DE SCHULTZ.....	39
CAPÍTULO 5.....		43
O ENCROACHMENT NO ENTORNO DOS AEROPORTOS BRASILEIROS.....		43
5.1	O ENCROACHMENT	43
5.2	ANÁLISES DO ENCROACHMENT SEGUNDO O CAEP	44
5.3	A METODOLOGIA UTILIZADA NO BRASIL PARA AVALIAR O ENCROACHMENT.	45
5.4	O ENCROACHMENT NOS AEROPORTOS BRASILEIROS.....	46
CAPÍTULO 6.....		49
PROPOSTAS PARA A REVISÃO DA PORTARIA 1141/GM5 VISANDO À INTEGRAÇÃO ENTRE O ZONEAMENTO AEROPORTUÁRIO E URBANO.		49
6.1	RELAÇÃO ENTRE DNL, LAEQD E LAEQN	50
6.2	AMPLITUDE ACÚSTICA	51
6.2.1	<i>Determinação do Δ a partir de simulações realizadas no INM</i>	52
6.3	PRIMEIRA ALTERNATIVA PROPOSTA: ZONEAMENTO AEROPORTUÁRIO EM FUNÇÃO DO DNL A PARTIR DO LAEQD E LAEQN PARA AS ÁREAS RESIDENCIAIS DA NBR 10151.....	55
6.4	SEGUNDA ALTERNATIVA PROPOSTA: ZONEAMENTO AEROPORTUÁRIO BASEADO NOS NÍVEIS SONOROS DA NBR 10151	56
6.5	SIMULAÇÕES DAS CURVAS DE RUÍDO PARA O AEROPORTO DE CONGONHAS.....	59
6.6	SIMULAÇÕES DAS CURVAS DE RUÍDO PARA O AEROPORTO DE RECIFE	62
6.7	TERCEIRA ALTERNATIVA PROPSTA: COMPARAÇÃO ENTRE A CONDIÇÃO $DLN \leq 65$ E A CONDIÇÃO $LAEQD \leq 65$ AND $LAEQN \leq 65$	64
CAPÍTULO 7.....		69
MODELAGEM FUZZY PARA AVALIAR O INCÔMODO SONORO		69
7.1	INTRODUÇÃO A LÓGICA FUZZY	69

7.2 A LÓGICA FUZZY E O INCÔMODO SONORO	70
7.3 MODELAGEM FUZZY DERIVADA DA NBR 10.151/1987 PARA AVALIAR O INCÔMODO CAUSADO PELO RUÍDO AERONÁUTICO.	70
7.3.1 <i>Definição das variáveis de entrada (input)</i>	71
7.3.2 <i>Definição da variável de saída (output)</i>	73
7.3.3 <i>Regras fuzzy</i>	76
7.3.4 <i>Defuzzificação</i>	79
7.4 MODIFICADORES LINGÜÍSTICOS OU HEDGES.....	82
7.5 MODELO FUZZY BASEADO NAS MÉTRICAS LAEQD E LAEQN.....	84
7.5.1 <i>Descrição do modelo fuzzy II</i>	84
CAPÍTULO 8.....	92
ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	92
8.1 QUANTIFICAÇÃO DO ENCROACHMENT A PARTIR DO DNL EQUIVALENTE.	92
8.2 QUANTIFICAÇÃO DO ENCROACHMENT A PARTIR E DO MODELO FUZZY BASEADO NA NBR 10151/1987	96
8.2.1 <i>Análise do encroachment a partir da condição lógica $LAeqD \leq 65$ AND $LAeqN 55$ para o zoneamento aeroportuário.</i>	100
8.3 QUANTIFICAÇÃO DO ENCROACHMENT A PARTIR DO MODELO FUZZY BASEADO NAS MÉTRICAS LAEQD E LAEQN.	100
CONCLUSÃO	103
ANEXO 1.....	111
ANEXO 2.....	113
ANEXO 3.....	116

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: CURVAS ISOFÔNICAS. FONTE: WWW.KEMISA.ES/CIRCUITO_LOUDNESS.PHP	6
FIGURA 2: CURVAS DE PONDERAÇÃO. FONTE: CHRAUSTICA.ZIP.NET/	7
FIGURA 3: REPRESENTAÇÃO LAMAX E SEL PARA UM ÚNICO EVENTO DE UMA AERONAVE.	10
FIGURA 4: INFLUÊNCIA DO RUÍDO SOBRE A TRANSMISSÃO DA FALA.....	16
FIGURA 5: PERCENTUAL DA POPULAÇÃO DESPERTADA DURANTE O SONO DEVIDO À EXPOSIÇÃO SONORA DURANTE UM EVENTO DE POUSO OU DECOLAGEM.	19
FIGURA 6: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM PLANO BÁSICO DE ZONEAMENTO DE RUÍDO.	28
FIGURA 7: PEZR DO AEROPORTO DE CONGONHAS.....	29
FIGURA 8: RELAÇÃO DE PESSOAS ALTAMENTE INCOMODADAS E A MÉTRICA DNL.	32
FIGURA 9: RELAÇÃO ENTRE A AVALIAÇÃO DE RUÍDO NA COMUNIDADE E AS CONSEQUÊNCIAS DO COMPORTAMENTO PREDITO DEVIDO À EXPOSIÇÃO AO RUÍDO AMBIENTAL	34
FIGURA 10: ESTIMATIVA ANTECIPADA DA RELAÇÃO ENTRE A EXPOSIÇÃO AO RUÍDO ACUMULADO E A PREVALÊNCIA DE AERONAVES INDUZIDA POR RUÍDO CAUSANDO INCÔMODO.	35
FIGURA 11: CURVA DE FIDELL <i>ET AL</i> , COMPARADA A CURVA ORIGINAL DE SCHULTZ.	37
FIGURA 12: CURVA ADOTADA PELA FICON PARA AVALIAR O PERCENTUAL DE PESSOAS ALTAMENTE INCOMODADAS.	38
FIGURA 13: RELAÇÃO DAS PESSOAS ALTAMENTE INCOMODADAS E O DNL PARA CADA FONTE DE RUÍDO DE TRANSPORTE.....	41
FIGURA 14: NÍVEIS DE RUÍDO DURANTE O DIA NO AEROPORTO DE RECIFE.	51
FIGURA 15: UMA MALHA DE PONTOS INSERIDOS SOBRE O AEROPORTO DE RECIFE COM SUA RESPECTIVA CURVAS DE RUÍDO NA MÉTRICA LAEQD.....	53
FIGURA 16: NÍVEIS SONOROS SIMULADOS NAS MÉTRICAS LAEQD E LAEQN PARA O AEROPORTO DE RECIFE.	54
FIGURA 17: NÍVEIS SONOROS SIMULADOS NAS MÉTRICAS LAEQD E LAEQN PARA O AEROPORTO DE CONGONHAS.	54
FIGURA 18: CURVAS DE RUÍDO SOBRE O AEROPORTO DE CONGONHAS PARA ÁREA ESTRITAMENTE RESIDENCIAL.	59
FIGURA 19: CURVAS DE RUÍDO SOBRE O AEROPORTO DE CONGONHAS PARA ÁREA MISTA PREDOMINANTEMENTE RESIDENCIAL.....	60
FIGURA 20: CURVAS DE RUÍDO SOBRE O AEROPORTO DE CONGONHAS PARA ÁREA MISTA, COM VOCAÇÃO COMERCIAL.	61

FIGURA 21: CURVAS DE RUÍDO SOBRE O AEROPORTO DE RECIFES PARA ÁREA ESTRITAMENTE RESIDENCIAL.....	62
FIGURA 22: CURVAS DE RUÍDO SOBRE O AEROPORTO DE RECIFE PARA ÁREA MISTA PREDOMINANTEMENTE RESIDENCIAL.....	63
FIGURA 23: CURVAS DE RUÍDO SOBRE O AEROPORTO DE RECIFE PARA ÁREA MISTA, COM VOCACÃO COMERCIAL.....	64
FIGURA 24: CURVAS DE RUÍDO SOBRE O AEROPORTO DE CONGONHAS PARA A CONDIÇÃO LÓGICA $L_{AeqD} \leq 65$ AND $L_{AeqN} \leq 55$	66
FIGURA 25: CURVAS DE RUÍDO SOBRE O AEROPORTO DE RECIFE PARA A CONDIÇÃO LÓGICA $L_{AeqD} \leq 65$ AND $L_{AeqN} \leq 55$	67
FIGURA 26: VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA DO MODELO.....	74
FIGURA 27: FUZZIFICAÇÃO DA VARIÁVEL ΔD	75
FIGURA 28: FUZZIFICAÇÃO DA VARIÁVEL ΔN	75
FIGURA 29: FUZZIFICAÇÃO DA VARIÁVEL <i>PERCENTUAL DO INCÔMODO</i>	76
FIGURA 30: REGRAS FUZZY DO SISTEMA.....	79
FIGURA 31: REPRESENTAÇÃO DOS VALORES DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA.....	80
FIGURA 32: REPRESENTAÇÃO DOS VALORES DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA.....	80
FIGURA 33: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA.....	82
FIGURA 34: EFEITO DO MODIFICADOR MUITO.....	83
FIGURA 35: VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA DO MODELO FUZZY II.....	85
FIGURA 36: FUZZIFICAÇÃO DE L_{AeqD}	85
FIGURA 37: FUZZIFICAÇÃO DE L_{AeqN}	86
FIGURA 38: FUZZIFICAÇÃO DA VARIÁVEL <i>PERCENTUAL DE INCÔMODO</i>	86
FIGURA 39: REGRAS FUZZY DO MODELO.....	89
FIGURA 40: DADOS DE ENTRADA E SAÍDA DAS VARIÁVEIS.....	90
FIGURA 41: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA.....	90
FIGURA 42: ZONEAMENTO PROPOSTO A PARTIR DAS ÁREAS RESIDENCIAIS E MISTAS DA NBR 10151 PARA O AEROPORTO DE CONGONHAS.....	93
FIGURA 43: ZONEAMENTO PROPOSTO A PARTIR DAS ÁREAS RESIDENCIAIS E MISTAS DA NBR 10151 PARA O AEROPORTO DE RECIFE.....	93
FIGURA 44: GRÁFICO OBTIDO A PARTIR DO MODELO FUZZY USANDO $\Delta = 5$	97
FIGURA 45: GRÁFICO OBTIDO A PARTIR DO MODELO FUZZY USANDO $\Delta = 10$	99

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: INFORMAÇÕES RELATIVAS AOS VALORES NPD PARA A AERONAVE A300.	12
TABELA 2: INFLUÊNCIA DO RUÍDO SOBRE A COMUNICAÇÃO.	16
TABELA 3: CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO NCA PARA AMBIENTES EXTERNOS, EM dB(A).....	26
TABELA 4: PERCENTUAL DE PESSOAS ALTAMENTE INCOMODADAS SEGUNDO ALGUMAS AGÊNCIAS INTERNACIONAIS.	33
TABELA 5: NÍVEIS DE CRITÉRIO DURANTE O DIA E A NOITE E O DNL EQUIVALENTE PARA CADA ÁREA DA NBR 10151.....	55
TABELA 6: CONDIÇÃO LÓGICA DE ACORDO COM OS TIPOS DE ÁREA DA NBR 10151.....	56
TABELA 7: CONDIÇÃO LÓGICA DE COMPLEMENTARIDADE	56
TABELA 8: ÁREAS DE CURVA DE RUÍDO EM KM^2 NO AEROPORTO DE RECIFE.	58
TABELA 9: ÁREA DE CURVA DE RUÍDO EM KM^2 NO AEROPORTO DE CONGONHAS.	58
TABELA 10: CORREÇÕES DO CRITÉRIO BÁSICO PARA USO RESIDENCIAL EM DIFERENTES ÁREAS. FONTE: NBR 10151/1987.....	72
TABELA 11: RESPOSTA ESTIMADA DA COMUNIDADE AO RUÍDO.	73
TABELA 12: MAPA DE REGRAS DO MODELO 1.....	77
TABELA 13: VALORES SIMULADOS PELO MODELO <i>FUZZY</i>	81
TABELA 14: MAPA DE REGRAS.	87
TABELA 15: PERCENTUAL DE PESSOAS ALTAMENTE INCOMODADAS NO AEROPORTO DE CONGONHAS.	94
TABELA 16: PERCENTUAL DE PESSOAS ALTAMENTE INCOMODADAS SEGUNDO SCHULTZ NO AEROPORTO DE RECIFE.	94
TABELA 17: PERCENTUAL DE PESSOAS ALTAMENTE INCOMODADAS E O NÚMERO DE PESSOAS ALTAMENTE INCOMODADAS. CONGONHAS.....	95
TABELA 18: PERCENTUAL DE PESSOAS ALTAMENTE INCOMODADAS E O NÚMERO DE PESSOAS ALTAMENTE INCOMODADAS. RECIFE	95
TABELA 19: RELAÇÃO ENTRE O DNL E A POPULAÇÃO ALTAMENTE INCOMODADA.....	95
TABELA 20: CONDIÇÃO RESIDENCIAL $\text{LAEQD} = 50$ E $\text{LAEQN} = 45$	96
TABELA 21: CONDIÇÃO RESIDENCIAL $\text{LAEQD} = 55$ E $\text{LAEQN} = 50$	96
TABELA 22: CONDIÇÃO RESIDENCIAL $\text{LAEQD} = 60$ E $\text{LAEQN} = 55$	96
TABELA 23: CONDIÇÃO RESIDENCIAL $\text{LAEQD} = 55\text{dB(A)}$ E $\text{LAEQN} = 45\text{ dB(A)}$	98
TABELA 24: CONDIÇÃO RESIDENCIAL $\text{LAEQD} = 60\text{ dB(A)}$ E $\text{LAEQN} = 50\text{ dB(A)}$	98
TABELA 25: CONDIÇÃO RESIDENCIAL $\text{LAEQD} = 65\text{dB(A)}$ E $\text{LAEQN} = 55\text{ dB(A)}$	98
TABELA 26: NÚMERO DE PESSOAS NO INTERIOR DAS CURVAS RESULTANTES DA CONDIÇÃO LÓGICA PARA ÁREAS RESIDENCIAIS DO AEROPORTO DE RECIFE.	99

TABELA 27: NÚMERO DE PESSOAS NO INTERIOR DAS CURVAS RESULTANTES DA CONDIÇÃO LÓGICA PARA ÁREAS RESIDENCIAIS DO AEROPORTO DE CONGONHAS.	99
TABELA 28: NÚMERO DE PESSOAS NO INTERIOR DA CURVA DE RUÍDO RESULTANTE DA CONDIÇÃO $LAeqD \leq 65$ AND $LAeqN \leq 55$	100
TABELA 29: RELAÇÃO DE PESSOAS ALTAMENTE INCOMODADAS NO AEROPORTO DE RECIFE.	101
TABELA 30: RELAÇÃO DE PESSOAS ALTAMENTE INCOMODADAS NO AEROPORTO DE CONGONHAS.	101
TABELA 31: RELAÇÃO ENTRE DNL E HAP.....	102

LISTA DE SIGLAS

DNL: Day-Night Level.

EPA: Environmental Protection Agency.

FICAN: Federal Interagency Committee on Aviation Noise.

FICON: Federal Interagency Committee on Noise.

INM: Integrated Noise Model.

HAP: Pessoas Altamente Incomodadas.

LAeq: Nível equivalente de Pressão Sonora.

LAeqD: Nível equivalente diurno de Pressão Sonora.

LAeqN: Nível equivalente noturno de Pressão Sonora.

PBZR: Plano Básico de Zoneamento de Ruído.

PEZR: Plano Específico de Zoneamento de ruído.

OECD – Organization for Economic Cooperation and Development.

SEL: Nível de Exposição Sonora.

SIL: Speech Interference Level.

WHO: World Health Organization.

NRC: National Research.

Δ : Amplitude Acústica.

Δ_D : variação deste nível sonoro durante o período diurno.

Δ_N : variação deste nível sonoro durante o período noturno.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

A poluição sonora decorrente do tráfego aéreo apresenta-se atualmente como um dos principais geradores de conflitos entre aeroportos e a população residente em seus arredores, na maioria das grandes cidades do mundo.

O aeroporto é considerado indutor de desenvolvimento e quando implantado em um determinado local oferece muitos benefícios para a população, mas também impõe algumas restrições quanto ao uso do solo nas proximidades do aeroporto, que nem sempre são respeitadas, quando, por exemplo, a comunidade mesmo autorizada a construir suas habitações no local, vê-se prejudicada com o alto nível de exposição sonora dos aeroportos. A situação produz muitos efeitos adversos sobre a população, dentre os quais a interferência na comunicação, interferência no sono e o incômodo, apesar de já existir, como consta nesse estudo, um zoneamento aeroportuário que tem por objetivo reduzir estes efeitos.

Com o crescimento das áreas urbanas, as regiões adjacentes aos aeroportos estão se tornando densamente habitadas em conformidade com a legislação, acarretando um problema mundial, o *encroachment*, sendo responsável pela redução da qualidade de vida para a comunidade residente nestas áreas. No contexto deste trabalho o *encroachment* pode ser considerado como o crescimento da população submetida aos efeitos adversos do ruído no aeroporto, mesmo fora das áreas de restrição de uso estabelecidas pelo zoneamento aeroportuário.

No caso geral o *encroachment* está relacionado com o uso de uma métrica inadequada para o zoneamento aeroportuário, com o agravante que a escolha de níveis para as curvas de ruído possuem valores muito altos. No caso do Brasil, existe ainda um desrespeito em relação ao zoneamento aeroportuário.

A métrica utilizada no Brasil e em vários outros países para o zoneamento aeroportuário é o DNL (Day Night Level). A condição para uso residencial é $DNL \leq 65dB(A)$.

O *encroachment* pode ocorrer em duas situações:

A primeira situação é área $DNL > 65dB(A)$, neste caso o problema se deve a inadiplência da legislação. As pessoas ocupam a área de forma irregular, em relação à legislação aeronáutica. A segunda situação para ocorrer *encroachment* é na área $DNL \leq 65dB(A)$ devido à incompatibilidade da legislações urbana e aeroportuária.

A gestão adequada do solo no entorno dos aeroportos passa, invariavelmente, pela incorporação dos planos aeroportuários ao zoneamento urbano dos municípios, o que depende das autoridades municipais. Portanto, o planejamento e gestão do uso do solo no entorno dos aeroportos está atrelado ao zoneamento aeroportuário.

Apesar de o zoneamento aeroportuário ser realizado de forma adequada com a métrica DNL, há pessoas situadas na região onde os efeitos adversos do ruído são percebidos. Por isso é necessário buscar uma forma de integrar o zoneamento aeroportuário ao zoneamento urbano, a fim de evitar o incômodo causado pelo ruído aeronáutico e limitar o *encroachment* a condições aceitáveis.

1.2 Objetivo

O objetivo deste estudo é propor alternativas para zoneamento aeroportuário a partir dos níveis sonoros da Norma ABNT NBR 10151/ 2000, nas métricas LAeqD e LAeqN, para as áreas residenciais a fim de controlar e limitar o *encroachment* a condições aceitáveis. Buscar-se-á também nessa pesquisa avaliar o percentual de pessoas altamente incomodadas pelos efeitos adversos do ruído no entorno do aeroporto, de acordo com as alternativas de zoneamento propostas. Tal estudo será fundamentado por meio da *Lógica Fuzzy*.

1.3 Estrutura da dissertação

No capítulo 2, retratam-se sucintamente as definições de ruído aeroportuário e fontes geradoras de ruído em um aeroporto; as métricas de avaliação do ruído adotadas; os efeitos adversos do ruído decorrente do tráfego aéreo; e o conceito de *Abordagem Equilibrada* com suas ações a fim de reduzir o nível de ruído percebido no receptor crítico.

O capítulo 3 aborda a legislação relativa à poluição sonora: a Resolução CONAMA nº8 de março de 2000, que remete a norma ABNT NBR 10151 e a Portaria 1141/GM5 do ministério da aeronáutica.

O capítulo 4 descreve os estudos de Schultz e sua evolução para avaliar o percentual de pessoas incomodadas pelo ruído de transportes (rodoviário, ferroviário e aeronáutico), a partir de pesquisas sociais realizadas em vários países.

O capítulo 5 descreve o *encroachment* e apresenta um diagnóstico deste no entorno de dois aeroportos brasileiros: o Aeroporto de Congonhas e o Aeroporto de Recife.

O capítulo 6 apresenta alternativas para o zoneamento aeroportuário com objetivo de avaliar o *encroachment* e as simulações de curvas de ruído no *software* INM para as alternativas de zoneamento nas métricas DNL, LAeqD e LAeqN para os aeroportos citados anteriormente.

O capítulo 7 descreve um modelo especialista *fuzzy* para avaliar o percentual de pessoas incomodadas pelo ruído aeronáutico.

O capítulo 8 faz uma análise do *encroachment* a partir dos resultados das simulações no INM e do modelo *fuzzy*.

Em seguida é apresentada a conclusão, e na seqüência, são apresentados as referências e os anexos.

CAPÍTULO 2

RUÍDO AEROPORTUÁRIO

2.1 O Ruído e suas características

Fisicamente, os sons são produzidos por uma perturbação mecânica e propagados como uma onda em movimento no ar ou em outro meio (WHO,1995). Os sons podem ser percebidos como altos, fortes, agradáveis, incômodos, prejudiciais à audição de um outro som (quando o mascara), etc.

O ruído faz parte do cotidiano de todas as pessoas que residem em centros urbanos, e é de difícil definição. Atualmente, o *ruído* pode ser definido como todo o som desagradável ou indesejável ao receptor. As principais fontes de ruído ambiente incluem rodovias, ferrovias, aeronaves, indústrias, construções, obras públicas, etc.

A extensão do problema do ruído ambiente é muito grande. Nos EUA no início dos anos 1970, mais de 40% da população estava exposta a um nível de ruído superior a 55 dB (A). (EPA, 1974). Na União Européia e no Japão, essa percentagem é ainda maior. (OECD, 1996). Em contraste a muitos outros problemas ambientais, a população exposta ao ruído continua a crescer a níveis inaceitáveis acompanhada por um número crescente de denúncias (WHO, 1999).

Esta dissertação trata um caso específico de fonte de ruído, o ruído aeronáutico.

2.2 O ruído aeronáutico

Um dos principais problemas de impacto ambiental decorrente da atividade aeroportuária em uma determinada região, e com maior incidência de incômodo nas comunidades que residem nas proximidades dos aeroportos, é o ruído aeroportuário, que consiste em todo ruído gerado pelo aeroporto em operação e pelas aeronaves.

O ruído aeroportuário caracteriza-se por um ruído intermitente ou não - estacionário. As diversas fontes sonoras provenientes das atividades aeroportuárias

às quais as comunidades próximas ao aeroporto estão expostas, não são estacionárias com relação ao tempo.

O ruído aeronáutico é o ruído gerado pela movimentação das aeronaves em operação. Ele se caracteriza por elevados níveis sonoros, principalmente nas baixas frequências, causando vários efeitos adversos sobre a população submetida a tal exposição sonora. Tal evento produz um impacto significativo, pois afeta diretamente a qualidade de vida de grande número de pessoas que residem e/ou transitam nas proximidades dos grandes aeroportos e que, normalmente, não são beneficiadas diretamente pelas atividades aeroportuárias. Este impacto está relacionado diretamente às operações de pouso, decolagem, e sobrevôos de aeronaves.

2.3 Percepção humana do som

A percepção é realizada através dos sentidos. O som pode ser definido como a sensação subjetiva produzida através do ouvido, resultante de flutuações da pressão do ar. A percepção humana do som é um fenômeno complexo que depende de propriedades e características acústicas e não acústicas.

Uma das características do som é a sua sonoridade, ou seja, sua intensidade subjetiva. Ela é uma função da sua intensidade e frequência.

Na figura 1 estão enumeradas as curvas de 20 a 100 fones que representam iguais níveis de sonoridade, sendo esta determinada através de muitos testes. Nas curvas, verifica-se que a audição humana, ao mesmo nível de energia, é menos sensível a baixas frequências do que a médias ou altas frequências. Por exemplo, o nível sonoro 60 dB a 400 Hz é considerado alto, quase 70 fones, no entanto os mesmos 60 dB a 63 Hz correspondem a apenas 40 fones.

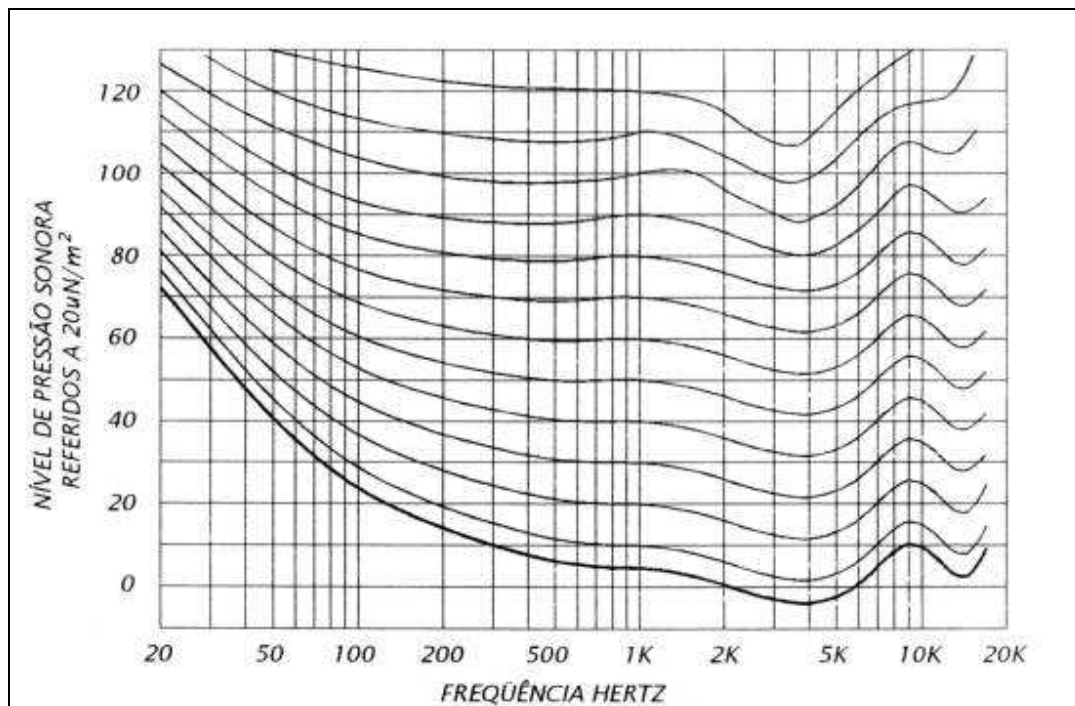


Figura 1: Curvas isofônicas.

Fonte: www.kemisa.es/circuito_loudness.php

Contudo ao invés de se utilizar o fone, foram propostos métodos simplificados de avaliação subjetiva do ruído, através do uso de filtros eletrônicos de ponderação, simulando a resposta do ouvido humano. Os filtros de ponderação procuram reproduzir, para diversas faixas de frequências e diversas intensidades sonoras, a resposta do ouvido humano.

O "decibelímetro" fornece a medida de um nível de ruído para vários tipos de ponderação. A parte mais importante de um sonômetro é o microfone e microfones reagem, em geral, igualmente a todas as frequências que compõem um som, no entanto, nosso ouvido reage diferentemente a cada frequência. A sensibilidade do ouvido humano é diferente para cada faixa de frequência, no entanto, na faixa audível (de 20 e 20.000Hz), nossa percepção do som tende a amplificar a sensibilidade dos sons na faixa de frequência da fala e reduzir a sensibilidade aos sons de frequências baixas ou muito altas.

Para reproduzir a sensibilidade humana utilizam-se correções que variam com as frequências. Visto que a intensidade do som também influencia nossa percepção, adotou-se filtros de ponderação em dB corrigidos, e que são aplicadas em níveis de sonoridade distintos. A figura 2 mostra as curvas de ponderação "A", "B", "C" e "D".

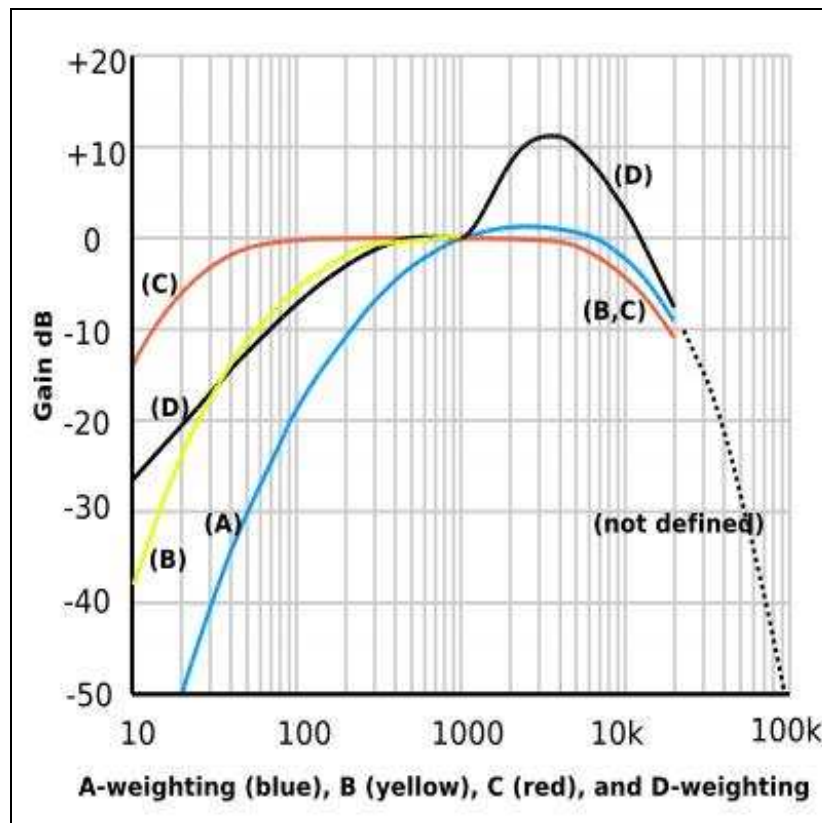


Figura 2: Curvas de ponderação.

FONTE: chracustica.zip.net/

A curva de ponderação A é baseada na curva de 40 fones da figura 1 (é a curva que cruza a frequência de 1KHz a 40 dB) e a curva de ponderação B é baseada na curva de 70 fones (é a curva que cruza a frequência de 1KHz a 70 dB). A curva de ponderação C é baseada na curva de 100 fones, praticamente plana. A curva de ponderação D foi desenvolvida para ruído de vôo de aeronaves (penaliza as altas frequências), simétrico, com relação à linha de 40dB.

Inicialmente a curva de ponderação A foi proposta para a avaliação de ruídos entre 40 e 60 dB de baixas frequências, sendo a mais adequada para representar a resposta humana. É utilizada na maioria das legislações e normas. No entanto, atualmente a curva de ponderação A está sendo utilizada também para os níveis médios ou altos para a avaliação subjetiva do ruído. As métricas mais utilizadas em ruído aeroportuário adotam a ponderação "A".

2.4 Métricas de ruído mais utilizadas

As métricas mais utilizadas para avaliar o ruído na legislação brasileira são LAeq, LAeqD e LAeqN, DNL, SEL. A seguir é feita uma abordagem de cada uma delas.

2.4.1 Nível de pressão sonora equivalente ponderado em A (LAeq) - Equivalent Sound Pressure Level

Os efeitos adversos do ruído não dependem somente de seu nível, mas também de sua duração. Normalmente, os níveis de ruído podem variar durante um determinado intervalo de tempo.

Sancho (1983) define que “as flutuações do nível de ruído que variam aleatoriamente em um período de tempo T são consideradas no cálculo do nível equivalente contínuo (LAeq), definido como o nível de um ruído constante que tem a mesma energia sonora que aquele durante o mesmo período de tempo, expresso em dB(A)”.

O nível equivalente de pressão sonora, LAeq, pode ser obtido através da soma logarítmica de todos os níveis sonoros das diversas e distintas fontes que contribuem para a energia sonora global. Assim, é definido como a média de energia percebida em um intervalo de tempo, expresso em dB (A). O LAeq é dado pela equação 1:

$$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_t^{(t+T)} \frac{P_A^2}{P_0^2}(t) dt \right] = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_t^{t+T} 10^{\frac{L_{A(t)}}{10}}(t) dt \right] \quad (1)$$

Na qual:

T é o período de tempo, em segundos;

$L_{A(t)}$ é o nível de pressão sonora, instantâneo, ponderado em A;

$P_{A(t)}$ é o nível de pressão sonora, ponderado em A, expressa em Pascal;

P_0 é o nível de pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pascal).

A equação 1 mostra que o nível equivalente é representado por um valor constante, que durante o mesmo intervalo de tempo T, resultaria na mesma energia acústica produzida pelos valores instantâneos variáveis de pressão sonora.

No caso do ruído aeronáutico, devido às características não estacionárias do ruído, é interessante utilizar duas métricas derivadas: o LAeqD, para o período diurno, e o LAeqN, para o período noturno.

2.4.2 LAeqD

O nível equivalente de pressão sonora diurno LAeqD é definido como a média da energia sonora calculada no período diurno, compreendido num intervalo de tempo de 15 horas, entre às 7h00 e às 22h00.

$$L_{AeqD} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{3600 \times 15} \int_7^{22} \frac{P_A^2(t)}{P_0^2} dt \right] \quad (2)$$

2.4.3 LAeqN

O nível equivalente de pressão sonora diurno LAeqN é definido como a média da energia sonora calculada no período noturno, compreendido num intervalo de tempo de 9 horas, entre às 22h e às 7h.

$$L_{AeqN} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{3600 \times 9} \int_{22}^7 \frac{P_A^2(t)}{P_0^2} dt \right] \quad (3)$$

2.4.4 (DNL Day - Night Level)

O DNL é uma métrica de ruído definida como o nível de ruído ponderado em A expressos em decibéis dB(A), muito utilizada para definir o nível de exposição ao ruído aeronáutico em uma comunidade.

O DNL corresponde à média de energia sonora produzida por todos os eventos aeronáuticos ocorridos durante um período de 24 horas. O nível de ruído é acrescentado de 10dB(A) para os níveis sonoros que ocorrem durante o período noturno, compreendido entre às 22h e 7h do dia seguinte, devido à maior sensibilidade ao incômodo causado pelo ruído noturno.

A equação 4 define matematicamente a métrica DNL, como o nível de exposição sonora no período de 24h dividido pelo número total de segundos durante o dia.

$$DNL = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{3600 \times 24} \left[\int_7^{22} 10^{\frac{LA(t)}{10}} dt + \int_{22}^7 10^{\frac{LA(t)+10}{10}} dt \right] \right\} \quad (4)$$

Na qual:

t é o tempo, em segundos;

$L_A(t)$ é o nível sonoro ponderado na escala A durante o intervalo de tempo T .

Pode-se dizer que o cálculo de DNL é similar ao do L_{Aeq} , mas com a diferença que o DNL penaliza o ruído noturno em 10dB e é calculado num período de 24 horas. A relação entre eles é obtida através dos L_{Aeq} de cada hora do dia, na qual a média das somas das energias do período diurno com o noturno acrescido de 10dB resulta no DNL, considerando L_A como o L_{Aeq} . (BISTAFA, 2006).

2.4.5 Nível de Exposição Sonora (SEL) – *Sound Exposure Level*

O SEL representa uma expressão logarítmica da energia acústica do evento, uma vez que ele sobrepuja um nível de ruído específico, mas como se ele tivesse ocorrido dentro de um segundo. Essa grandeza é dada pela soma de todos os níveis de pressão sonora em uma unidade de tempo, dentro de um intervalo de interesse. O SEL é uma expressão logarítmica da exposição sonora, medida em decibel, expressa na equação 5:

$$SEL = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T_0} \int_t^{(t+T)} \frac{P_A^2}{P_0^2}(t) dt \right] \quad (5)$$

Onde T_0 é de um segundo.

A figura 3 é uma representação gráfica de um evento de ruído de aeronave típica.

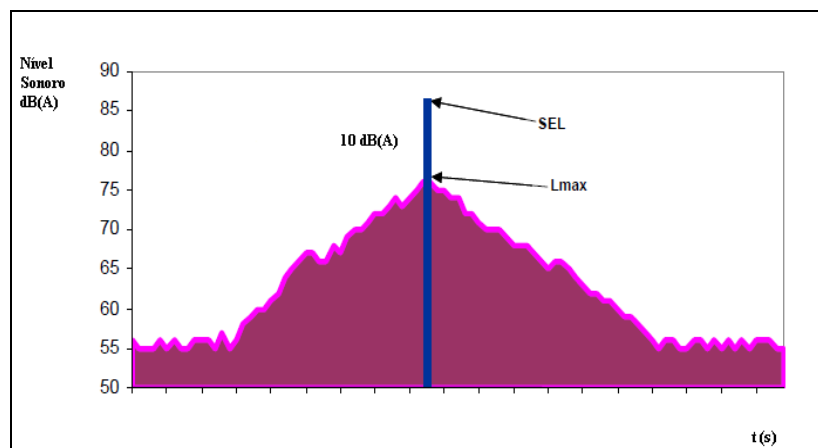


Figura 3: Representação L_{Amax} e SEL para um único evento de uma aeronave.

Fonte: <www.flyoakland.com>

O SEL é uma métrica muito utilizada em ruído aeronáutico para caracterizar um evento único de pouso ou decolagem de uma aeronave, sendo mais comum o seu

emprego para avaliar a exposição sonora da população durante o sobrevôo noturno de uma aeronave e a probabilidade de interrupção do sono. (IAC, 2004).

2.5 As curvas de ruído

Para avaliar a exposição sonora proveniente da movimentação de aeronaves nos aeroportos são elaboradas curvas de ruído. Em geral, as curvas de ruído são plotadas para alguns valores de nível sonoro de modo a permitir definir as áreas mais afetadas e as menos afetadas.

Em todo contorno da área delimitada pela curva de ruído a métrica utilizada é constante, por isso são chamadas também de curvas isofônicas.

As curvas de ruído podem ser elaboradas em diversas métricas, dentre as mais utilizadas estão o DNL e o SEL. Neste trabalho foram feitas curvas de ruído nas métricas LAeqD e LAeqN derivadas de LAeq, devido a necessidade de avaliar o incômodo sonoro causado durante o período diurno e noturno. Até então, estas métricas não eram utilizadas em ruído aeroportuário.

As curvas de ruído foram elaboradas por meio do *software* INM (*Integrated Noise Model*). Estas traduzem a movimentação das aeronaves em níveis de ruído no entorno do aeroporto. A seguir é feita uma descrição deste *software*.

2.6 INM: (*Integrated Noise Model*)

O INM é um *software* desenvolvido pela *Federal Aviation Administration* (FAA), em 1978, para avaliar o impacto ambiental sonoro provocado pelas operações aeronáuticas, nas áreas próximas aos aeroportos. A versão 7.0 é a mais recente do programa e foi utilizada nesse trabalho.

O modelo do INM produz os contornos da exposição sonora usados em mapas de compatibilidade do uso do solo na vizinhança dos aeroportos, a partir de uma grande base de dados sobre o desempenho de voo do avião, além de dados acústicos associados a padrões e perfis definidos por cada aeroporto. Ele calcula também níveis de ruído para diversas métricas em locais específicos. Os contornos permitem a comparação entre os níveis sonoros gerados por tipos diferentes de avião e procedimentos de voo.

O INM faz uso de informações de dois bancos de dados internos, obtidas através de procedimentos utilizados na certificação de ruído das aeronaves. O primeiro banco

de dados traz parâmetros de desempenho dos aviões, como velocidade, potência, *flaps*, peso máximo para pouso e decolagem, entre outros; elementos estes utilizados para os cálculos de trajetórias. O segundo banco de dados é constituído por várias tabelas, denominado NPD (*Noise, Power and Distance*), relacionando os níveis de ruído com a potência do motor da aeronave e a distância existente entre a fonte aeronave e o observador.

Os dados NPD são obtidos em medições de ruído de aeronaves durante as operações de voo de teste de certificação das aeronaves. A tabela 1 a seguir ilustra exemplos das informações relativas aos valores NPD para a aeronave Airbus A300.

Tabela 1: Informações relativas aos valores NPD para a aeronave A300.

Métrica	Modo operacional	W	Níveis de ruído em dB(A) x distância (pés)									
			L_200	L_400	L_630	L_1000	L_2000	L_4000	L_6300	L_10000	L_16000	L_25000
EPNL	10000	P	106,2	101,1	97,2	92,5	84,2	75	68	61,4	53,4	43,3
EPNL	25000	P	109,8	105,1	101,5	97,3	90,3	82	76	70	62,7	53,9
EPNL	25000	D	109,8	105,1	101,5	97,3	90,3	82	76	70	62,7	53,9
SEL	10000	P	99,9	95	91,4	87,5	81,3	74,6	69,7	64,2	57,7	50,7
SEL	25000	P	103,7	99,3	96,1	92,7	87,1	80,6	75,8	70,5	64,3	57,5
SEL	25000	D	103,7	99,3	96,1	92,7	87,1	80,6	75,8	70,5	64,3	57,5
LA _{max}	10000	P	99,2	91,9	86,7	81	72,1	63	56,7	49,6	41,6	33,1
LA _{max}	25000	P	105,3	98,3	93,4	88	79,5	70,5	64,3	57,4	49,7	41,5
LA _{max}	25000	D	105,3	98,3	93,4	88	79,5	70,5	64,3	57,4	49,7	41,5

Fonte: Banco de dados do programa INM.

Observe que este modelo de banco de dados contém informações sobre o ruído (em dB) a dez distâncias diferentes de um ponto de observação de 200 a 25.000 ft.

O conjunto de dados NPD Normal consiste em duas ou mais curvas de ruído. A curva de ruído está associada à uma correção da força propulsora por parâmetro de máquina (em unidades de libra ou porcentagem) e dez níveis de ruído para cada dez distâncias: 200, 400, 630, 1.000, 2.000, 4.000, 6.300, 10.000, 16.000 e 25.000 pés.

O nível de ruído nesse conjunto de dados deve ser ajustado em função da variação do tempo de voo e velocidade da aeronave.

Os níveis sonoros na tabelas do INM são baseados em quatro métricas, SEL, LA_{max}, EPNL e PNTLM. A partir destas o INM calcula os níveis sonoros em

diversas outras métricas, como, por exemplo, DNL, TALA, LAeqD, LAeqN, entre outras.

A partir dos dados de entrada, o INM produz os contornos da exposição de ruído que são usados para avaliar o uso e ocupação do solo, calcula também níveis de ruído para diversas métricas em locais específicos, tais como: hospitais, escolas e outros locais sensíveis ao ruído.

Os contornos permitem a comparação entre os níveis sonoros gerados por tipos diferentes de avião e procedimentos de voo.

2.7 Os efeitos do ruído no homem

A percepção de sons no dia-a-dia é de grande importância para o bem-estar humano. O ruído apresenta um problema fundamental para a sociedade, e ainda produz efeitos adversos à saúde humana. Desta forma pode-se dizer que o ruído é um problema de saúde ambiental, que tem significativa contribuição para a perda da qualidade de vida. “A saúde não é somente a ausência de doenças, mas um estado completo de bem-estar físico, mental e social” (WHO, 1999).

Os efeitos do ruído são raramente catastróficos, e são muitas vezes transitórios, mas efeitos adversos podem ser cumulativos com a exposição prolongada ou repetida. Perturbação do sono, mascaramento da fala, perda auditiva induzida por ruído, perda de concentração na realização de uma tarefa ou lazer, prejudicam a qualidade de vida. Há também algumas evidências que o ruído pode afetar adversamente a saúde geral e o bem-estar da mesma maneira como *stress* crônico. (WHO, 1999).

Os efeitos não-auditivos podem ser classificados em fisiológicos ou de desempenho. Os efeitos fisiológicos, ainda podem ser classificados como temporários (de curta duração) ou permanentes (de longa duração). Os efeitos do ruído, como dilatação das pupilas, palpitações, tensão muscular, aceleração dos batimentos cardíacos, são considerados temporários. Em contrapartida, a redução na capacidade de concentração, falta de atenção e de memória, a perturbação do sono, a interferência na comunicação oral são considerados efeitos permanentes. No entanto, estes efeitos podem se manifestar em níveis de ruído que não prejudicam a audição.

Os efeitos adversos do ruído se manifestam não só através de mudanças fisiológicas e psicológicas, mas também através de mudanças no comportamento social do homem.

2.7.1 Efeitos do ruído aeronáutico no homem

Muitos estudos apontam a poluição sonora como a forma mais difundida de poluição no mundo atual e a relacionam com danos à saúde das pessoas. A Organização Mundial da Saúde (WHO, 2001) considera que há grupos da população mais vulneráveis ao ruído dos aviões, em comparação com a população geral, como as crianças, por exemplo, podendo ser associada: ao desempenho cognitivo, ao incômodo do ruído, às alterações no bem estar e à baixa motivação.

A exposição sonora ao ruído das aeronaves parece prejudicar a aprendizagem da leitura e reduz a capacidade de motivação, durante a infância. As evidências indicam que quanto maior a exposição, maior o dano. Por isso creches e escolas não devem ser localizadas perto das principais fontes de ruído, tais como rodovias, aeroportos e zonas industriais, e principalmente próximos de aeroportos.

A população adjacente a aeroportos, em geral, não corre risco de perda auditiva. Os principais problemas ocasionados para estas pessoas são o incômodo, a interferência na comunicação, interferência no sono, no aprendizado, dificuldade de concentração. A seguir, é feita uma análise mais detalhada sobre as conseqüências do mascaramento da fala, com efeitos mais acentuados durante o período diurno, e a interferência no sono, cujo impacto é maior durante o período noturno. O incômodo causado pelo ruído aeronáutico tem efeitos diferentes durante os períodos diurnos e noturnos.

2.7.1.1 Mascaramento da fala

Problemas como a concentração, fadiga, a incerteza e a falta de autoconfiança, irritação, mal entendidos, diminuição da capacidade de trabalho, dificuldades nas relações humanas, e uma série de reações ao *stress* causado pelo ruído foram identificados (Lázaro 1998 apud SOUZA, 2004). Especialmente vulneráveis a estes tipos de efeitos são os deficientes auditivos, os idosos, as crianças no processo de aquisição da linguagem e da leitura, e os indivíduos que não estão familiarizados com a linguagem falada.

Os sinais de fala constituem rápidas flutuações de pressão geradas pela voz, cuja maior parte da energia acústica está na faixa de frequências de 100 Hz e 6 000 Hz, sendo que o maior suporte de acústica está entre 300 e 3 000 Hz.

A interferência na fala é basicamente um processo onde um ruído perturbador está dificultando a compreensão da fala pelo ouvinte.

À medida que o nível de pressão sonora de um ruído perturbador aumenta automaticamente as pessoas levantam a voz para superar os efeitos devidos ao mascaramento na fala (aumento do esforço vocal). No entanto, o esforço de interpretação necessária para compensar o efeito de mascaramento da fala e para compreender o que foi dito, impõe uma tensão adicional sobre o ouvinte.

A inteligibilidade das mensagens orais em condições de vida cotidiana é influenciada pelo nível da voz do orador, distância entre orador e o ouvinte, níveis de pressão sonora do ruído perturbador, e até certo ponto de interferir outras características sonoras, por exemplo, reverberação.

Um dos resultados do mascaramento de um ruído pelo outro, é a interferência negativa na comunicação verbal. O mascaramento eleva o limite de audibilidade de um indivíduo devido ao ruído de fundo e diminui a inteligibilidade das mensagens orais.

Foram elaboradas diversas técnicas de avaliação da qualidade da comunicação na presença de ruído. Mas para uso prático, uma simplificação foi introduzida para avaliar a qualidade de um local para comunicação oral: O "NIC" (Nível de Interferência na Comunicação) ou "SIL" (*Speech Interference Level*), que é a média aritmética dos níveis sonoros para quatro faixas de oitavas 500Hz, 1000Hz, 2000Hz e 4000Hz.

$$SIL = \frac{L_{500} + L_{1000} + L_{2000} + L_{4000}}{4} \quad (6)$$

O NIC determinado no interior de um recinto pode ser utilizado como índice para avaliar a possibilidade de se estabelecer uma comunicação verbal, para se utilizar o telefone e, ainda, como elemento para determinar qual a redução necessária do nível para tornar possível uma inteligibilidade nas comunicações.

A tabela 2 e a figura 4 dão uma idéia da interpretação destes valores em SIL para avaliar a inteligibilidade na comunicação de acordo com a distância.

Tabela 2: Influência do ruído sobre a comunicação.

SIL	Distância limite para a conversação
40	5m
45	3m
50	2m
55	1m
60	0,5m

Fonte: Slama (2007)

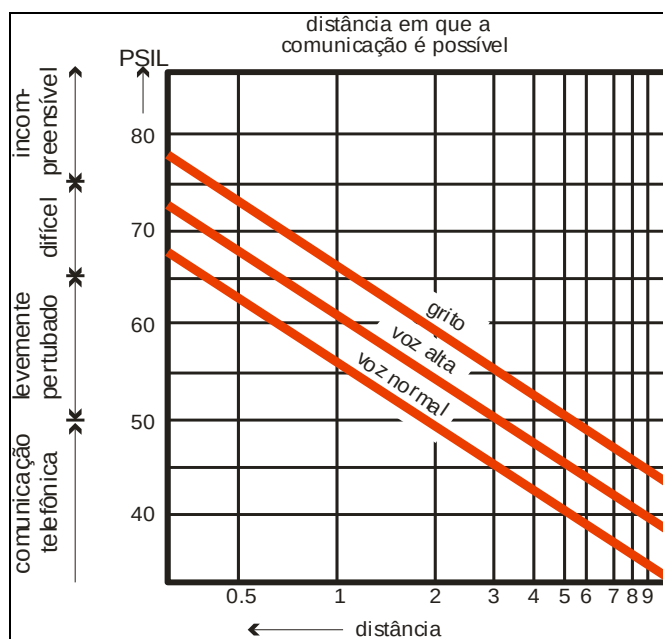


Figura 4: Influência do ruído sobre a transmissão da fala.

Fonte: Slama (2007)

Também pode ser avaliado o efeito do ruído sobre a comunicação oral através da utilização do nível de pressão sonora na escala A.

2.7.1.2 Interferência no sono

O efeito do ruído aeronáutico no sono é uma preocupação reconhecida de longa data daqueles interessados em determinar o impacto do ruído sobre as pessoas. (FICAN, 1997) e tem se tornado uma queixa comum das comunidades adjacentes ao aeroporto expostas ao ruído.

Os efeitos adversos não específicos a saúde têm sido claramente associada a distúrbios do sono, caracterizada tanto por despertar ou por alterações do sono [Pearsons, 1989].

A perturbação do sono é considerada indesejável e pode ser considerada um impacto causado pela exposição ao ruído. Segundo a FICAN, 1997, após uma noite de exposição ao ruído, podem ocorrer mudanças no humor e redução do desempenho no trabalho das pessoas.

O sono é um estado de repouso relativamente frágil que pode ser interrompido através de estímulos diversos, dentre os quais o ruído. Estima-se que 80 a 90% dos casos relatados de perturbação do sono em ambientes ruidosos estejam relacionados ao ruído ambiental (WHO, 1999).

A boa qualidade do sono é conhecida como uma condição essencial para o bom funcionamento fisiológico e mental das pessoas saudáveis (Hobson 1989 apud WHO, 1999).

O ruído noturno é principalmente, nocivo aos idosos e as pessoas que se encontram em desordem psíquica ou fisiológica (WHO), por esta razão é muito prejudicial a regiões com presença de hospitais e residências.

Os principais efeitos de perturbações do sono são: dificuldade em adormecer; despertar durante o sono, acordar cedo; sentimentos de insônia uma ou mais vezes por semana e alterações do sono ou estágios de profundidade, nomeadamente, a redução da proporção do sono. Outros efeitos fisiológicos induzido pelo ruído podem ser o aumento da pressão arterial, o aumento da frequência cardíaca, mudanças na respiração, arritmia cardíaca, aumento dos movimentos corporais, vasoconstrição (cf. Berglund & Lindvall 1995). Para cada um destes efeitos, a resposta pode ser diferente.

Os valores recomendados pela WHO, para interior dos quartos, são LAeq,8h igual a 30 dB e LAmax igual a 45 dB. Assim para um bom sono, acredita-se que os

níveis de pressão sonora não devem exceder um LA_{max} de 45 dB mais de 10 a 15 vezes por noite (Vallet & Vernet 1991apud WHO).

Em 1992, o FICON (*Federal Interagency Committee on Noise*) recomendou uma intercalação da curva dose-resposta para prever o percentual esperado da população despertada em função da exposição a níveis de ruído durante um único evento, expresso em termos de nível sonoro de exposição SEL. O relatório da FICON também recomendou a continuidade da investigação devido à reação da comunidade ao ruído das aeronaves, incluindo as perturbações do sono. A relação dose-resposta é apresentada na Figura 5, e pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\% \text{Despertares} = 0,00007079 \times SEL^{3,496}$$

Desde a aprovação da curva da FICON em 1992, uma importante investigação na área da perturbação do sono foi concluída, utilizando uma variedade de métodos de ensaio e em um número de localizações. Os dados a partir destes estudos mostram um padrão consistente, com menor percentagem da população exposta.

A FICAN (*Federal Interagency Committee on Aviation Noise*) em 1997 propõe a adoção de curva de dose-resposta, representada na figura 05, para prever o percentual de população despertada durante o sono devido à exposição sonora durante um evento único de pouso ou decolagem, determinada através do nível de exposição sonora (SEL), possibilitando assim a quantificação do efeito do ruído no homem. A relação dose-resposta proposta pela FICAN (1997) pode ser descrita através da seguinte equação:

$$\% \text{interrupção sono} = 0,0087 \times (SEL - 30)^{1,97} \quad (7)$$

A curva representa o limite superior dos dados analisados em campo, empregando a metodologia concebida por Schultz e Fidell (que será abordada mais adiante no capítulo 4) e deve ser interpretada como a previsão do "máximo da percentagem da população exposta despertada ou o" percentual máximo de despertados "para uma dada área residencial.

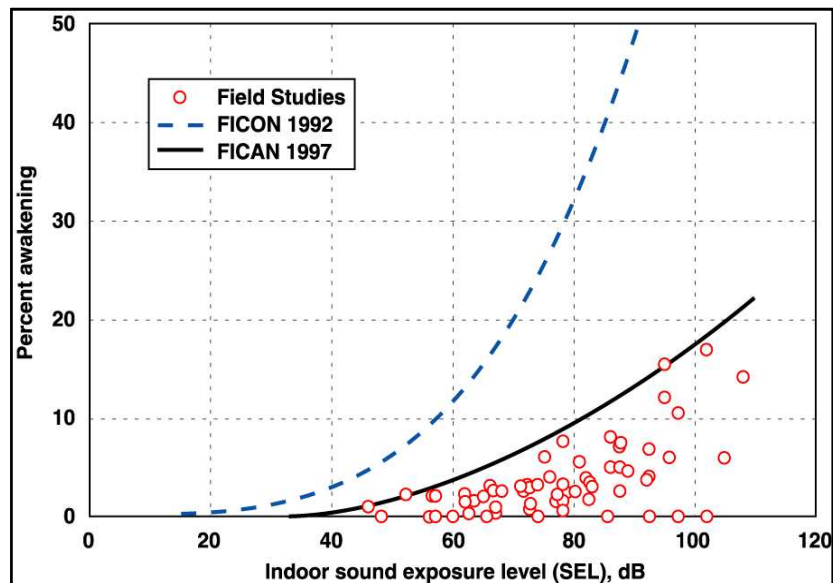


Figura 5: Percentual da população despertada durante o sono devido à exposição sonora durante um evento de pouso ou decolagem.

Fonte: FICAN, 1997

2.7.1.3 Incômodo sonoro

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

Uma definição para o incômodo sonoro é *“uma sensação de insatisfação associada a qualquer agente ou condição, conhecido ou acreditado por um indivíduo ou grupo ser responsável por afetá-los adversamente”* (LINDVALL e RADFORD; KOELEGA apud WHO, 1999).

SHAW menciona que “o incômodo sonoro está parcialmente associado a interrupção das atividades humanas por ruídos intrusivos, principalmente as atividades domésticas”.(1996, p. 113). No entanto, o termo incômodo refere-se às pessoas que sentem uma variedade de emoções negativas quando expostos a exposição sonora, e pode relatar raiva, decepção, insatisfação, impotência, depressão, ansiedade, distração, agitação, ou exaustão (Job 1993; Fields et al. 1997 1998).

O ruído pode produzir uma série de efeitos sociais e comportamentais em residentes, além do incômodo (Berglund & Lindvall 1995). Os efeitos sociais e comportamentais são muitas vezes complexos e sutis, que incluem mudanças nos padrões de comportamento quotidianos (por exemplo, fechando janelas, não utilizando varandas, rodando TV e rádio para altos níveis, petições por escrito, queixa às

autoridades); alterações adversas no comportamento social; alterações adversas nos indicadores sociais (por exemplo, mobilidade residencial, internações, o consumo, as taxas de acidentes) e alterações no humor (por exemplo, menos felizes, mais deprimidos).

Muitas pesquisas vêm sendo realizadas a fim de retratar as respostas da população ao ruído ambiental e os efeitos do ruído no homem. A partir destas pesquisas foi possível concluir que o incômodo representa a sinopse de uma variedade de efeitos do ruído aeronáutico sobre a comunidade exposta.

O incômodo sonoro apresenta grande subjetividade. O incômodo em populações expostas ao ruído ambiente não varia só com as características acústicas do ruído (fonte de ruído, níveis sonoros associados, amplitude e frequência das flutuações do nível, espectro sonoro), mas também com 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 menor incômodo. A correlação entre a exposição ao ruído e incômodo é muito mais elevada a nível geral ao nível individual, como seria de esperar.

De modo geral, as pessoas reagem diferentemente ao mesmo ruído. O ruído que incomoda uma pessoa pode ser imperceptível ou agradável para outra pessoa. A sensibilidade auditiva das pessoas com boa capacidade auditiva pode variar de 20 dB de uma pessoa para a outra. Segundo a FAA (1985), essa alteração na resposta é que torna difícil de avaliar a resposta comunitária, sendo praticamente impossível prever a resposta individual a uma determinada exposição sonora. Em geral, é mais apropriado avaliar a disposição de uma população a uma determinada resposta.

As diferenças individuais, a sensibilidade ao ruído de cada indivíduo faz com que alguns autores suponham que o grau individual de incômodo não é tão bom preditor de incômodo quanto o nível médio da população (MILLER, 1974).

No entanto, autores como Schultz (1978), consideram as reclamações generalizadas da população e a percentagem de pessoas altamente incomodadas bons indicadores de incômodo. Segundo a FAA (1985), “a percentagem da população

que se enquadra em uma determinada categoria de resposta pode ser o melhor indicador de impacto ambiental sonoro.”

2.8 Abordagem equilibrada: controle de ruído aeroportuário

Em dezembro de 2001, a 33ª Assembléia da ICAO através da Resolução A33/7 aprovou o conceito de Abordagem equilibrada (*balanced approach*) para o controle do ruído aeronáutico no entorno dos aeroportos. Esta Resolução consiste em identificar os problemas de ruído aeronáutico e analisar medidas possíveis que visem reduzir ruído através de quatro elementos principais.

- Redução de ruído na fonte.
- Planejamento e gestão do uso do solo.
- Procedimentos operacionais para atenuação do ruído.
- Restrições operacionais às aeronaves.

2.8.1 Redução de ruído na fonte

A redução de ruído na fonte consiste na redução da emissão sonora dos motores e dos ruídos aerodinâmicos das aeronaves. Este procedimento depende do avanço tecnológico de aeronaves mais silenciosas. Neste sentido, as recomendações da ICAO restringem o uso de aeronaves ruidosas e adotam o sistema de certificação de aeronaves em função do nível de ruído produzido.

Em 1971, sob o título de Anexo 16 à Convenção relativa à Aviação Civil Internacional – *Environmental Protection*, Volume I – *Aircraft Noise*, foi estabelecido o primeiro conjunto de normas e práticas recomendadas sobre o ruído e a certificação de aeronaves. Desta forma, antes que qualquer aeronave entre em operação, ela deve passar pelo processo de certificação, seguindo o Anexo 16.

O procedimento de certificação das aeronaves da ICAO classifica-as em capítulos de acordo com a emissão sonora. As aeronaves são classificadas da seguinte forma:

- NNC (*Non Noise Certificated*) – são as aeronaves não certificadas de acordo com o Anexo 16. Correspondem à primeira geração de aviões a jato fabricadas nas décadas de 50 e 60, são consideradas extremamente ruidosas como, por exemplo, o Boeing 707.

- Capítulo 2 – São as aeronaves fabricadas até outubro de 1977 e equipadas com a segunda geração de motores à reação e consideradas menos ruidosas que as aeronaves NNC (Boeing 727-100), que deveriam ser retiradas da frota global até abril de 2002, conforme previsto na Resolução A28-3, adotada pela ICAO.
- Capítulo 3 – São as aeronaves mais modernas e consideradas pouco ruidosas, como por exemplo, Boeing 737-300, Airbus 319, fabricadas a partir da década de 80.

Em junho de 2001, com base nas recomendações realizadas durante o 5º encontro do *Committee on Aviation Environmental Protection* (CAEP/5), a OACI adotou um novo capítulo padrão de ruído, o Capítulo 4, mais restritivo que o Capítulo 3. As aeronaves mais silenciosas, do Anexo 16 da ICAO, classificadas como Capítulo 4 reduziram de forma significativa o padrão de emissão sonora, se comparada às tecnologias anteriores (IAC, 2004).

2.8.2 Planejamento e gestão do uso do solo

Neste item aborda-se a redução da população submetida à exposição sonora decorrente do ruído aeronáutico através da restrição ou proibição do uso e ocupação do solo nas áreas adjacentes ao aeroporto. Nas regiões próximas aos aeroportos não é adequado o uso do solo para residências, escolas e hospitais, devido à alta exposição sonora. Entretanto, é aconselhável a implantação de áreas industriais ou comerciais nestes locais, por isso a necessidade de um planejamento do uso do solo.

A ICAO estabelece algumas recomendações quanto à gestão e uso do solo no entorno do aeroporto que devem ser adotadas pela legislação aeronáutica dos países membros, no volume I do anexo16, parte IV, e o *Airport Planning Manual, part 2 – Land Use and environmental Control* (DOC 9184).

Segundo a ICAO o número de pessoas afetadas pelo ruído de aeronaves depende da forma na qual é planejado e gerenciado o uso do solo no entorno de um aeroporto, e da forma como são controladas as construções residenciais e outras atividades sensíveis a ruído.

2.8.3 Procedimentos operacionais

Nesta ação, a abordagem equilibrada visa à atenuação da emissão de ruído a partir de medidas simples como: adoção de procedimentos de pousos, aproximações e decolagens a níveis de ruído reduzidos, e utilização de rotas e pistas preferenciais.

Alguns aeroportos possuem procedimentos operacionais próprios, que foram formalmente definidos de acordo com as diretrizes internacionais e aprovados pela *Federal Aviation Administration* (FAA), nos EUA. Neste sentido, cada aeroporto pode adotar um ou mais procedimentos, aplicáveis a cada cabeceira das pistas. A escolha de procedimentos a adotar depende da região onde está localizado o aeroporto. É possível escolher rotas que evitem o sobrevôo em áreas habitadas, no entanto, o clima e a topografia do local podem desfavorecer o uso destas rotas.

Segundo a ICAO, o procedimento operacional é uma das ações mais simples de aplicação e de custo relativamente pequeno, dependendo apenas das autoridades aeronáuticas, administração aeroportuária e empresas aéreas.

2.8.4 Restrições operacionais às aeronaves.

O último tópico da abordagem equilibrada visa à diminuição do ruído aeronáutico através da restrição operacional das aeronaves mais ruidosas. Este procedimento promove a redução nos níveis sonoros, na medida em que levam à limitação ou proibição de movimentos de aeronaves mais ruidosas em um aeroporto, possibilitando que este contenha ou reduza as áreas das curvas de ruído nas áreas adjacentes ao aeroporto. Entretanto, podem ter implicações econômicas para as companhias aéreas, aeroportos ou mesmo para a indústria aeronáutica.

A restrição à operação de aeroportos está relacionada ao seu horário de funcionamento. No Aeroporto de Congonhas é utilizado este procedimento durante o período noturno. O aeroporto fecha às 23:00 horas, funcionando apenas uma hora durante o período noturno.

Uma das restrições à operação de aeronaves consiste na retirada de operação parcial ou total das aeronaves muito ruidosas classificadas como Capítulo 2, principalmente durante o período noturno.

Dos quatro tópicos supracitados, o tópico da abordagem equilibrada que recebe maior ênfase é o planejamento e gestão do uso do solo. Será feita adiante uma discussão sobre o uso e ocupação do solo no entorno dos aeroportos, propondo um novo método de avaliação para o gerenciamento do uso do solo a fim de evitar o incômodo sonoro nestas regiões.

CAPÍTULO 3

LEGISLAÇÃO SOBRE RUÍDO EM COMUNIDADE E RUÍDO AERONÁUTICO NO BRASIL

A principal referência de legislação sobre ruído em comunidade é a Resolução CONAMA nº8 de março de 2000 que remete a norma ABNT NBR 10151. A legislação aeronáutica adotada está nos termos legais da Portaria 1141/GM5 do ministério da aeronáutica. Em seguida, abordam-se cada uma delas.

3.1 Resolução CONAMA Nº8 de março de 2000 E NBR 10.151 /2000

De acordo com a resolução CONAMA tem-se:

I - A emissão de ruídos, em decorrência de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política, obedecerá, no interesse da saúde, do sossego público, aos padrões, critérios e diretrizes estabelecidos nesta Resolução.

II - São prejudiciais à saúde e ao sossego público, para os fins do item anterior aos ruídos com níveis superiores aos considerados aceitáveis pela norma NBR 10.151 - Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas visando o conforto da comunidade, da *Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT*.

IV - A emissão de ruídos produzidos por **veículos automotores** e os produzidos no interior dos ambientes de trabalho, obedecerão às normas expedidas, respectivamente, pelo Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN, e pelo órgão competente do Ministério do Trabalho.

É importante observar que esta resolução não contempla os veículos automotores, dos quais as aeronaves fazem parte. Portanto, a redação desta resolução precisaria ser revista em relação ao ruído aeroportuário.

A NBR 10.151 baseia-se na avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto acústico da comunidade. Esta Norma fixa as condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidades, estabelece condições físicas para a medição de ruído, a aplicação de correções nos níveis medidos (de acordo com

a duração, característica espectral e fator de pico) e uma comparação dos níveis corrigidos, com um critério que leva em conta os vários fatores ambientais.

O método de avaliação envolve as medições do nível de ruído, na escala de compensação A, em decibel (comumente chamado dB (A)).

A NBR 10151 estabelece instrumentos para avaliar a influência sonora de atividades e em particular dos aeroportos sobre as cidades, já que fornece os níveis de ruído recomendáveis para áreas urbanas de acordo com o período do dia (noturno de 22h às 7h para dias de semana e 22h às 9h para domingos e feriados) e com as características da zona em questão; assim, a NBR10151 constitui-se um dos principais instrumentos para gestão e uso do solo.

A tabela 3 apresenta os níveis de ruído para cinco tipos de áreas urbanas e um tipo de área rural, totalizando seis áreas com usos e ocupações do solo distintos, definidas pela própria NBR 10.151.

Tabela 3: Critério de Avaliação NCA para ambientes externos, em dB(A).

Tipos de áreas	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Fonte: NBR 10151/ 2000

Segundo a NBR 10151 “o tempo de medição deve ser escolhido de forma a permitir a caracterização do ruído em questão” desta forma justifica a adoção do tempo de avaliação para o período diurno associado à métrica LAeqD e o período noturno associado à métrica LAeqN.

3.2 Portaria nº 1141/GM5

No Brasil, os estudos com a finalidade de identificar e proporem soluções aos conflitos gerados pela implantação e operação dos aeroportos foram iniciados na década de setenta, sendo, atualmente, de responsabilidade da ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil).

A Portaria 1141/GM5 (BRASIL, 1987), capítulo XII, estabelece o *Plano de Zoneamento de Proteção do aeroporto e o Plano de Zoneamento de Ruído (PZR)*, ambos relacionados à gestão e uso do solo nas regiões adjacentes ao aeroporto. As restrições com relação à poluição sonora gerada pela operação das aeronaves são estabelecidas pelo *Plano de Zoneamento de Ruído*, que é um documento normativo do Comando da Aeronáutica, estabelecendo restrições de uso do solo, com o objetivo de controlar o uso e ocupação do solo nos arredores do aeroporto, onde os níveis sonoros são bem altos.

O PZR se divide em *Plano Básico de Zoneamento de Ruído (PBZR)*, para aeroportos médios e pequenos, e *Plano Específico de Zoneamento de ruído (PEZR)*, para aeroportos grandes e com grande densidade de tráfego.

Nos dois casos o plano de zoneamento de ruído define duas curvas que delimitam três áreas, I, II e III.

Na área I ($DNL > 75dB(A)$) são permitidas a implantação, o uso e o desenvolvimento das seguintes atividades: produção e extração de recursos naturais, serviços públicos ou de utilidade pública (estação de tratamento de esgoto, reservatório de água ou cemitérios), comercial, recreação e lazer ao ar livre, transporte e indústrias, onde o nível de incômodo sonoro é potencialmente nocivo aos circundantes, podendo ocasionar problemas fisiológicos, devido às exposições prolongadas.

Na II $65dB(A) < DNL < 75dB(A)$ são proibidos o uso residencial, educacional, serviços públicos ou de utilização pública (hotel, motel, edificações para atividades religiosas, centros comunitários e profissionalizantes) e cultural (biblioteca, auditório, cinema e teatro). onde são registrados níveis de incômodo sonoro moderado

Todavia, o parágrafo único do Art.70 do *Plano de Zoneamento de Ruído* determina que mediante a aprovação do Departamento de Aviação Civil, na curva II, podem ser autorizadas as atividades mencionadas. O Art.71 determina que eventuais

restrições ao uso do solo, na zona III, decorrentes dos níveis de incomodo sonoro, serão estabelecidas em *Plano Específico de Zoneamento de Ruído*.

3.2.1 Plano Básico de Zoneamento de Ruído

O PBZR é estabelecido de acordo com a movimentação de aeronaves e do tipo de aeronaves, em função das normas de aproveitamento do uso do solo, nas áreas I, II e III, onde é determinado o tipo de atividade permitida, delimitadas a partir das Curvas Geométricas de Nível de Ruído 1 e 2. A figura 6 representa um modelo do PBZR.

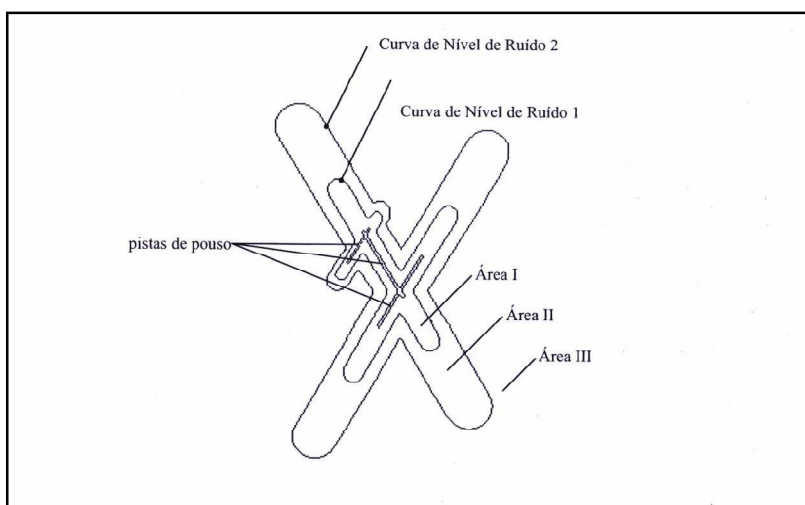


Figura 6: Representação esquemática de um Plano Básico de Zoneamento de Ruído.
Fonte: Portaria 1145 GM/5

3.2.2 Plano Específico de Zoneamento de ruído

O PEZR utiliza curvas de ruído específicas, considerando as características de movimentação e de aeronaves operantes em cada aeroporto. As restrições impostas a cada área definida pelo zoneamento também são específicas para cada caso. As curvas de ruído, cujos níveis sonoros são 65dB(A) e 75dB(A), são baseadas na métrica DNL. A figura 7 representa o PEZR do aeroporto de Congonhas.

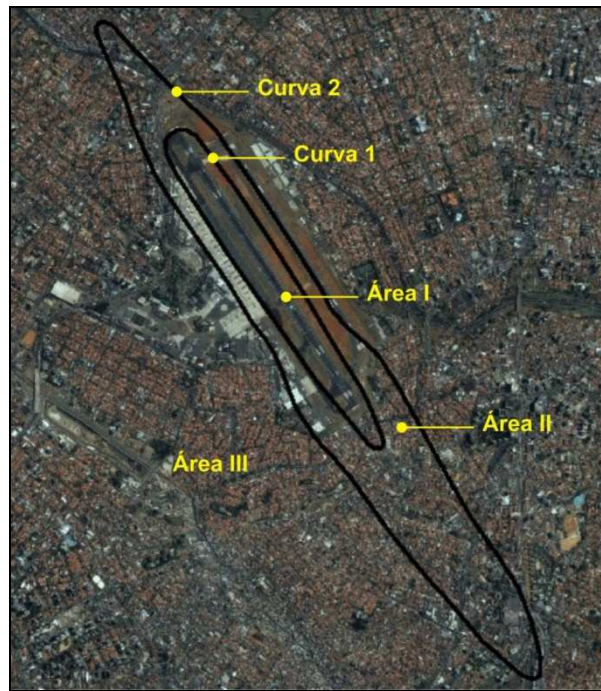


Figura 7: PEZR do aeroporto de Congonhas.
Fonte: GERA

3.3 Incompatibilidades entre a NBR 10151 e a Portaria 1141

Como se percebe, existem algumas incompatibilidades entre o PZR, regulamentado pela Portaria 1141, e os critérios de zoneamento definidos pela NBR10151.

- As métricas utilizadas para mensurar o ruído aeronáutico, é o DNL, enquanto que pela NBR 10.151 e, é o L(A)eq.
- O número de áreas estabelecidas para o zoneamento, pela Portaria 1141 e a NBR10151, é diferente. A portaria 1141 possui apenas três áreas, enquanto a NBR10151 possui seis tipos de áreas.
- Os níveis sonoros considerados.

Contudo, fica claro que o zoneamento utilizado pelo aeroporto e o zoneamento urbano são incompatíveis, gerando assim grandes conflitos no uso e ocupação do solo nas regiões próximas ao aeroporto.

O aeroporto de Congonhas é um típico aeroporto com problemas de zoneamento, após sua instalação a região foi densamente ocupada, de forma legal,

gerando problemas de ruído e segurança de voo. Infelizmente, o aeroporto de Congonhas não é o único que apresenta problemas de zoneamento.

CAPÍTULO 4

RELAÇÃO ENTRE DNL E INCÔMODO

A síntese da relação entre a exposição de ruído de transportes e a predominância do incômodo nas comunidades, foi publicada por Schultz em 1978, no trabalho intitulado "*Synthesis of social surveys on noise annoyance*". Este artigo tem se tornado um suporte para pesquisas sobre os efeitos da exposição aos ruídos nas comunidades. E os resultados dessa síntese contribuíram para promover uma representação das respostas para o nível médio de ruído, através de uma função curvilínea relacionando os níveis sonoros na métrica DNL com o percentual de população altamente incomodada, que resume os dados de incômodo referentes às pesquisas sociais realizadas. E ainda, serviu de impulso considerável para posterior investigação.

Os trabalhos de Schultz demonstraram que os resultados das pesquisas realizadas em diferentes cidades sobre os efeitos do ruído de aeronaves de superfície podem ser interpretados sob a forma de uma relação dose-efeito.

Os procedimentos das pesquisas originais se basearam no estudo de fontes de ruído de transportes (aéreo, ferroviário, rodoviário); e na divisão da vizinhança significativamente impactada pelo ruído em áreas adjacentes, uniformemente expostas ao ruído em diferentes graus. As respostas subjetivas foram medidas em uma escala de "não incomodado" a "muitíssimo incomodado" seja por causa da diferença entre as distâncias à fonte ou por causa dos diferentes volumes de tráfego; na condução de entrevistas para determinar se, e quanto, os habitantes foram incomodados pelo ruído, e em alguns casos, quais as atividades prejudicadas.

4.1 Relação entre o DNL e a percentagem de pessoas altamente incomodadas

Baseando-se nos dados dos levantamentos sociais, Schultz propôs uma equação - "a mais comum disponível estimativa de incômodo público devido a fontes de transporte de todos os tipos", relacionando o percentual das pessoas altamente incomodadas (% HA) e a métrica DNL. Schultz usou uma função polinomial de terceira ordem para descrever e agrupar suas pesquisas originais uma aproximação informal, em vez de uma relação derivada de análises de regressão linear. Através desta

equação é possível então estimar o número de pessoas altamente incomodadas quando expostas por um determinado nível de ruído.

$$\%HA = 0,8533DNL - 0,0401 DNL^2 + 0,00047DNL^3 \quad (8)$$

Na qual:

% HA = percentual da população altamente incomodada;

DNL= day-night sound level.

A relação entre a métrica DNL e o percentual de pessoas altamente incomodadas foi estudada pela primeira vez por Schultz. A curva média apresentada na figura 08 é uma expressão razoável da relação entre exposição ao ruído de transportes e resposta da comunidade.

Segundo Schultz, o termo "altamente incomodado" corresponde a 27%-29% da escala de incômodo utilizada, para que os respondentes pudessem indicar diretamente o seu grau de incômodo. Esta regra básica foi modificada de acordo com o julgamento pessoal do autor, em alguns casos, na análise inicial dos dados.

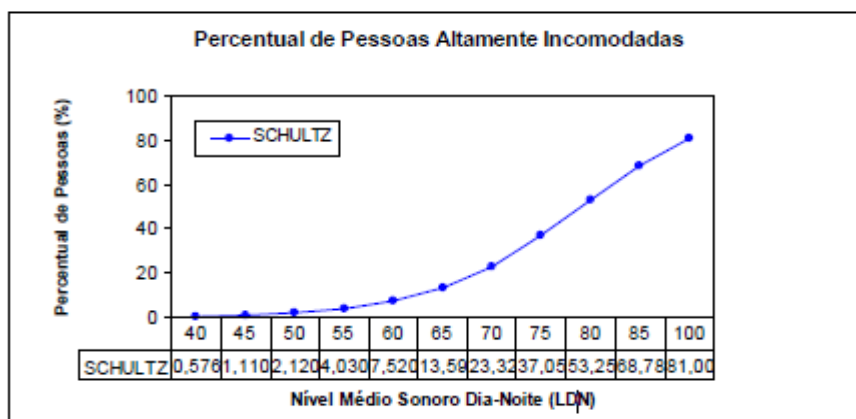


Figura 8: Relação de pessoas altamente incomodadas e a métrica DNL.
Fonte: Schultz, 1976.

Desta forma, este gráfico possibilita quantificar o percentual de pessoas altamente incomodadas de acordo com o nível de exposição sonora sobre a comunidade. A metodologia para calcular o número de pessoas altamente incomodadas consiste em dividir a população em grupos (classes) de acordo com exposição sonora (nível por tempo de exposição sonora). Em cada grupo foi encontrado o número de pessoas altamente incomodadas a partir da multiplicação do número de pessoas da classe pelo percentual de pessoas altamente incomodadas na

mesma classe. Somam-se assim os números das classes para obter o total de pessoas altamente incomodadas.

Esta metodologia foi utilizada por diversos países do mundo. A tabela 4 apresenta os valores da percentagem da população altamente incomodada pelo ruído, adotada por agências internacionais (EPA – *Environmental Protection Agency*, OECD – *Organization for Economic Cooperation and Development*, NRC-National Research Council) permitindo uma quantificação do impacto ambiental sonoro.

Tabela 4: Percentual de pessoas altamente incomodadas segundo algumas agências internacionais.

Nível de Ruído	Percentual de %HAP das agências		
DNL	EPA	OECD	NRC
50	7,2	0	2, 259
55	16,2	10	4, 577
60	25,2	20	8, 672
65	34,2	30	15, 173
70	43,2	40	24, 493
75	52,2	50	36, 866

Fonte: EPA, OECD, NRC.

4.2 O contexto da análise de Schultz.

A preocupação com o transporte aéreo nos Estados Unidos se deu com a introdução de aviões a jato em bases militares no início dos anos 1950, levando à publicação de estudos iniciais científicos sobre exposição de populações ao ruído de aeronaves e as respostas das comunidades no entorno do aeroporto. Os altos níveis de emissões de ruído de avião a jato, e a expansão do número de operações de voo provocaram reações adversas fortes em comunidades perto de bases aéreas militares e aeroportos civis. As comunidades afetadas começaram a pressionar as autoridades aeroportuárias a estabelecer restrições com relação ao ruído.

Nos anos 1970, o aumento do ruído de tráfego de estrada levou a estudos amplos de relações entre parâmetros de fluxo de tráfego, emissões de ruído, e reação da comunidade. Em 1972, nos E.U. A, foi decretado o art. de 1972, que consistia em uma legislação de confirmação de ordem nacional devido à preocupação dos efeitos da exposição sonora à comunidade, a fim de controlar o ruído e elaborar um programa de compatibilidade do uso do solo.

Desta forma, o trabalho de Schultz iniciou-se em 1976, através de um contrato com o Departamento de Estados Unidos de Moradia e Desenvolvimento Urbano (HUD) para desenvolver projetos consistentes em relação ao grau de exposição ao ruído.

Até então, a abordagem para caracterização da reação adversa na comunidade de ruído das aeronaves havia sido centrada na previsão de reclamação ostensiva, queixas, e consequências comportamentais.

Rosenblith et al. (1953) e Stevens et al. (1955) idealizaram um quadro para interpretação dos resultados de 20 estudos de casos antigos da reação da comunidade ao ruído das aeronaves. Nessa avaliação, levaram em conta desde queixas esporádicas até generalizadas, ameaças de ação comunitária e ação vigorosa da comunidade. A Figura 09 resume a relação que Rosenblith et al. inferida a partir de seus estudos de caso.

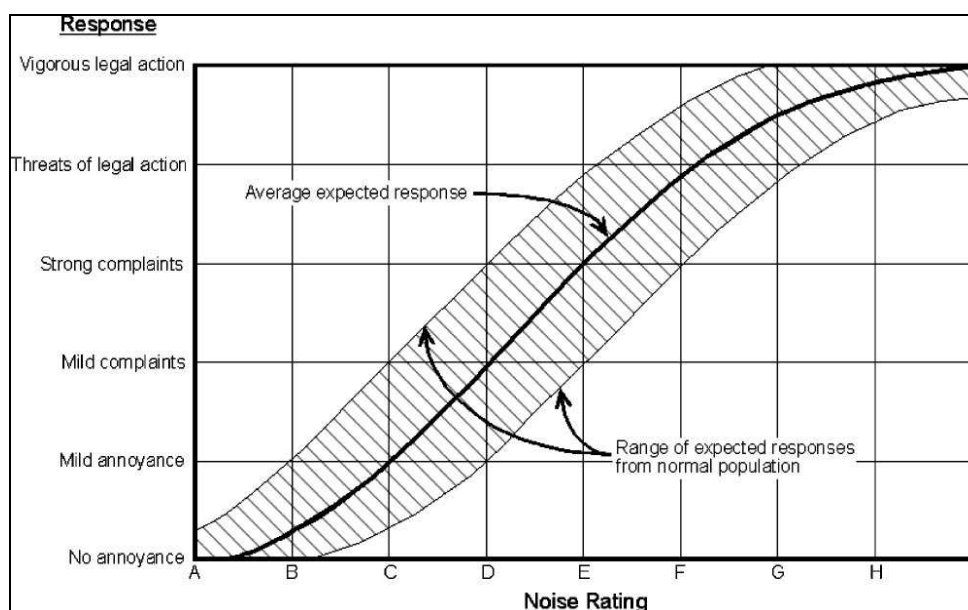


Figura 9: Relação entre a avaliação de ruído na comunidade e as consequências do comportamento predito devido à exposição ao ruído ambiental

Fonte: Rosenblith et al., 1953.

A Agência de Proteção Ambiente (EPA), entretanto, não relacionou os efeitos do ruído à saúde das pessoas, restringindo-se apenas à interferência nas atividades ou incômodo. E usou o termo “reação da comunidade” referindo-se a queixas.

A Figura 10 é uma tentativa de relacionar os dados de queixas e incômodo com as informações de dados de exposição ao ruído através da informação antecipada da relação dose-efeito, e ilustra uma interpretação dada ao incômodo a partir dos níveis sonoros em DNL no momento da publicação. Através de uma regressão linear a partir dos dados de levantamentos sociais no entorno do aeroporto, a EPA desenvolveu uma função correlacionando resposta da população e níveis de ruído para o cálculo da percentagem de pessoas incomodadas, através da equação 9.

$$\%HA = 1,8 (DNL - 46) \quad (9)$$

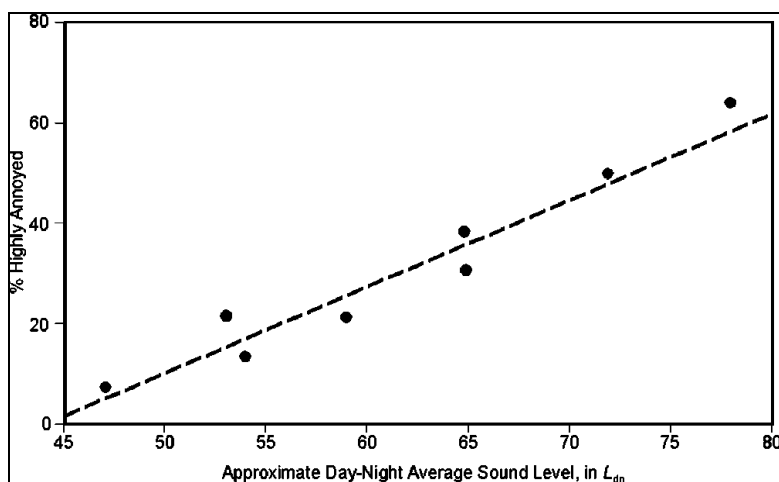


Figura 10: Estimativa antecipada da relação entre a exposição ao ruído acumulado e a prevalência de aeronaves induzida por ruído causando incômodo.

Fonte: EPA, 1974.

O relatório suplementar da EPA sintetizava os resultados destas pesquisas mais recentes, mas não era suficiente para a interpretação necessária dos dados da pesquisa social para base de identificação dos níveis sonoros seguros nesta informação.

Em outras palavras, a EPA de 1974 fundamentou-se na identificação de níveis sonoros para proteger a saúde pública e o bem-estar, baseando-se na interferência da fala e em queixas em vez de incômodo. Assim os níveis identificados refletem primeiramente resultados de pesquisas na reação da comunidade (queixas) e interferência na fala.

4.3 Influências a partir das análises de Schultz

Aproximadamente uma década após a publicação da curva de Schultz, Fidell, Barber e o próprio Schultz propuseram uma atualização da curva original. O resultado desta grande atualização de dados foi a inclusão de um adicional de 292 pontos de dados para o original pesquisa 161 pontos de dados para um total de 453 pontos de dados.

Isto resultou em quase triplicação da base de dados disponíveis para prever o incômodo devido à exposição ao ruído devido a fontes de transporte, em comparação a curva original de Schultz. Em sua atualização de dados, Fidell et al. optou por utilizar uma função quadrática ajustada para descrever estes dados.

A figura 11 compara a função de terceira ordem polinomial de Schultz (1978) com uma função ajustada de segunda ordem para todas os 453 pontos dos dados. Como pode ser visto a diferença do ajuste quadrático em relação aos novos aspectos dos dados é de alguns decibéis acima (em torno de 4dB acima no valor DNL de 57.5 dB, e em torno de 1.5 dB acima num valor DNL de 70 dB), indicando maior incômodo que os relatos de 1978.

$$\%HA = 78,9181 - 3,2645DNL + 0,0360DNL^2 \quad (10)$$

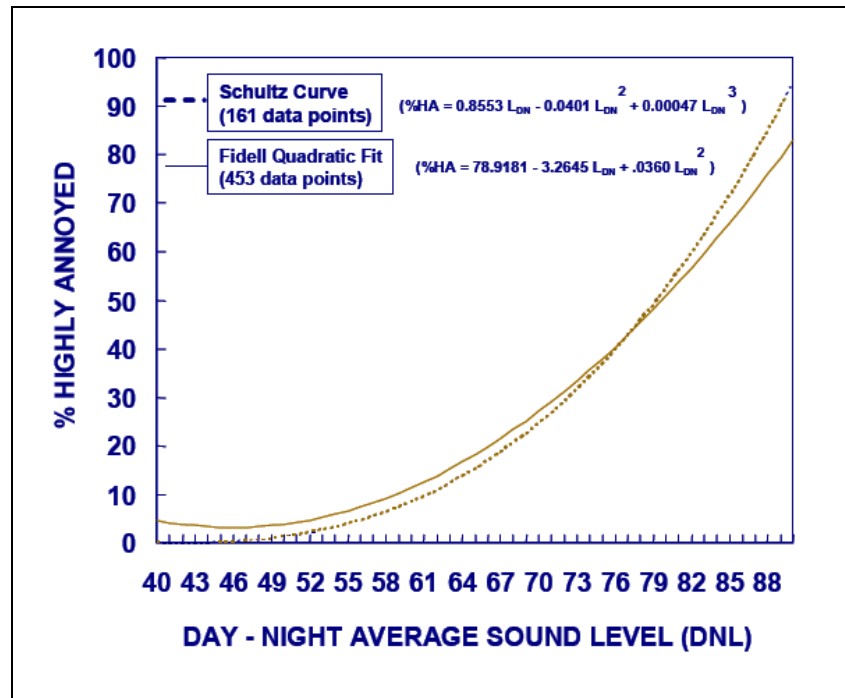


Figura 11: Curva de Fidell *et al*, comparada a curva original de Schultz.
Fonte: Fidell *et.al*, 1988.

Apesar de um número relativamente grande de pesquisas, cada uma contribui com um número pequeno de dados, por isso é improvável produzir uma mudança significativa na relação dose-efeito.

Finegold *et al.* reanalisou os dados de Fidell *et al.* e publicou os resultados desta nova meta-análise. Finegold *et al.* recomendam a seguinte equação para a previsão do incômodo, baseada no final 400 pontos de dados, e a relação dose-efeito é apresentada na figura 12.

$$\%HA = \frac{100}{1 + e^{(11,13 - 0,14 DNL)}} \quad (11)$$

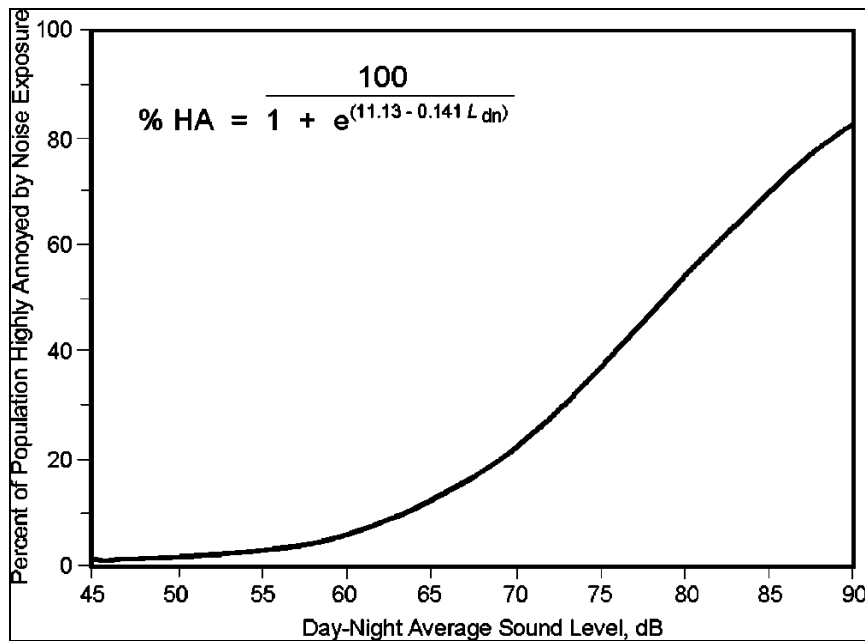


Figura 12: Curva adotada pela FICON para avaliar o percentual de pessoas altamente incomodadas.
Fonte: FICON, 1992.

Esta equação foi aprovada pela FICON para avaliar o impacto ambiental devido ao ruído de aeronaves e foi recomendado para prever os efeitos do ruído transporte sobre as pessoas.

O segmento da função polinomial apropriada de terceira ordem identificada por Schultz (1978) foi capaz de avaliar apenas dentro da restrição dos valores da exposição sonora. A forma ogival da relação da FICON foi favorecida em partes para um comportamento assintótico em baixos e altos níveis de exposição sonora, e em partes para controlar o 'amplo joelho' que está localizada na curva da abscissa. Em DNL = 65dB a curva na figura 12 mostra o incômodo prevalente, uma taxa de 12.3%, a menos que a definição de significância seja auto-evidentes.

Uma crítica comum da relação é que ela comprovadamente subestima a prevalência de incômodo devido ao ruído das aeronaves. Parte desta subestimação ocorre em virtude da forma funcional da relação, e para a gama dos valores do risco sobre a qual a relação foi desenvolvida. Outra fonte de subestimação é a sua falta de fonte especificidade.

No entanto, não se pode negar que conclusão de Schultz prevê uma relação razoável entre a exposição ao ruído de transporte e resposta da comunidade, pois sobreviveu a maioria das controvérsias e seu trabalho é amplamente aceito na literatura.

É importante notar que a relação sintetizada por Schultz não se aplica a previsão do incômodo de alta energia a exposição ao ruído impulsivo, e Schultz tem em mente que a função que ele apresentou não pode ser usada fora da gama de 45 dB <DNL <85 dB.

4.2 Problemas na análise de Schultz

Embora a abordagem de Schultz eventualmente fosse encarada como o conhecimento cientificamente convencional, o seu estudo permaneceu com controvérsias durante anos (cf. Kryter, 1982).

As pesquisas têm se baseado fortemente na curva de Schultz para a predição do incômodo na comunidade produzido por fontes de ruído de transporte. Apesar das questões metodológicas, erros de medição quanto à exposição ao ruído e ao incômodo, diferenças na interpretação dos dados, bem como a subjetividade das respostas da comunidade, ainda assim a relação de Schultz é a mais recomendada para avaliar o incômodo devido ao ruído de transporte. No entanto, ressalta-se aqui, alguns problemas da curva de Schultz.

Inicialmente, devido às pesquisas terem sido realizadas em várias métricas para avaliar o incômodo, Schultz teve muitos problemas com os detalhes de conversões de diferentes métricas para os níveis sonoros expressos em DNL. E ainda encontrou falhas na adoção de sua própria definição de incômodo (em vez de interferência da fala ou do sono, ou reclamações) como a variável dependente da sua relação dose-efeito.

Schultz decidiu usar sua avaliação pessoal para determinar em que ponto cada escala corresponderia a “altamente incomodado”; No entanto, as críticas dos sociólogos foram bastante severas em relação ao procedimento de Schultz, acusando-o de forçar os resultados, e ainda questionou-se a falta de definição científica para o termo “altamente incomodado”, o que impediria a repetição do procedimento por outro pesquisador com os mesmos resultados.

Segundo EPA (1974) a percentagem de pessoas *altamente incomodadas* é preferivelmente utilizada, ao invés da percentagem das pessoas incomodadas, devido a uma série de razões. Uma dessas razões, e talvez a mais importante, é que

quando as pessoas são altamente incomodadas pelo ruído, os efeitos das variáveis não acústicas são reduzidos e a correlação entre exposição do ruído e a reação subjetiva expressa é alta. Isso não significa que as pessoas possuem a mesma susceptibilidade ao ruído. Assim dentre um mesmo grupo de pessoas expostas ao ruído ambiental, segundo FIELDS (apud WHO, 1999), este ruído varia de acordo com as características acústicas – fonte e exposição, e com fatores não-acústicos de natureza social, psicológica ou econômica, como medo associado à fonte geradora do ruído, convicção de que o ruído poderia ser reduzido pelas autoridades, sensibilidade individual ao ruído e se o ruído é originário de uma importante atividade econômica. Desta forma, numerosas variáveis acústicas ou não – acústicas, modulam os índices de incômodo.

Segundo a WHO (1995) outros autores afirmam que esse critério de percentual de pessoas altamente incomodadas (%HA) possui inerentes problemas metodológicos, listados abaixo:

- a seleção dos efeitos variáveis reais (sentimento de incômodo, distúrbio na comunicação, danos à saúde física), assim como o empregado ponto de divergência (não perturbado, perturbado ou fortemente perturbado, etc.) basicamente são arbitrários, podem ser manipulados e também afetar a forma da relação dose-efeito;
- os critérios respostas, particularmente os sócio-psicológicos, não são independentes do contexto acústico;
- os índices baseados em média ignoram a variância individual. Eles são justificados para alguns propósitos, mas se utilizados dentro da relação dose-efeito o prognóstico das respostas individuais ao ruído irão ser fortemente superestimadas.

Outros estudiosos se opuseram a sua preferência de uma relação única para sintetizar as fontes de ruído de transportes. A curva de Schultz representa as respostas da comunidade para o nível médio das três fontes de ruído de transportes: aeronáutico, ferrovias e rodovias, ou seja, a relação de pessoas altamente incomodadas e o DNL é a mesma para as diferentes fontes de ruído de transportes. Mas será que o incômodo causado por diferentes fontes de ruído de transportes é o mesmo?

As mais recentes análises foram realizadas por Miedema et al, a partir de dados recopilados de um grande banco de dados de inquéritos social publicados, mostraram um maior nível de comunidade incomodada em resposta ao ruído das aeronaves do que ao ruído proveniente de outras fontes de transporte terrestres.

Miedema e Vos analisaram o incômodo causado pelo ruído de transporte separadamente, relacionando a percentagem de pessoas altamente incomodadas e o DNL para cada fonte de ruído de transporte, como representado na figura 13. Estas curvas mostram uma sistemática diferença entre as três fontes de ruído de transporte. Em geral, o ruído aeronáutico causa um incômodo muito maior que o ruído de rodovias e ferrovias.

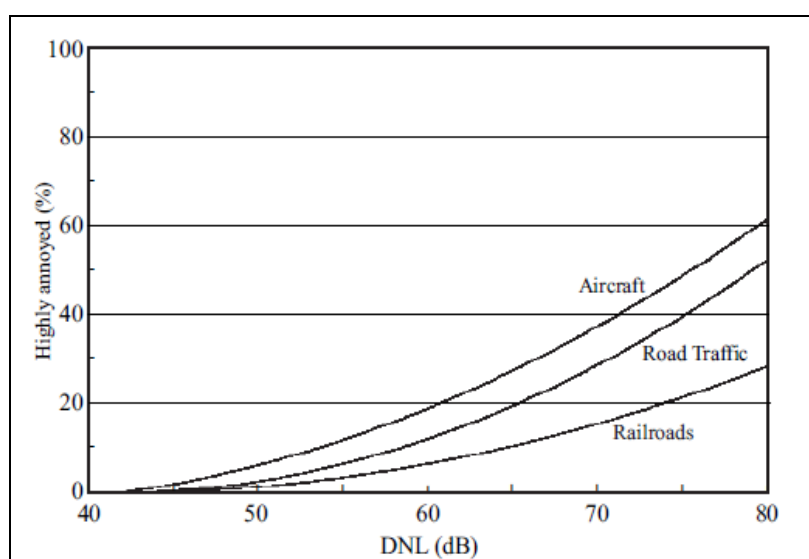


Figura 13: Relação das pessoas altamente incomodadas e o DNL para cada fonte de ruído de transporte.

Fonte: Miedema e Vos, 1998.

Miedema e Vos também consideraram três funções quadráticas distintas no lugar de uma simples função generalizada para todos os tipos de ruído de transporte. As funções representam a relação entre o percentual de pessoas altamente incomodadas e o DNL para as fontes de ruído de transportes, aeronáutico, rodoviário e ferroviário respectivamente:

$$\%HA = -1,395 \times 10^{-4}(DNL - 42)^3 + 4,081 \times 10^{-2}(DNL - 42)^2 + 0,342(DNL - 42) \quad (12)$$

$$\%HA = 9,994 \times 10^{-4}(DNL - 42)^3 - 1,523 \times 10^{-2}(DNL - 42)^2 + 0,538(DNL - 42) \quad (13)$$

$$\%HA = 7,158 \times 10^{-4}(DNL - 42)^3 - 7,774 \times 10^{-3}(DNL - 42)^2 + 0,163(DNL - 42) \quad (14)$$

Estes são os principais problemas encontrados na análise de Schultz, e que já foram bastante criticados. Ainda assim, pode-se apontar mais um problema na análise de Schultz relacionada ao uso da métrica DNL para avaliar o incômodo causado pelo ruído ambiental. E neste estudo será usada apenas a fonte de transporte aéreo.

Como já foi dito, o DNL é uma média de energia sonora produzida por todos os eventos aeronáuticos ocorridos durante um período de 24 horas. O incômodo sonoro causado durante o período diurno e noturno é diferente, não podendo ser tratado da mesma forma. Mesmo com a penalidade de 10dB(A) durante o período noturno, ainda não é suficiente, pois o incômodo continua sendo constante.

Desta forma, o DNL não é uma boa métrica para o zoneamento, 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. O uso do DNL para o zoneamento aeroportuário pode conduzir a resultados diferentes dos níveis sonoros diurnos e noturnos dependendo do número de operações do aeroporto no período diurno e noturno, como será abordado mais à diante.

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

CAPÍTULO 5

O *ENCROACHMENT* NO ENTORNO DOS AEROPORTOS BRASILEIROS

Este capítulo faz uma análise do crescimento da área demográfica nas áreas adjacentes aos aeroportos e apresenta a metodologia utilizada pelo CAEP para controlar o *encroachment* no Brasil, e ainda apresenta um diagnóstico do *encroachment* no entorno dos aeroportos de Congonhas e Recife.

5.1 O *encroachment*

No contexto deste trabalho o *encroachment* pode ser considerado como a existência de uma população significativa submetida aos efeitos adversos do ruído do aeroporto, mesmo fora das áreas de restrição de uso estabelecidas pelo zoneamento aeroportuário.

O *encroachment* está relacionado ao uso de um zoneamento inadequado para o ruído aeroportuário. No caso geral, o *encroachment* pode ser relacionado à inadequação do zoneamento aeroportuário baseado numa métrica única sobre 24 horas o DNL (métrica inadequada e valor inadequado para elaboração das curvas de ruído). No caso do Brasil, a incompatibilidade entre a legislação urbana associada à Norma NBR10151 - Resolução CONAMA de 2000 - e a legislação aeroportuária também induz ao *encroachment*. Ele pode ocorrer em duas situações:

A primeira situação é área $DNL > 65dB(A)$. Neste caso o problema se deve a inadimplência com relação à legislação. As pessoas ocupam a área 2 de forma irregular, em relação à legislação aeronáutica.

A segunda situação para ocorrer *encroachment* é na área $DNL \leq 65dB(A)$ devido à inadequação da métrica adotada para o zoneamento aeroportuário.

Observa-se que, apesar de um zoneamento realizado de uma forma compatível à legislação aeroportuária baseada na métrica DNL, existem populações

situadas na região onde o uso residencial não é proibido pela legislação aeroportuária e os efeitos adversos do ruído são percebidos. Isto pode ser atribuído a uma falha do zoneamento aeroportuário. Por isso é interessante buscar uma maneira alternativa de zoneamento nesses locais.

Uma direção de trabalho consiste em utilizar uma metodologia de zoneamento aeroportuário inspirada pelo zoneamento urbano, a fim limitar o *encroachment* a condições aceitáveis. Desde 2002 o CAEP (*Committee on a Aviation Environmental Protection*) vem focando nesse sentido, através de exigências de contenção do ruído de aeronaves, procedimentos operacionais, planejamento do uso do solo e políticas que restringem certos tipos de aeronaves de operarem. Seu objetivo é de mitigar os efeitos adversos do ruído aeronáutico sobre a saúde e bem-estar das pessoas que vivem nas proximidades dos aeroportos.

Com isso, o CAEP vem realizando um estudo sobre o *encroachment* no entorno de aeroportos, porém baseou-se apenas na verificação do crescimento de domicílios dentro de uma determinada curva de acordo com o censo realizado em 2002.

5.2 Análises do *encroachment* segundo o CAEP

A gestão e planejamento do uso de solo é um dos principais elementos da abordagem equilibrada, assim o número de pessoas expostas à poluição sonora depende da forma em que o uso do solo é planejado e gerenciado no entorno do aeroporto. O crescimento da população nesta área pode ser limitado pela utilização adequada do solo. Baseados nestas condições a Resolução A33/7 auferiu a adição de um novo apêndice F “Planejamento e gestão do uso do solo” ao Anexo 16. Este enfatizou a necessidade de adotar medidas apropriadas de planejamento e gestão do uso do solo e atenuação do ruído para prevenir o *encroachment* nas áreas adjacentes aos aeroportos.

Segundo o CAEP (2004) o termo *encroachment* é utilizado para descrever o crescimento residencial em áreas que são "incompatíveis" ou "potencialmente incompatíveis" com ruído das aeronaves. A incompatibilidade é definida de acordo com os níveis da exposição sonora estabelecidos. Assim, a análise é feita de acordo com as curvas de ruído em DNL estabelecidas pela Portaria 1141.

O CAEP questionou aos países membros¹ sobre o conceito de um contorno de ruído, no que tange às autoridades que têm a responsabilidade de verificar a existência do mesmo, e ainda, se existem dados históricos do crescimento da população dentro dos contornos de ruído ao longo do tempo.

Os exemplos fornecidos pelo Brasil, Japão, Reino Unido e EUA ao CAEP continham informações sobre o crescimento da população ao longo do tempo. O Brasil e Japão apresentaram as suas informações monitoradas de acordo com as curvas de ruído, tal como descrito no *Manual de Planejamento do Aeroporto*. O Reino Unido e os EUA apresentaram mudanças na população em que acompanhou a evolução dos contornos ao longo do tempo, que em geral estavam retrocedendo.

Estes estudos representam apenas as tendências da população e da habitação separadamente, no entanto, podem ser utilizados para demonstrá-lo a partir de análises mais detalhadas no entorno dos aeroportos, em função de outras métricas, como o LAeqD e LAeqN, para melhor contabilizar as pessoas submetidas aos efeitos adversos do ruído.

5.3 A metodologia utilizada no Brasil para avaliar o *encroachment*.

No Brasil, desde 1984, o desenvolvimento em áreas adjacentes aos aeroportos é controlado pelo *Plano de Zoneamento Ruído de Aeroportos*, que define as duas curvas de ruído para os níveis em de 65 e 75 dB (A). O plano consiste na elaboração de curvas de ruído e determinação do uso do solo dentro dos contornos compatíveis ao uso do solo. Estes são oficialmente aprovados pela Aviação civil Brasileira e refere-se à implementação do governo local.

Desta forma, a metodologia utilizada no Brasil para analisar o *encroachment* é baseada no *Plano de Zoneamento de Ruído do Aeroporto*. E o *encroachment* é definido como a percentagem do aumento de residências, entre os dois anos analisados (1992 e 2002), no interior de cada área, de acordo com os limites do Plano de Zoneamento de Ruído do Aeroporto.

¹ Países membros que fazem parte do CAEP: Estados Unidos, Inglaterra, Alemanha, Japão, Portugal, Brasil, entre outros.

Um aumento no número de unidades habitacionais foi determinado como um indicador de *encroachment*, sendo que as mudanças no número de unidades habitacionais são bons indicadores de que a população cresceu.

O cálculo do *encroachment* é de acordo com os seguintes passos:

Passo 1: Definição dos anos (BY e CY)

Passo 2: Coleta dos seguintes dados nas áreas adjacentes ao aeroporto para os anos mencionados no passo 1.

- a) Contorno de ruído;
- b) Número de domicílios inclusos no contorno;
- c) Mapas.

Passo 3: Cálculo para cada nível de ruído:

$$\text{Encroachment (\%)} = \{(HCY - HBY) / HBY\} \times 100$$

Na qual:

HCY – é o número de domicílios no interior da curva de ruído no ano comparativo (CY);

HBY – é o numero de domicílios no interior da curva de ruído no ano base (BY).

Passo 4: Avaliação dos resultados numéricos

5.4 O *encroachment* nos aeroportos brasileiros

Vários aeroportos do Brasil já estão cercados pela comunidade, e as pessoas que residem nestas áreas estão submetidas significativamente aos efeitos adversos do ruído. Apesar de existirem outros lugares em que se verifica o problema, os Aeroportos de Congonhas e Recife, são os casos mais sérios. Os dois aeroportos apresentam características bem diferentes.

Antes de prosseguir o estudo, porém, é importante conhecer as características dos aeroportos, e as áreas adjacentes aos aeroportos de Congonhas e Recife.

Caso de Congonhas

O Aeroporto Internacional de Congonhas é o segundo mais movimentado aeroporto do Brasil. Está localizado na zona sul da cidade de São Paulo, rodeado por quatro bairros populosos: Santo Amaro, Moema, Saúde e Jabaquara.

O aeroporto é composto de 2 pistas de pouso e decolagem:

- Pista 17R/35L, com 1.940 m de comprimento e 49 m de largura,
- Pista 17L/35R, com 1.435 m de comprimento e 49 m de largura.

O aeroporto foi construído numa área despovoadas, que foi gradativamente sendo ocupada devido ao crescimento da cidade, e por aquela região oferecer boas condições (infraestrutura, escolas, hospitais, comércio). Atualmente, o aeroporto possui uma área densamente habitada no seu entorno.

A ocupação do entorno do aeroporto é predominantemente residencial, o que, desde a década de 1970, tem causado problemas devido às queixas da comunidade em virtude do ruído.

Desta forma, há constantes reclamações de ruído aeronáutico nas áreas internas às curvas de ruído 1 e 2, considerando que a Lei de Zoneamento da Cidade de São Paulo não incorpora as restrições de uso e ocupação do solo estabelecido pelo Plano Específico de Zoneamento de Ruído. O problema do ruído seria mais controlado se essas áreas tivessem sido incorporadas à legislação do município, pois essas áreas de onde se recebem reclamações, apesar de estarem regulares pela legislação do município, estão fora das normas internacionais admitidas para exposição ao ruído em zonas de influência aeroportuária. (PDA 2003).

O plano específico de zoneamento de ruído (PEZR) do Aeroporto Internacional de Congonhas – SBSP, que define as áreas de restrições de uso do solo (Área I , Área II e Área III), foi aprovado em 02 de maio de 1984 e compreende somente a pista 17R/35L . A segunda pista 17L/35R, onde atualmente ocorrem cerca de 25% do total de movimentos diários deste aeroporto, ainda não foi incorporada ao plano específico de zoneamento de ruído em vigor.

De acordo com as figuras do anexo1, é possível observar a localização de receptores críticos, tais como escolas e centros de saúde, além de um grande número de residências, nas áreas de restrição do uso do solo.

O caso de Recife

O Aeroporto Internacional do Recife/Guararapes – Gilberto Freyre é situado ao sul do Recife e atende a movimentações de passageiros domésticos e internacionais. É o segundo maior aeroporto do Nordeste do Brasil em movimento de passageiros. Segundo pesquisas recentes, o aeroporto do Recife tem capacidade maior que a prevista, passando de 5 milhões para 9 milhões de passageiros por ano. Dispõe de excelentes condições de operação, fechando raramente e, quando isso ocorre, por apenas breves minutos, operando 24 horas por dia. (INFRAERO 2009).

De acordo com a Infraero, o Aeroporto Internacional dos Guararapes possui a maior pista de pouso e decolagem do Nordeste, com 3305m. Sua extensão permite a operação de grandes aeronaves.

No caso do aeroporto Internacional da Cidade do Recife – SBRF, a absorção da Legislação Aeronáutica relativa ao PEZR – *Plano Específico de Zoneamento do Ruído* - no corpo da *Lei de Uso e Ocupação do Solo do Município de Recife* – LUOS, estabelece uma compatibilidade entre as Leis Municipais e a Aeronáutica (Federal), já que a LUOS remete ao PEZR. Além disto, a Prefeitura instituiu Lei específica para a ZEA – Zona Especial do Aeroporto. O anexo 2 remete a legislação em questão, lei municipal nº 16.176.

O aeroporto de Recife está em situação privilegiada em relação à aplicação da Legislação Aeronáutica com respeito ao ruído aeronáutico, já que a Gestão Municipal absorveu o PEZR no corpo de suas Leis.

Contudo, um estudo realizado em 2006 pela COPPE/UFRJ em parceria com a Infraero sobre o mapeamento de receptores críticos, realizado na região onde se localiza o Aeroporto de Recife, revelou a existência de 62 unidades de ensino e saúde na área de abrangência da curva de ruído DNL 65dB(A), sendo que 50 destes receptores estão inseridos dentro área do PEZR em vigor.

CAPÍTULO 6

PROPOSTAS PARA A REVISÃO DA PORTARIA 1141/GM5 VISANDO À INTEGRAÇÃO ENTRE O ZONEAMENTO AEROPORTUÁRIO E URBANO.

Este capítulo tem como objetivo principal estudar uma metodologia para a adequação do zoneamento urbano ao entorno dos aeroportos brasileiros. Para isso, propõem-se três métodos para a revisão da portaria 1141/GM5, buscando a integração entre o zoneamento aeroportuário e o zoneamento urbano.

A metodologia utilizada no desenvolvimento desta dissertação necessita de ferramentas computacionais como o INM e o Matlab, e ainda ferramentas de auxílio como o Sistema de Informação Geográfica, e um programa de desenho Auto Cad, para avaliar as curvas de ruído que abrangem áreas residenciais, o *encroachment* no entorno do aeroporto e o incômodo causado pelo aeroporto na comunidade.

Para avaliar a proposta de zoneamento foram determinadas as curvas de ruído nas métricas DNL, LAeqD e LAeqN a partir do banco de dados da Infraero de 2005 (operações diárias do aeroporto - média de vôos diurnos e noturnos, trajetórias de pouso e decolagem - tipos de aeronaves, informações gerais do aeroporto). As curvas foram geradas pelo *software* INM e elaboradas de acordo com as alternativas propostas para o zoneamento em dois aeroportos brasileiros: Aeroporto de Congonhas e Aeroporto de Recife que apresentam movimentação de aeronaves bem diferentes durante os períodos diurnos e noturnos.

Primeiramente, é determinada uma relação entre as métricas citadas anteriormente, para facilitar o desenvolvimento de um novo conceito abordado neste estudo: a amplitude acústica.

Posteriormente, são apresentadas as novas curvas de ruído, de acordo com as alternativas propostas para o zoneamento aeroportuário dos aeroportos de Congonhas e de Recife.

6.1 Relação entre DNL, LAeqD e LAeqN

As métricas DNL, LAeqD e LAeqN num determinado ponto próximo ao aeroporto (x,y,z), podem ser expressas em função do nível sonoro instantâneo, $L_A(t)$ no mesmo ponto como nas equações 16,17 e 18.

$$DNL = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{3600 \times 24} \left[\int_7^{22} 10^{\frac{L_A(t)}{10}} dt + \int_{22}^7 10^{\frac{L_A(t)+10}{10}} dt \right] \right\} \quad (16)$$

$$LAeqD = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{3600 \times 15} \left[\int_7^{22} 10^{\frac{L_A(t)}{10}} dt \right] \right\} \quad (17)$$

$$LAeqN = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{3600 \times 9} \left[\int_{22}^7 10^{\frac{L_A(t)+10}{10}} dt \right] \right\} \quad (18)$$

Em que:

$L_{A(t)}$: É o nível de pressão sonora, instantâneo, ponderado em A;

$LAeqD$: É a média de energia sonora compreendida durante o período diurno; pode ser utilizado para avaliar os efeitos adversos diurnos do ruído.

$LAeqN$: É a média de energia sonora compreendida durante o período noturno; pode ser utilizado para avaliar os efeitos adversos noturnos do ruído.

A métrica DNL também pode ser escrita em função das métricas, LAeqD e LAeqN, respectivamente, como mostra a equação 19:

$$DNL = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{24} \left(15 \times 10^{\frac{LAeqD}{10}} + 9 \times 10^{\frac{LAeqN}{10}} \right) \right] \quad (19)$$

A figura 14 mostra a relação entre os níveis de ruído calculados nas métricas DNL, LAeq, LAeqD e LAeqN para uma posição lateral à pista do aeroporto de Recife e sua evolução durante as horas do dia. Os níveis LAeq são calculados usando a frota do aeroporto durante a hora do dia considerado.

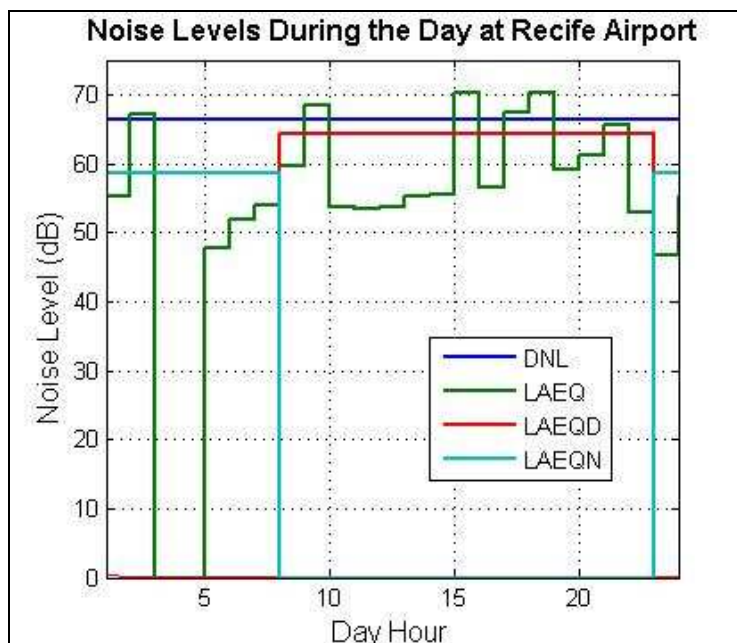


Figura 14: Níveis de ruído durante o dia no aeroporto de Recife.
Fonte: Revoredo, 2007.

Os níveis sonoros em DNL, isoladamente, não representam o real incômodo gerado pelo aeroporto na sua vizinhança. Há casos em que não há movimentação num determinado intervalo de tempo, e nenhum ruído é gerado pelo aeroporto, mas mesmo assim o nível sonoro nesta métrica permanece o mesmo que nos períodos de intensa movimentação.

A relação entre o níveis DNL e LAeq e sua evolução durante o dia diferem de um aeroporto para outro, sendo assim, é necessário mais um parâmetro para estabelecer uma equivalência entre elas. Com o objetivo de avaliar melhor o incômodo causado neste estudo foi proposta uma nova variável denominada amplitude acústica.

6.2 Amplitude acústica

A Amplitude Acústica (Δ), num determinado ponto é a diferença entre os níveis sonoros diurnos e noturnos, definida na equação 20, desta forma obtém-se uma nova relação entre DNL, LAeqD, LAeqN e Δ .

$$LAeqD - LAeqN = \Delta \quad (20)$$

A partir da equação acima, é possível estabelecer uma relação direta entre DNL e LAeqD. E ainda uma relação entre DNL e LAeqN. E as métricas LAeqD e LAeqN também podem ser escritas em função do DNL e do Δ .

$$LAeqN = LAeqD - \Delta \quad (21)$$

$$DNL = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{24} \left(15 \times 10^{\frac{LAeqD}{10}} + 9 \times 10^{\frac{LAeqD - \Delta}{10}} \right) \right] \quad (22)$$

Deste modo:

$$DNL = LAeqD + 10 \log_{10} \left[\frac{1}{24} \left(15 + 9 \times 10^{\frac{-\Delta}{10}} \right) \right] \quad (23)$$

$$LAeqD = DNL - 10 \log_{10} \left[\frac{1}{24} \left(15 + 9 \times 10^{\frac{-\Delta}{10}} \right) \right] \quad (24)$$

A partir da relação:

$$LAeqD = \Delta + LAeqN \quad (25)$$

Obtém-se:

$$LAeqN = DNL - 10 \log_{10} \left[\frac{1}{24} \left(15 \times 10^{\frac{\Delta}{10}} + 9 \right) \right] \quad (26)$$

Os valores de DNL, LAeqD, LAeqN e Δ variam em função do ponto no entorno do aeroporto, e dependem da relação entre o número de movimentos diurnos e noturnos do aeroporto.

6.2.1 Determinação do Δ a partir de simulações realizadas no INM

Para calcular o valor da amplitude acústica foi inserida uma malha de receptores, como mostra a figura 15, sobre as curvas de ruído nas métricas LAeqD e LAeqN, no entorno de dois aeroportos brasileiros com movimentação bem distintas: o aeroporto de Recife e de Congonhas. O aeroporto de Congonhas caracteriza-se por ter pouca movimentação de aeronaves durante o período noturno, e no aeroporto de Recife há maior movimentação de aeronaves neste período. Em cada ponto obteve-se o valor do nível sonoro diurno e noturno, a fim de avaliar a influência da amplitude acústica nos aeroportos, conclui-se que o Δ depende da localização de cada ponto. Para pontos próximos às rotas do aeroporto a variação entre LAeqD, LAeqN é maior. A Δ foi determinada como o valor médio das diferenças entre as métricas citadas.

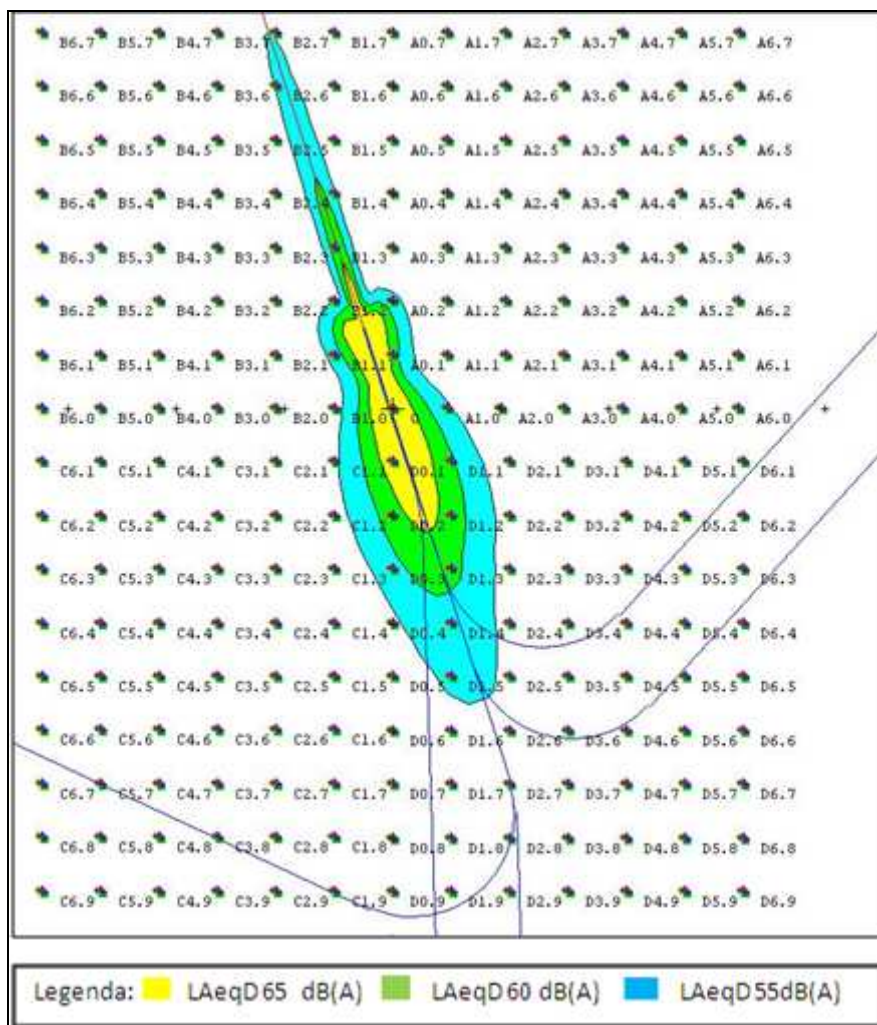


Figura 15: Uma malha de pontos inseridos sobre o aeroporto de Recife com sua respectiva curvas de ruído na métrica LAeqD.
Fonte: Elaboração própria.

O mesmo procedimento foi utilizado para determinar a amplitude acústica do aeroporto de Congonhas. Para este, a amplitude acústica média é igual a 10,6, enquanto para o aeroporto de Recife 0,5. Os valores são bem discrepantes, o que significa que a movimentação do aeroporto durante o período noturno é um fator importante para avaliar o incômodo.

As figuras 16 e 17 representam os gráficos obtidos que mostram a diferença entre os níveis sonoros diurnos e noturnos e o Δ representativo de cada aeroporto.

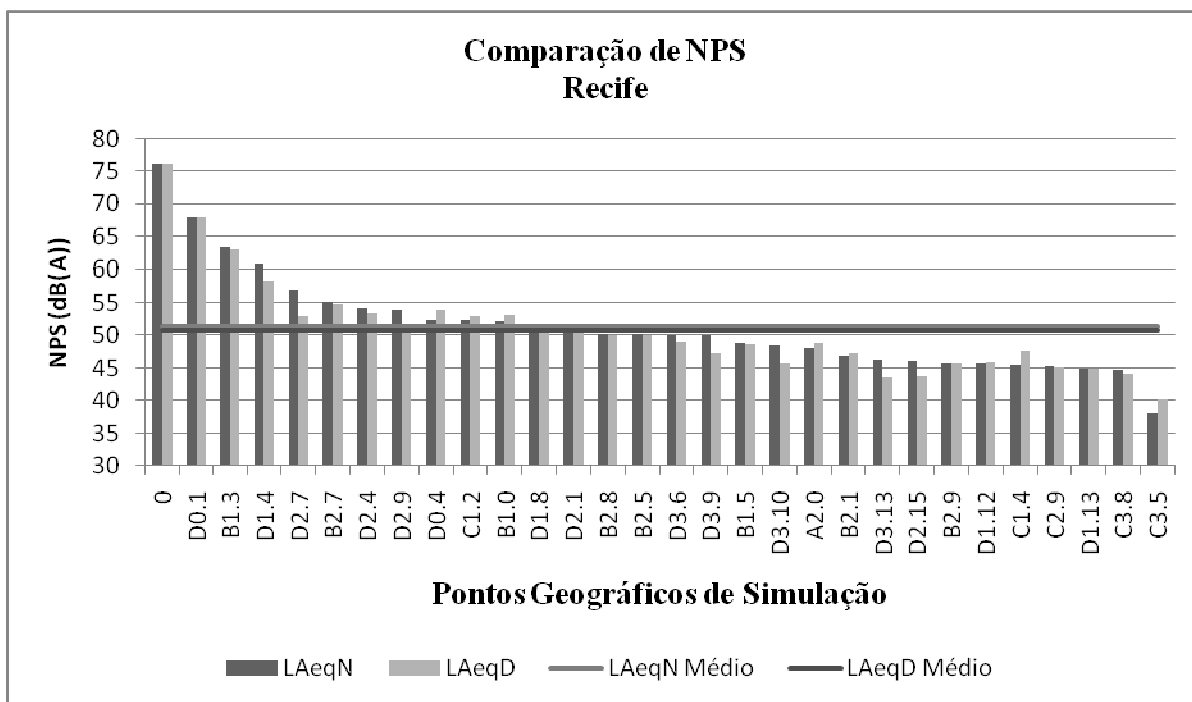


Figura 16: Níveis sonoros simulados nas métricas LAeqD e LAeqN para o Aeroporto de Recife.
Fonte: Elaboração própria.

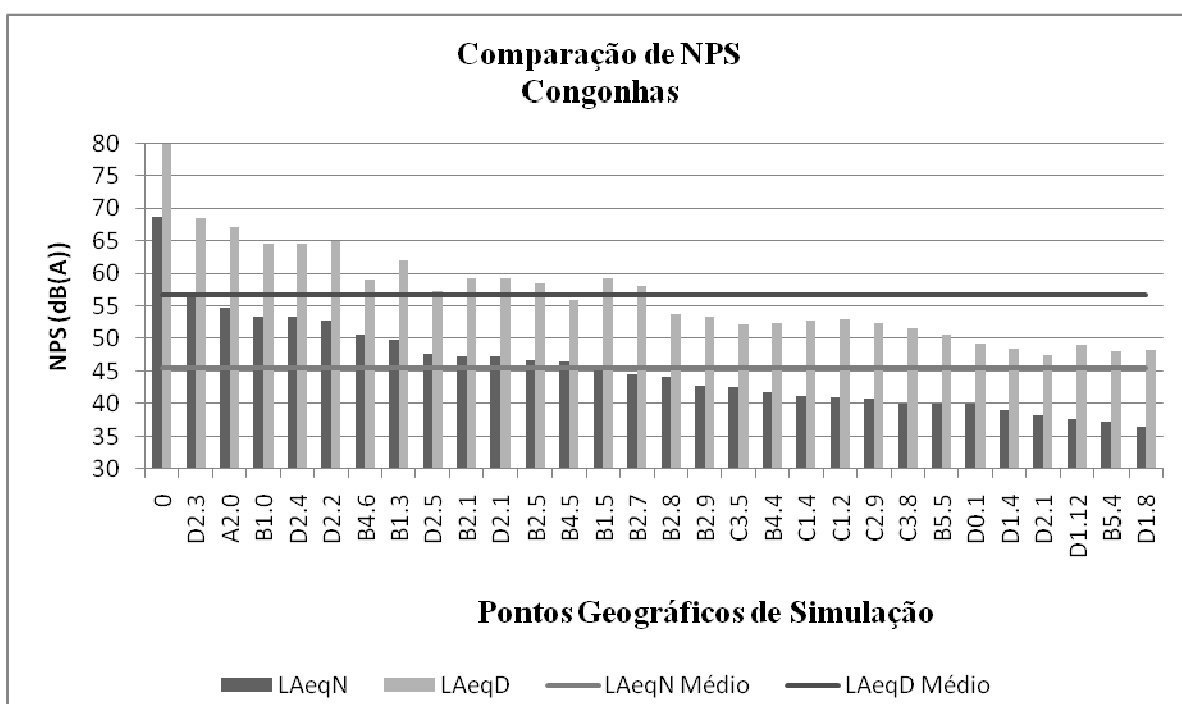


Figura 17: Níveis sonoros simulados nas métricas LAeqD e LAeqN para o Aeroporto de Congonhas.
Fonte: Elaboração própria.

Os resultados obtidos através de simulações de curvas de ruído para ambos os aeroportos mostram a influência da Δ sobre as áreas das curvas de ruído em cada aeroporto.

Nos próximos itens abordam-se três alternativas para a revisão da Portaria 1141/ GM5 usada para o zoneamento aeroportuário.

6.3 Primeira alternativa proposta: Zoneamento aeroportuário em função do DNL a partir do LAeqD e LAeqN para as áreas residenciais da NBR 10151

A primeira proposta para o zoneamento aeroportuário é baseada no DNL equivalente. O DNL pode ser escrito em função do nível sonoro equivalente determinado durante o período diurno e noturno, LAeqD, LAeqN , respectivamente, como na equação 19, definida anteriormente. A tabela 5 apresenta os níveis sonoros em LAeqD e o LAeqN e DNL para os diferentes tipos de áreas da NBR 10151.

Tabela 5: Níveis de critério durante o dia e a noite e o DNL equivalente para cada área da NBR 10151.

Tipos de áreas	LAeqD	LAeqN	DNL
Área de sítios e fazendas	40	35	42,57
Área residencial urbana ou de hospitais e escolas	50	45	52,57
Área mista, predominantemente residencial	55	50	57,57
Área mista, com vocação comercial	60	55	62,57
Área mista, com vocação recreacional	65	55	65
Área predominantemente industrial	70	60	70

Fonte: Elaboração própria.

Os três níveis DNL =52,57; DNL = 57,57; DNL =62,57 podem ser utilizados para definir curvas de ruído, delimitando as áreas residenciais da NBR 10151.

6.4 Segunda alternativa proposta: Zoneamento aeroportuário baseado nos níveis sonoros da NBR 10151

A segunda alternativa para o zoneamento aeroportuário é baseada também nos níveis sonoros da NBR 10151, através de uma condição lógica para cada área especificada da norma ABNT. As tabelas 6 e 7 ilustram as condições lógicas utilizadas. As curvas de ruído foram simuladas nas métricas LAeqD e LAeqN para diferentes tipos de área na norma ABNT.

Tabela 6: Condição Lógica de acordo com os tipos de área da NBR 10151.

LAeqD	LAeqN	Condição Lógica	Tipo de área
50	45	$LAeqD \leq 50 \cap LAeqN \leq 45$	A ₁
55	50	$LAeqD \leq 55 \cap LAeqN \leq 50$	A ₂
60	55	$LAeqD \leq 60 \cap LAeqN \leq 55$	A ₃
65	55	$LAeqD \leq 65 \cap LAeqN \leq 55$	A ₄
70	60	$LAeqD \leq 70 \cap LAeqN \leq 60$	A ₅

Fonte: Elaboração própria.

Usando a condição lógica de complementaridade, tem-se a união entre as curvas LAeqD e LAeqN para cada área.

Tabela 7: Condição Lógica de complementaridade

LAeqD	LAeqN	Condição Lógica	Tipo de área
50	45	$LAeqD \leq 50 \cup LAeqN \leq 45$	A ₁
55	50	$LAeqD \leq 55 \cup LAeqN \leq 50$	A ₂
60	55	$LAeqD \leq 60 \cup LAeqN \leq 55$	A ₃
65	55	$LAeqD \leq 65 \cup LAeqN \leq 55$	A ₄
70	60	$LAeqD \leq 70 \cup LAeqN \leq 60$	A ₅

Fonte: Elaboração própria.

As áreas A₁, A₂, A₃, A₄ e A₅ especificados nas tabelas 4 e 5 são os tipos de áreas da NBR 10151. A área de sítios e fazendas está excluída desta lista.

Assim é possível verificar duas condições lógicas para avaliar o zoneamento aeroportuário. A primeira condição considerou-se uma estratégia de 5 dB(A), que representa as áreas residenciais da NBR 10151. A segunda condição usou-se a estratégia de 10 dB(A), que será abordada mais adiante.

$$LAeqD \leq K \cup LAeqN \leq K-5$$

$$LAeqD \leq K \cup LAeqN \leq K-10$$

Desta forma, obteve-se uma curva representativa de cada condição lógica, por meio da interseção das áreas das curvas de ruído.

No caso do aeroporto de Congonhas as curvas LAeqD são maiores que as curvas LAeqN, devido a maior movimentação diurna do aeroporto. Sendo assim as curvas resultantes da condição lógica são as curvas LAeqD. Enquanto no aeroporto de Recife as curvas LAeqN são maiores, logo são as curvas resultantes também.

A área $LAeqD > 65 \text{ dB(A)} \cap LAeqN > 55 \text{ dB(A)}$, quando aplicou-se a condição $\{LAeqD \leq 65 \text{ AND } LAeqN \leq 55\}$ a curva resultante é a própria curva LAeqN = 55dB(A), no caso do aeroporto de Recife. Enquanto, no aeroporto de Congonhas, a curva $LAeqD 65 \text{ dB(A)} > LAeqN 55 \text{ dB(A)}$, e a curva resultante desta condição é LAeqD 65dB(A).

As tabelas 8 e 9 indicam as áreas de contorno das curvas de ruído de 50, 55, 60 e 65 dB (A) nas métricas LAeqD, LAeqN e DNL para ambos os aeroportos. No caso do aeroporto de Congonhas a área das curvas, LAeqD 65 dB(A) e DNL 65dB(A) possuem aproximadamente o mesmo valor (por isso a sobreposição das curvas na figura 24), uma vez que a movimentação do aeroporto é relevante durante o período diurno. A curva LAeqN 55dB(A) possui uma área menor, a métrica refere-se ao período noturno, no qual a movimentação é menor.

No caso do aeroporto de Recife a área das curvas LAeqD 65 dB(A) e DNL 65dB(A) são bem diferentes. Devido a maior movimentação noturna, a área da curva LAeqN 55dB(A) é muito maior. Preferencialmente, utiliza-se a rota à direita em relação à pista do aeroporto.

Tabela 8: Áreas de curva de ruído em km² no Aeroporto de Recife.

Nível de curva de ruído	Área L_{AeqD}	Área L_{AeqN}	Área DNL
50	37, 640	38, 579	101, 815
55	14, 933	17, 435	47, 517
60	6, 509	6, 928	22, 006
65	2, 711	2, 853	8, 770

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 9: Área de curva de ruído em km² no Aeroporto de Congonhas..

Nível de curva de ruído	Área L_{AeqD}	Área L_{AeqN}	Área DNL
50	84, 132	14, 808	84, 251
55	36, 534	5, 647	36, 006
60	17, 185	1, 952	16, 389
65	7, 602	0, 778	6, 900

Fonte: Elaboração própria.

A seguir, são apresentadas as simulações das curvas obtidas para as duas alternativas de zoneamento citadas. Em cada mapa, é possível comparar as duas situações.

6.5 Simulações das curvas de ruído para o Aeroporto de Congonhas

A figura 18, representa o mapa da curva de ruído para uma área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas, com o nível critério diurno de 50 dB(A) e nível critério noturno de 45 dB(A) e $\Delta = 5$. Este apresenta a curva DNL 65dB(A) (curva utilizada para o atual zoneamento aeroportuário), o DNL 53 dB(A), obtido a partir dos níveis sonoros desta área, e a curva originada da condição lógica nesta área.

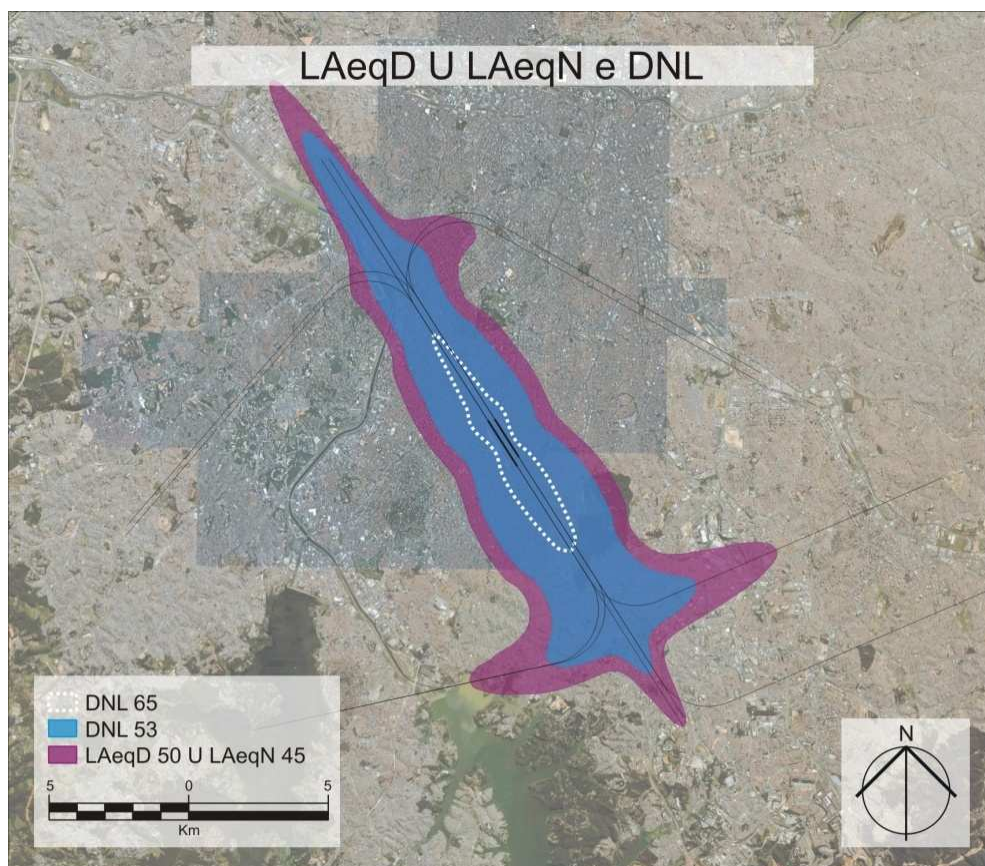


Figura 18: Curvas de ruído sobre o aeroporto de Congonhas para área estritamente residencial.

Fonte: GERA

Na figura 19 tem-se a área mista, predominantemente residencial, com o nível critério diurno de 55 dB(A) e nível critério noturno de 50 dB(A) e $\Delta = 5$. Este apresenta a curva DNL 65dB(A), DNL 58 dB(A), e a curva originada da condição lógica LAeqD 55 U LAeqN 50.

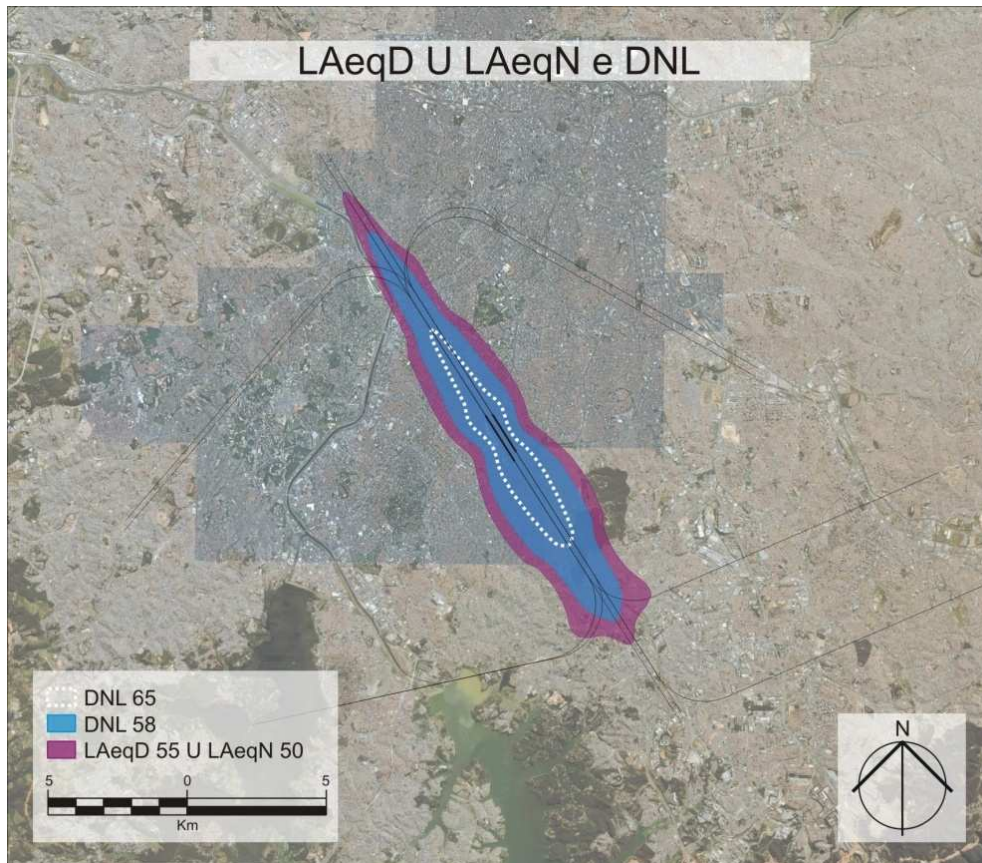


Figura 19: Curvas de ruído sobre o aeroporto de Congonhas para área mista predominantemente residencial.

Fonte: GERA

A figura 20 representa a área mista (área em rosa), com vocação comercial e administrativa, $LAeqD = 60 \text{ dB(A)}$ e $LAeqN = 55 \text{ dB(A)}$ e $\Delta = 5$, obtida da condição lógica, juntamente com as curvas de ruído DNL 63 dB(A), obtidas a partir dos níveis sonoros, $LAeqD$ e $LAeqN$, desta área e a curva DNL 65dB(A).

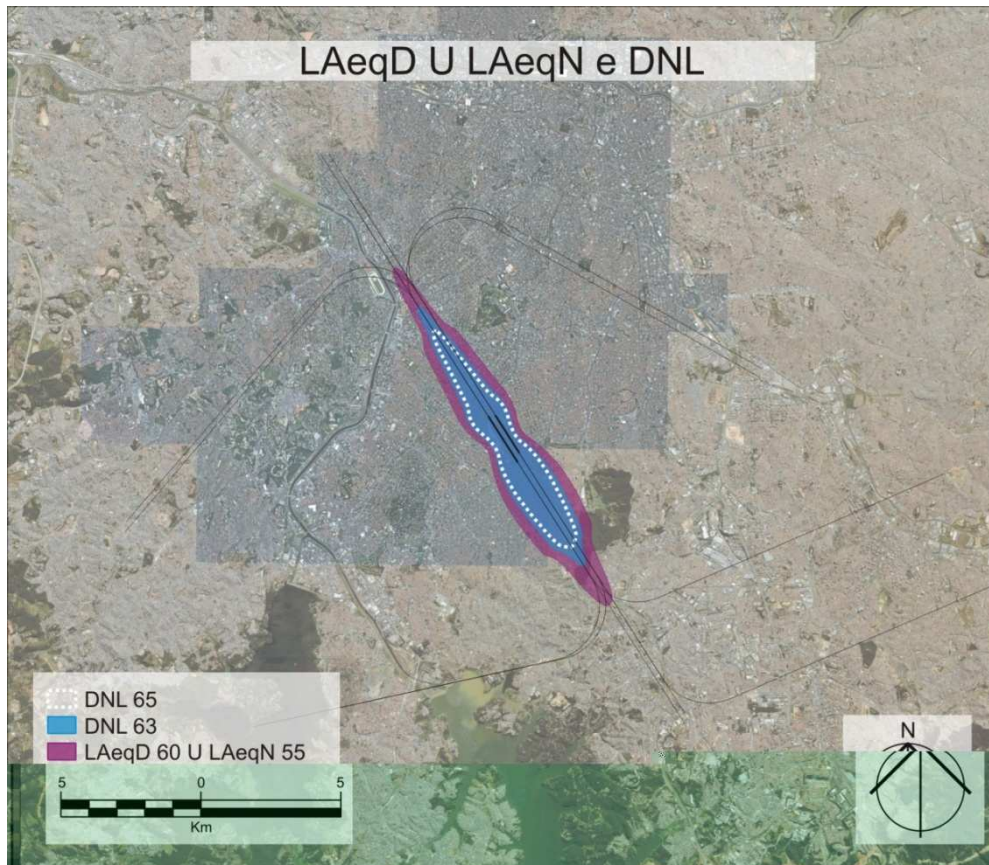


Figura 20: Curvas de ruído sobre o aeroporto de Congonhas para área mista, com vocação comercial.
Fonte: GERA

6.6 Simulações das curvas de ruído para o Aeroporto de Recife

A figura 21, representa o mapa da curva de ruído para uma área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas, com o nível critério diurno de 50 dB(A) e nível critério noturno de 45 dB(A) e $\Delta = 5$. O mapa apresenta a curva DNL 65dB(A), o DNL 53 dB(A), obtida a partir dos níveis sonoros desta área, e a curva originada da condição lógica nesta área.

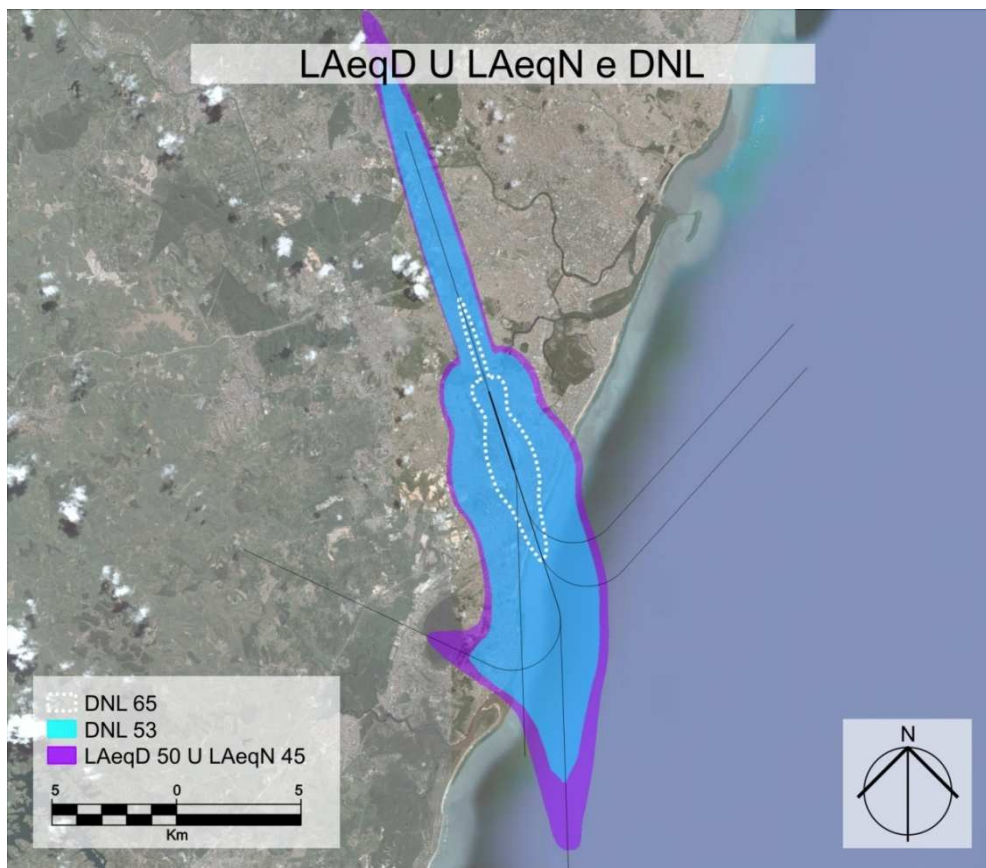


Figura 21: Curvas de ruído sobre o aeroporto de Recifes para área estritamente residencial.

Fonte: GERA

A figura 22 apresenta a área mista, predominantemente residencial, com o nível critério diurno de 55 dB(A) e nível critério noturno de 50 dB(A) e $\Delta = 5$, com as curvas de ruído, DNL 65dB(A), DNL 58 dB(A), obtida a partir dos níveis sonoros desta área, e a curva originada da condição lógica nesta área, respectivamente.

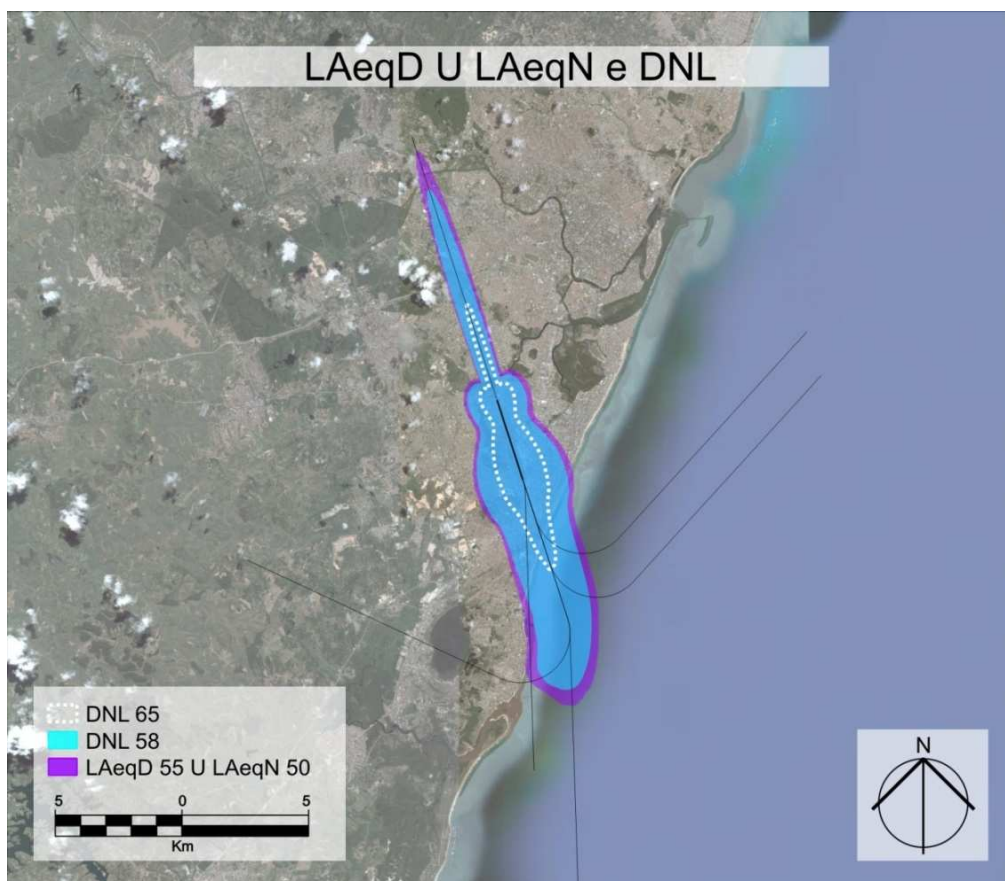


Figura 22: Curvas de ruído sobre o aeroporto de Recife para área mista predominantemente residencial.

Fonte: GERA

A figura 23 representa a área mista, com vocação comercial e administrativa, com o nível critério diurno de 60 dB(A) e nível critério noturno de 55 dB(A) e $\Delta = 5$. O mapa apresenta a curva DNL 65dB(A), DNL 63 dB(A), obtido a partir dos níveis sonoros, LAeqD e LAeqN, desta área, e a curva originada da condição lógica nesta área.

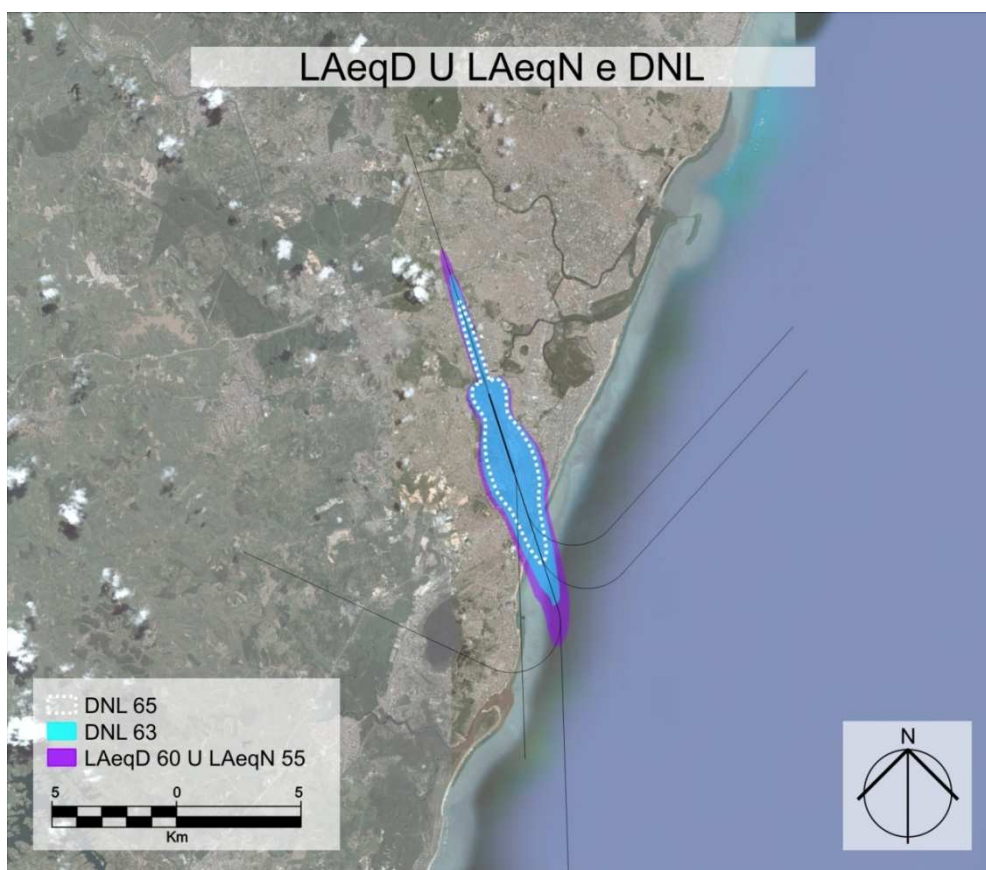


Figura 23: Curvas de ruído sobre o aeroporto de Recife para área mista, com vocação comercial.

Fonte: GERA

E por fim, é apresentada mais uma alternativa, também mais restritiva que o atual zoneamento, portanto baseia-se em níveis sonoros LAeqD e LAeqN maiores do que aqueles almejados para áreas residenciais.

6.7 Terceira alternativa proposta: Comparação entre a condição $DNL \leq 65$ e a condição $LAeqD \leq 65$ AND $LAeqN \leq 65$

A última alternativa para uma revisão da Portaria 1141 baseia-se na condição $DNL \leq 65$ dB(A) para o uso residencial. O nível sonoro $DNL = 65$ dB(A)

significa um $LA_{eqD} = 65\text{dB(A)}$ e $LA_{eqN} = 55\text{dB(A)}$, devido a penalidade de 10 dB(A) no período noturno. Neste caso considera-se uma estratégia de 10 dB (A).

$$LA_{eqD} \leq K \cup LA_{eqN} \leq K-10$$

Aqui, portanto propõe-se uma análise mais restritiva da condição $DNL \leq 65$ dB(A) para o uso residencial, e condição lógica derivada dos níveis sonoros $LA_{eqD} \leq 65\text{dB(A)}$ e $LA_{eqN} \leq 55\text{dB(A)}$. No entanto as condições que nos interessam neste estudo são:

$$DNL \leq 65$$

$$\{LA_{eqD} \leq 65 \text{ AND } LA_{eqN} \leq 55\}$$

Esta segunda condição foi considerada como equivalente a primeira, porém pode ser mais restritiva que a primeira. Ela pode ser escrita como o complementar da condição complementar.

$$\overline{\{LA_{eqD} > 65 \text{ OR } LA_{eqN} > 55\}}$$

Cada uma dessas condições define uma área em torno do aeroporto, e o contorno dessa área define uma curva de ruído.

Matematicamente a condição lógica $LA_{eqD} = 65 \text{ dB(A)}$ AND $LA_{eqN} = 55\text{dB(A)}$ implica em $DNL = 65 \text{ dB(A)}$, porém $DNL = 65 \text{ dB(A)}$ não implica $LA_{eqD} = 65 \text{ dB(A)}$ AND $LA_{eqN} = 55\text{dB(A)}$. Tem-se:

$$DNL \leq 65 \neq \{LA_{eqD} \leq 65 \text{ AND } LA_{eqN} \leq 55\}$$

As figuras 24 e 25 representam a curva resultante da condição $\{LA_{eqD} \leq 65 \text{ AND } LA_{eqN} \leq 55\}$ e $DNL=65 \text{ dB(A)}$ para os aeroportos de Congonhas e Recife.

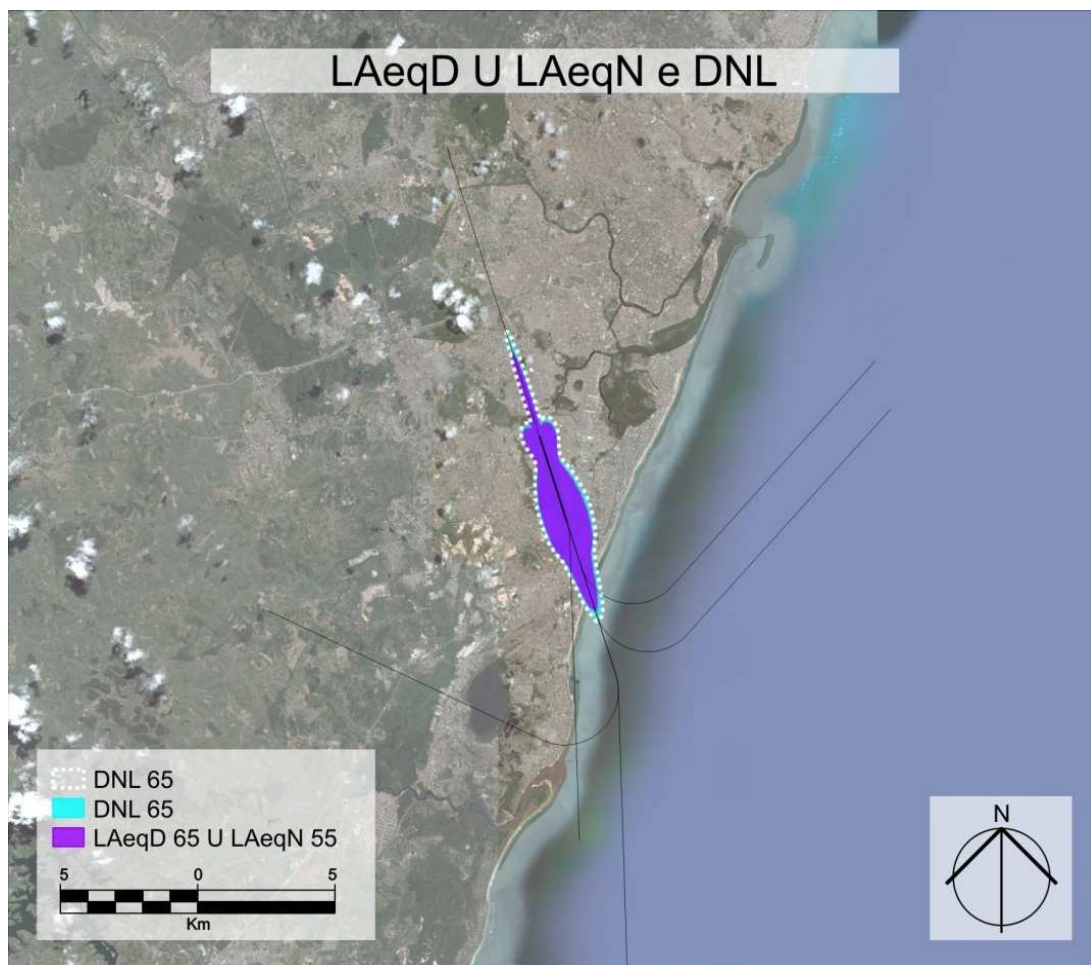


Figura 24: Curvas de ruído sobre o aeroporto de Congonhas para a condição lógica $\{LAeqD \leq 65 \text{ AND } LAeqN \leq 55\}$.
 Fonte: GERA

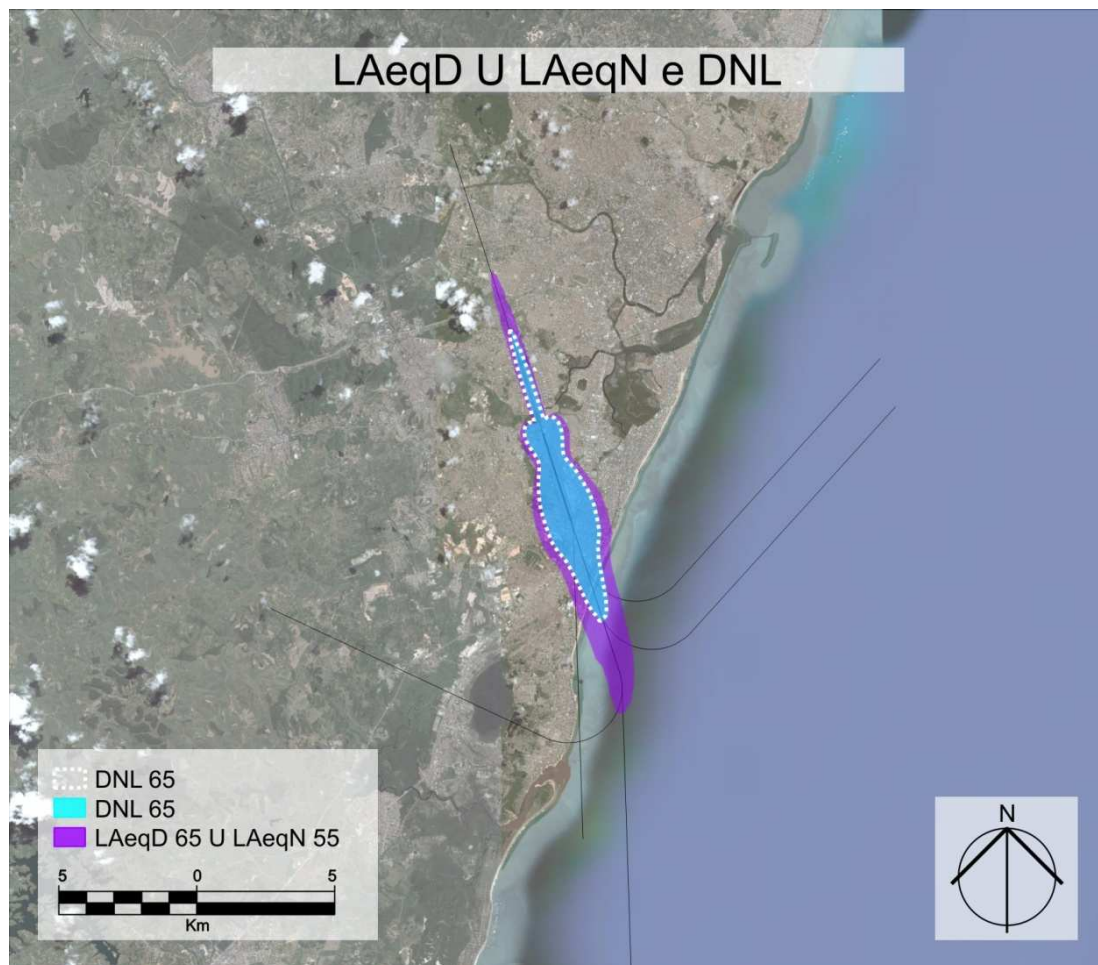


Figura 25: Curvas de ruído sobre o aeroporto de Recife para a condição lógica $\{LAeqD \leq 65 \text{ AND } LAeqN \leq 55\}$.
 Fonte: GERA

O zoneamento aeroportuário a partir do DNL equivalente derivado dos níveis sonoros da NBR 10151 é uma alternativa, portanto o nível sonoro ainda permanece constante para o período diurno e noturno, não levando em conta os efeitos do ruído separadamente. No entanto o zoneamento adotado possui a menor curva de ruído, logo se conclui que há muitas pessoas submetidas à exposição sonora inadequada.

Assim um zoneamento para o aeroporto baseado nas métricas LAeqD e LAeqN é o mais recomendável, pois tem-se uma representação mais significativa de pessoas submetidas aos efeitos adversos do ruído durante o período diurno e noturno.

Mas o zoneamento aeroportuário baseado na NBR 10151 apresenta curvas de ruído extremamente grandes para o uso residencial e devido à falta de integração entre a legislação aeroportuária e urbana, a maioria dos aeroportos brasileiros já está cercada pela comunidade.

Neste caso a solução viável para a redução da exposição sonora seria a implantação de procedimentos de isolamento acústicos nas residências, ou a restrição de operação durante o período noturno para o Aeroporto de Recife, medida já tomada no aeroporto de Congonhas que fecha às 23h.

Pesquisas feitas recentemente revelam os níveis sonoros de ruído de tráfego são muito maiores, devido ao fato do ruído aeronáutico ser intermitente, este provoca um maior incômodo à população.

CAPÍTULO 7

MODELAGEM *FUZZY* PARA AVALIAR O INCÔMODO SONORO

No capítulo 4 foi apresentada a proposta de Schultz para a avaliação do incômodo a partir do nível sonoro na métrica DNL. Neste capítulo apresenta-se duas abordagens alternativas baseada na lógica *fuzzy* para relacionar o incômodo aos níveis sonoros através da norma ABNT NBR10151 e as métricas LAeqD e LAeqN.

7.1 Introdução a Lógica *Fuzzy*

A Lógica *Fuzzy*, também denominada *Lógica Difusa* ou *Lógica Nebulosa*, foi desenvolvida por Lotfi A. Zadeh, que iniciou seus trabalhos em 1965, sendo reconhecido mundialmente por seus estudos nessa área.

A Lógica *Fuzzy* se caracteriza pela sua capacidade em inferir conclusões e gerar respostas a partir de informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas e imprecisas. Sua utilização é realizada de maneira muito simples e natural, levando à construção de sistemas compreensíveis e de fácil manutenção. Assim, a Lógica *Fuzzy* é uma boa ferramenta para modelagem de situações onde a incerteza é algo intrínseco ao sistema.

Segundo Mendel (1995) um sistema especialista *fuzzy* é capaz de lidar simultaneamente com dados numéricos e conhecimento lingüístico. Em geral, um sistema especialista *fuzzy* é um mapeamento não linear de um vetor de dados de entrada (característico) numa saída escalar, isto é, o sistema mapeia números em números. A teoria de conjuntos *fuzzy* e a lógica *fuzzy* estabelecem as condições específicas do mapeamento não linear.

Um conjunto *fuzzy* F definido sobre um universo de discurso X é caracterizado por uma função de pertinência $\mu_F(x)$ a qual assume valores no intervalo $[0,1]$. Um conjunto *fuzzy* é uma generalização de um conjunto clássico (isto é, um subconjunto *crisp*) cuja função de pertinência assume apenas dois valores, zero ou

um. Uma função de pertinência fornece uma medida do grau de similaridade de um elemento em X para o subconjunto *fuzzy*. Assim, se X é o universo do discurso e seus elementos são denotados por x , então um conjunto *fuzzy* A em X , é definido como um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{x, \mu_A(x) / x \in X\}$$

Sendo que $\mu_F(x)$ é denominado a função de pertinência de x em A , ou seja, a função de pertinência que atribui a cada elemento de X a um grau de pertinência entre 0 e 1.

7.2 A Lógica *Fuzzy* e o incômodo sonoro

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

A elaboração do modelo *fuzzy* consiste inicialmente na identificação das características do sistema e na definição das variáveis de entrada. A seguir, devem ser determinadas as variáveis linguísticas que representam as características dos dados de entrada e saída (*input* ou *output*). A partir disso, é necessário estabelecer as regras de inferência ou regra 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.

7.3 Modelagem fuzzy derivada da NBR 10.151/1987 para avaliar o incômodo causado pelo ruído aeronáutico.

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 as ferramentas disponibilizados pela *Fuzzy Logic toolbox* do MATLAB versão 7.0. O estudo realizado para avaliar o incômodo foi realizado pelo sistema fuzzy do tipo *Método de Mamdani*.

O modelo fuzzy é obtido por meio da definição de um conjunto de regras fuzzy, ou seja, um algoritmo fuzzy. Essas regras podem ser apresentadas como:

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

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 .

O método baseia-se em quatro etapas: *fuzzificação*, inferência de regras, agregação das regras e *defuzzificação*.

No algoritmo fuzzy 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 sistema 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*. No anexo 3, são apresentados os conceitos necessários e inerentes para os modelos fuzzy desenvolvidos nesta dissertação.

7.3.1 Definição das variáveis de entrada (input)

A definição das variáveis de entrada para a obtenção do modelo fuzzy foi baseada na Norma ABNT/ 1987, a NBR 10151. De acordo com esta norma, o nível critério básico para o uso residencial deve ser de 45 dB (A). Em geral, para fins de zoneamento urbano, os níveis critérios podem ser obtidos a partir de uma condição básica, através de correções para determinados períodos do dia e para diferentes tipos de zona do zoneamento urbano. As correções do nível critério básico para o

período noturno sofre uma correção de - 5 dB (A). E ainda são feitas correções do nível critério para o uso residencial em diferentes áreas, como mencionadas na tabela 10.

Tabela 10: Correções do critério básico para uso residencial em diferentes áreas.

Tipo de Zona	Correção do critério básico C_z - dB (A)
Zona de hospitais	0
Residencial urbana	+ 10
Centro da cidade (negócios, comércio, administração)	+ 20
Área predominantemente industrial	+ 25

Fonte: NBR 10151/1987.

Para analisar o ruído em ocasiões especiais, como por exemplo, no caso de queixas sobre um ruído determinado em um local específico, deve ser usado como critério o nível de ruído de fundo ou o ruído ambiente. O nível de ruído de fundo (ruído ambiente) é a média dos níveis de som mínimos no local e hora considerados, na ausência do ruído em questão.

A partir deste critério, foram definidas as variáveis Δ_D (Δ_D) e Δ_N (Δ_N) relacionando-as com as queixas da comunidade. O Δ_D pode ser definido, a partir de uma condição de uso residencial, como sendo a variação deste nível sonoro durante o período diurno. E com o aumento desta variação, observa-se o aumento das queixas. E o Δ_N está relacionado com a variação do nível sonoro noturno, a partir da condição existente. E este também pode ser confrontado com as queixas da comunidade.

Esta norma apresenta uma classificação que relaciona a resposta estimada da comunidade ao ultrapassar os níveis sonoros corrigidos em relação a uma situação de referência, conforme a tabela 11. Na sua essência ela já se apresenta como um sistema *fuzzy*, na qual, cada situação corresponde a uma categoria de resposta. Desta forma, é importante que sejam consideradas estas características dos elementos *fuzzy* da norma para propor um modelo de previsão do incômodo e a quantificação do impacto sonoro.

Tabela 11: Resposta estimada da comunidade ao ruído.

Valor em dB (A) pelo qual o nível sonoro corrigido ultrapassa o nível critério	Resposta estimada da comunidade	
	Categoria	Descrição
0	Nenhuma	Não se observa reação
5	Pouca	Queixas esporádicas
10	Média	Queixas generalizadas
15	Enérgicas	Ação Comunitária
20	Muito enérgicas	Ação comunitária vigorosa

Fonte: NBR 10151/1987.

Neste caso, tem-se a variação Δ_D e Δ_N de 0 a 20. Uma vez que uma variação de 20 dB (A) acima do nível sonoro permitido para a área causa uma reação vigorosa da comunidade. Para avaliar o ruído em relação à expectativa de resposta da comunidade, o nível sonoro corrigido, deve ser comparado com os valores e critério a partir de uma condição residencial.

Assim, se o nível sonoro corrigido exceder o valor critério, o ruído pode provocar a resposta da comunidade. Diferenças de 5 dB (A) são insignificantes; queixas devem ser certamente esperadas se a diferença ultrapassar 10 dB (A).

7.3.2 Definição da variável de saída (*output*)

O incômodo sonoro, neste trabalho, refere-se ao incômodo causado pelo ruído aeronáutico. A variável lingüística *percentual do incômodo* está relacionada à percentagem de pessoas incomodadas pelo ruído aeronáutico.

As implicações de cada uma das regras foram calculadas pelo máximo entre os mínimos, utilizando o operador AND. A agregação da variável de saída foi obtida através dos operadores como o THEN, feita pelo operador **máximo**. E por último, a *defuzzificação* que foi feita pelo método do centróide.

Na figura 26, estão representadas as variáveis de entrada, Δ_D e Δ_N , e a variável de saída, o *percentual de incômodo*.

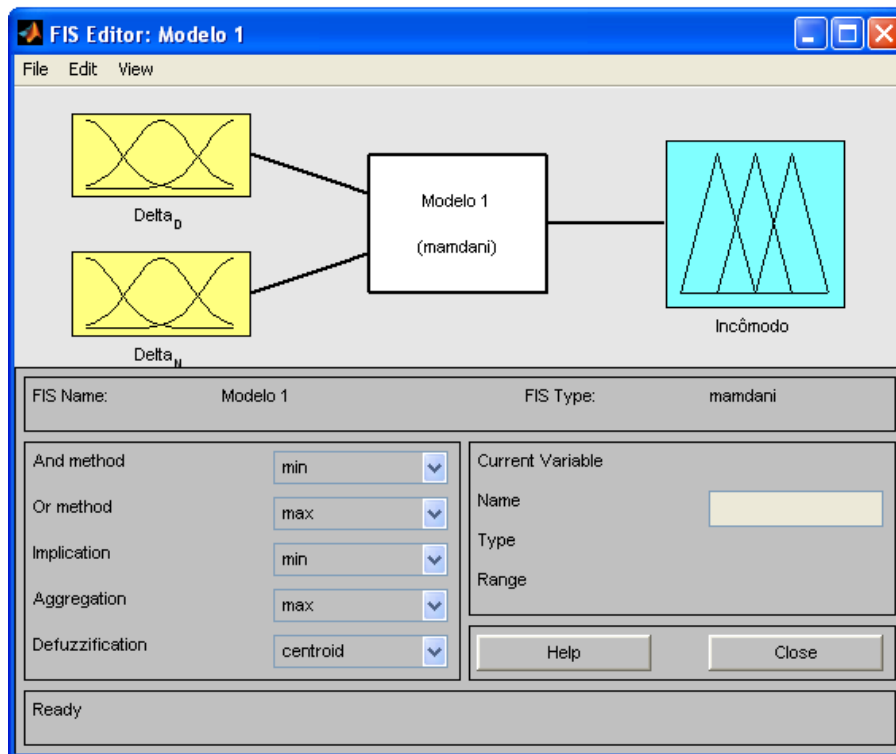


Figura 26: Variáveis de entrada e saída do modelo.
Fonte: Elaboração própria.

As figuras 27 e 28 apresentam as variáveis lingüísticas e os termos lingüísticos utilizados para qualificar cada variável. Os termos lingüísticos utilizados para representar as variáveis lingüísticas de entrada do sistema fuzzy, Δ_{D} e Δ_{N} , foram: “nulo”, “pequeno”, “médio”, “grande” e “muito² grande”. E os termos lingüísticos utilizados para a variável de saída, *percentual do incômodo*, foram: “nulo”, “moderado”, “forte”, “muito forte” e “extremo”.

² O termo lingüístico “muito grande” foi usado apenas para caracterizar as variáveis de entrada Δ_{D} e Δ_{N} e não como um intensificador (hedges) destas variáveis, assim como outros termos utilizados com esta finalidade.

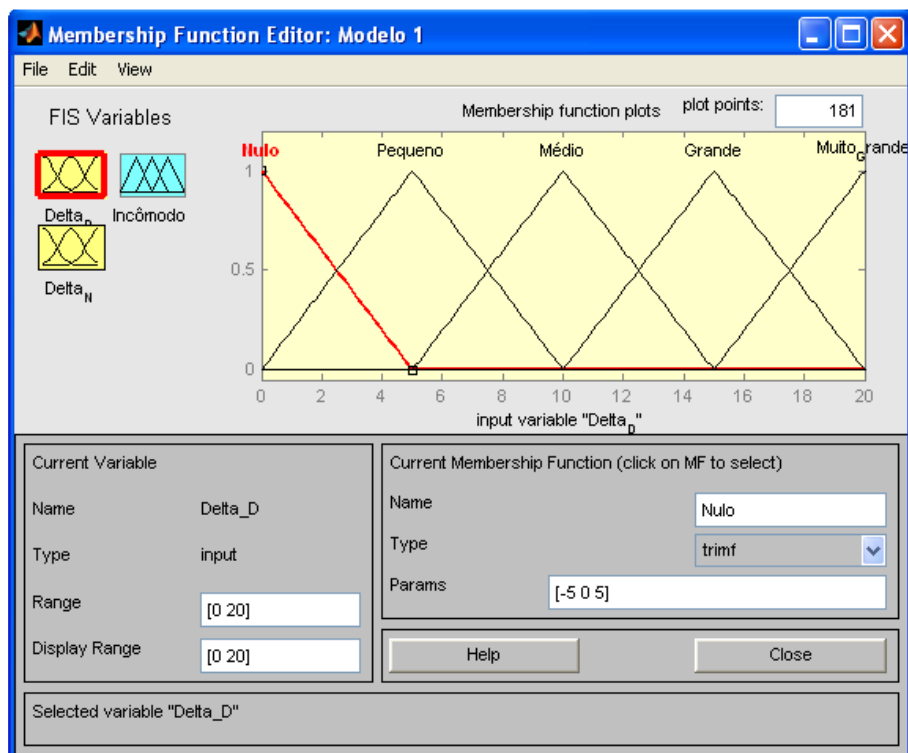


Figura 27: Fuzzificação da variável Δ_D .
Fonte: Elaboração própria

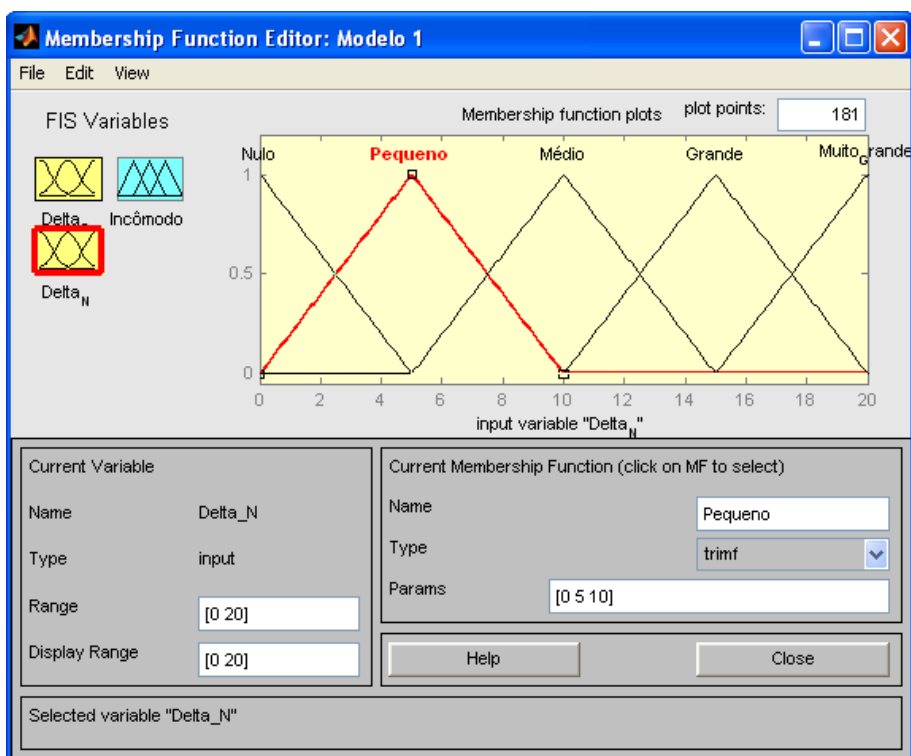


Figura 28: Fuzzificação da variável Δ_N .
Fonte: elaboração própria

Para o processo de *fuzzificação* das variáveis de entrada ou *input* do modelo, optou-se pelas funções de pertinências triangulares, variando num intervalo

de 0 a 20 dB (A) a partir de níveis critérios, diurnos e noturnos, permitidos para uma condição residencial.

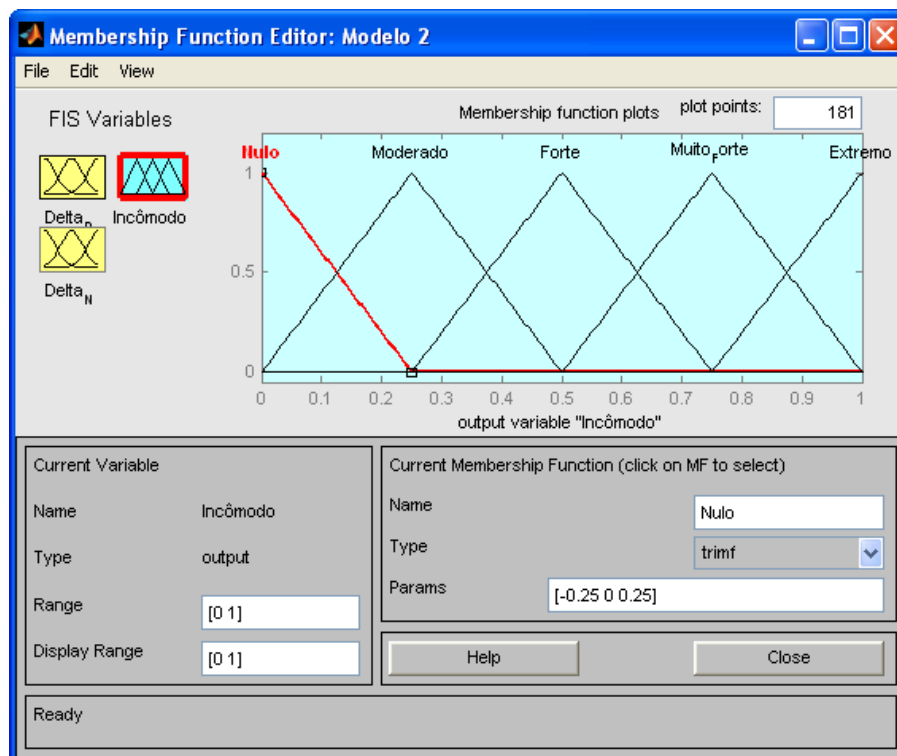


Figura 29: Fuzzificação da variável *percentual do incômodo*.
Fonte: Elaboração própria

A figura 29 apresenta a *fuzzificação* da variável de saída representada pelo percentual de pessoas incomodadas pelo ruído aeronáutico. Para este, utilizou-se também uma função triangular, com o eixo x variando entre 0 e 1, correspondendo à percentagem entre 0 e 100%.

7.3.3 Regras *fuzzy*

A tabela 12 representa o mapa de regras para as variáveis de entrada Δ_D e Δ_N e para a variável de saída, o *percentual de incômodo*.

Tabela 12: Mapa de regras do modelo 1.

$\Delta_N \backslash \Delta_D$	0 - Nulo	5 - Pequeno	10 - Médio	15 - Grande	20 – Muito grande
0 - Nulo	Nulo	Moderado	Forte	Muito forte	Extremo
5 - Pequeno	Moderado	Moderado	Forte	Muito forte	Extremo
10 – Médio	Forte	Forte	Forte	Muito forte	Extremo
15 – Grande	Muito forte	Muito forte	Muito forte	Muito forte	Extremo
20 – Muito Grande	Extremo	Extremo	Extremo	Extremo	Extremo

Fonte: Elaboração própria.

A partir dos dados inseridos no modelo *fuzzy* para avaliar o percentual de incômodo, foram elaboradas 25 regras de inferência. As regras devem ser interpretadas da seguinte maneira:

Regra 1: SE Δ_D é nulo e Δ_N é nulo ENTÃO o percentual de incômodo é nulo.

Regra 2: SE Δ_D é nulo e Δ_N é pequeno ENTÃO o percentual de incômodo o é moderado.

Regra 3: SE Δ_D é nulo e Δ_N é médio ENTÃO o percentual de incômodo é forte.

Regra 4: SE Δ_D é nulo e Δ_N é grande ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.

Regra 5: SE Δ_D é nulo e Δ_N é muito grande ENTÃO o percentual de incômodo é extremo.

Regra 6: SE Δ_D é pequeno e Δ_N é nulo ENTÃO o percentual de incômodo é moderado.

Regra 7: SE Δ_D é pequeno e Δ_N é pequeno ENTÃO o percentual de incômodo é moderado.

Regra 8: SE Δ_D é pequeno e Δ_N é médio ENTÃO o percentual de incômodo é forte.

Regra 9: SE Δ_D é pequeno e Δ_N é grande ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.

Regra 10: SE Δ_D é pequeno e Δ_N é muito grande ENTÃO o percentual de incômodo é extremo.

Regra 11: SE Δ_D médio e Δ_N é nulo ENTÃO o percentual de incômodo é forte.

Regra 12: SE Δ_D é médio e Δ_N é pequeno ENTÃO o percentual de incômodo é forte.

Regra 13: SE Δ_D é médio e Δ_N é médio ENTÃO o percentual de incômodo é forte.

Regra 14: SE Δ_D é médio e Δ_N é grande ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.

Regra 15: SE Δ_D é médio e Δ_N é muito grande ENTÃO o percentual de incômodo é extremo.

Regra 16: SE Δ_D grande e Δ_N é nulo ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.

Regra 17: SE Δ_D é grande e Δ_N é pequeno ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.

Regra 18: SE Δ_D é grande e Δ_N é médio ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.

Regra 19: SE Δ_D é grande e Δ_N é grande ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.

Regra 20: SE Δ_D é grande e Δ_N é muito grande ENTÃO o percentual de incômodo é extremo.

Regra 21: SE Δ_D muito grande e Δ_N é nulo ENTÃO o percentual de incômodo é extremo.

Regra 22: SE Δ_D é muito grande e Δ_N é pequeno ENTÃO o percentual de incômodo é extremo.

Regra 23: SE Δ_D é muito grande e Δ_N é médio ENTÃO o percentual de incômodo é extremo.

Regra 24: SE Δ_D é muito grande e Δ_N é grande ENTÃO o percentual de incômodo extremo.

Regra 25: SE Δ_D é muito grande e Δ_N é muito grande ENTÃO o percentual de incômodo é extremo.

A figura 30 representa as regras inferidas no modelo fuzzy.

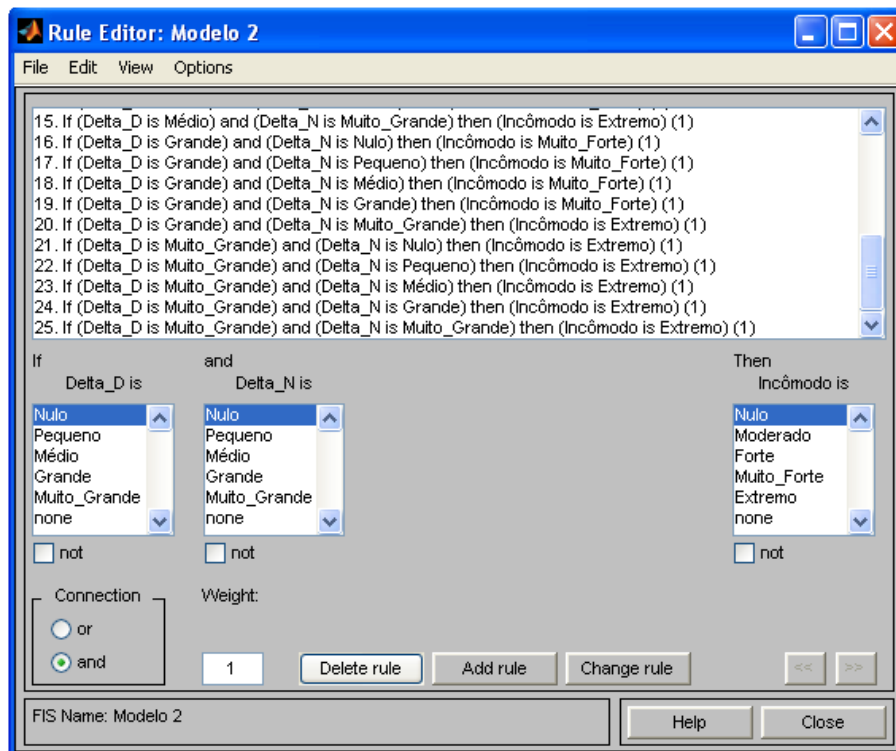


Figura 30: Regras *fuzzy* do sistema.
Fonte: Elaboração própria.

7.3.4 Defuzzificação

As figuras 31 e 32 mostram o resultado do modelo com as variáveis de *input* e *output*. A primeira e a segunda coluna destas figuras apresentam as variáveis de *input* e *output* do modelo. Enquanto a terceira coluna mostra a variável *output*. As linhas centrais que aparecem na primeira e segunda coluna são móveis e permitem a modificação das variáveis de *input*.

A partir destes dados apresentados, conclui-se que para uma variação de um $\Delta D = 5$ e $\Delta N = 5$ incômodo atinge 25%. Enquanto que para uma variação de um $\Delta D = 20$ e $\Delta N = 10$ o incômodo atinge 92% lembrando que estas variações dependem de uma condição residencial.

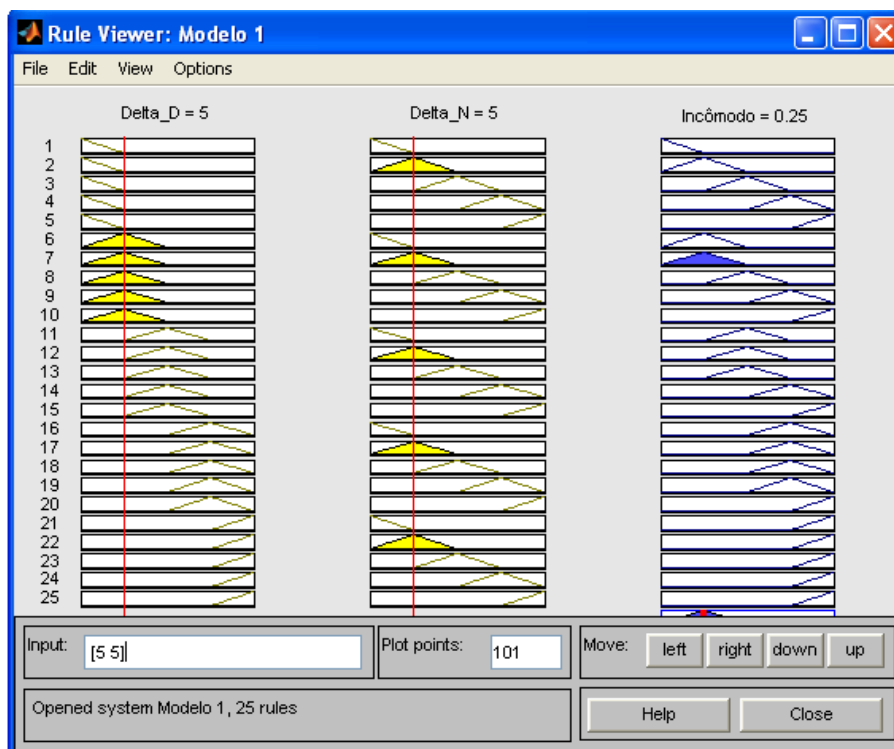


Figura 31: Representação dos valores das variáveis de entrada e saída.
Fonte: Elaboração própria.

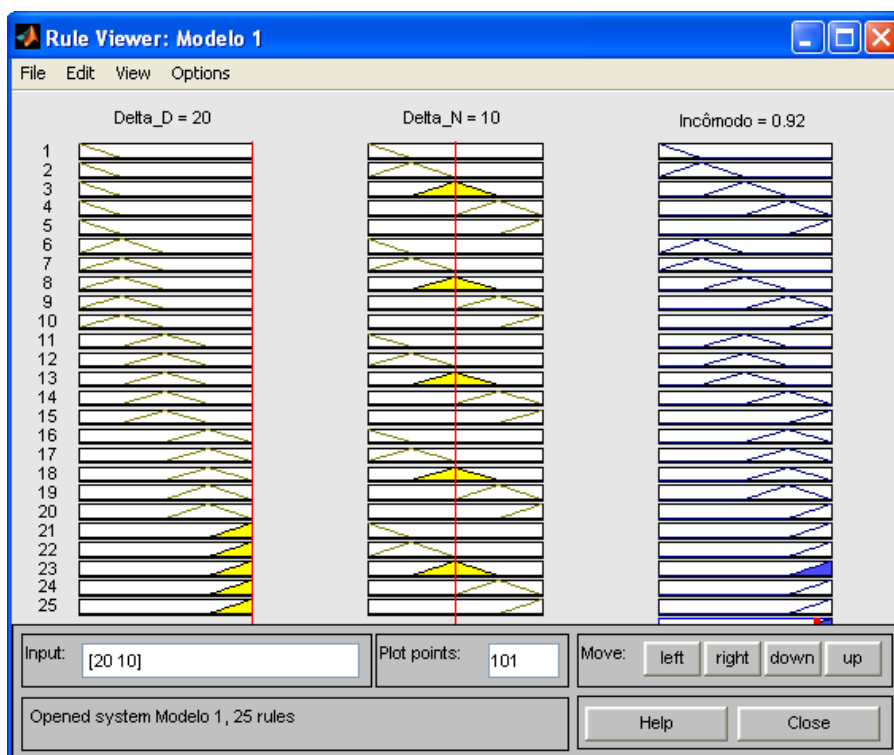


Figura 32: Representação dos valores das variáveis de entrada e saída.
Fonte: Elaboração própria.

Têm-se diversos valores para as variáveis ΔD e ΔN e a partir de várias junções destes valores obtém-se os valores de saída da variável *percentual de*

incômodo. Através deste sistema *fuzzy* foi gerada a tabela 13 com alguns destes valores simulados. Cada valor obtido para o *percentual de incômodo* depende da associação de um par de variáveis de entrada. E cada par com estes valores gera uma janela como a figuras apresentadas anteriormente.

Tabela 13: Valores simulados pelo modelo *fuzzy*.

Delta D	Delta N	Incômodo	%HAP
0	0	0,08	0, 000512
0	5	0,25	0, 015625
0	10	0,5	0, 125
0	15	0,75	0, 421875
0	20	0,92	0, 778688
5	0	0,25	0, 015625
5	5	0,25	0, 015625
5	10	0,5	0, 125
5	15	0,75	0, 421875
5	20	0,92	0, 778688
10	0	0,5	0, 125
10	5	0,5	0, 125
10	10	0,5	0, 125
10	15	0,75	0, 421875
10	20	0,92	0, 778688
15	0	0,75	0, 421875
15	5	0,75	0, 421875
15	10	0,75	0, 421875
15	15	0,75	0, 421875
15	20	0,92	0, 778688
20	0	0,92	0, 778688
20	5	0,92	0, 778688
20	10	0,92	0, 778688
20	15	0,92	0, 778688
20	20	0,92	0, 778688

Fonte: Elaboração própria.

Por último, a figura 33 apresenta todo o processo de *fuzzificação*, em forma gráfica. Os valores maiores para o incômodo se referem justamente às maiores variações para o Δ_D e o Δ_N .

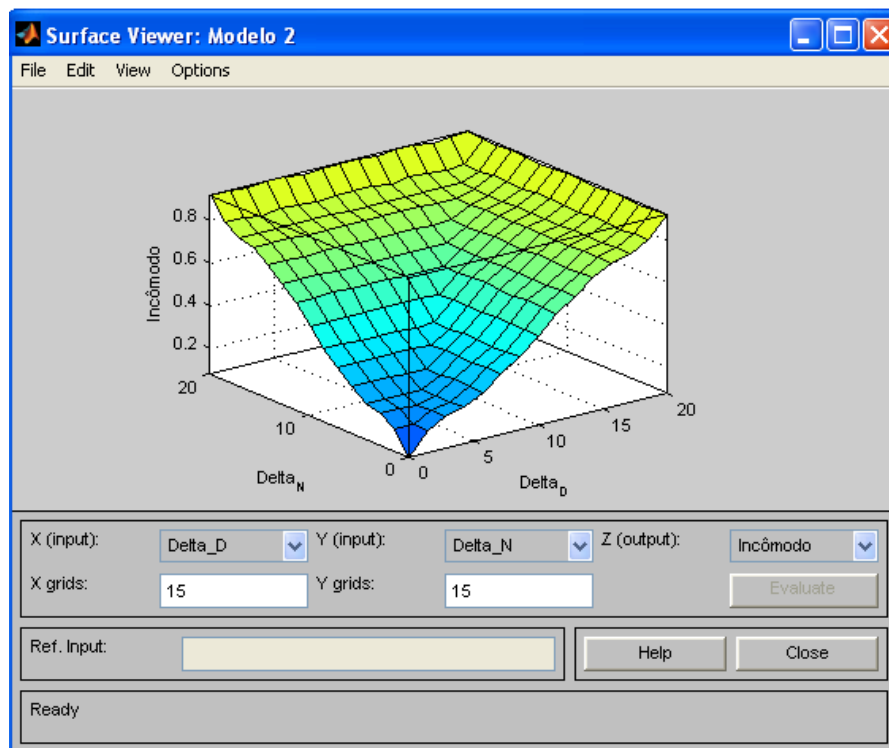


Figura 33: Representação gráfica.
Fonte: Elaboração própria.

A partir deste simples modelo é possível avaliar o número de pessoas incomodadas em uma determinada área por meio de variações do nível sonoro diurno e noturno.

Portanto, para comparar o percentual de pessoas altamente incomodadas com os estudos de Schultz, é preciso conhecer o percentual de pessoas altamente incomodadas pelo ruído aeronáutico neste modelo. Até agora, obteve-se apenas o percentual de pessoas incomodadas. Isto só será possível por meio de uma ferramenta da *Lógica Fuzzy*, conhecida como modificadores lingüísticos ou *hedges*, que será abordada a seguir.

7.4 Modificadores lingüísticos ou *hedges*

Através dos modificadores lingüísticos, é possível, gerar um conjunto maior de valores para uma variável lingüística a partir 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 u no conjunto *fuzzy* $M(hx)$.

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

Em essência, o modificador *muito* age como um intensificador, gerando um subconjunto do conjunto no qual ela opera, a figura 34 mostra este efeito. Assim, o operador *muito* agindo num conjunto *fuzzy* rotulado x , é definido por:

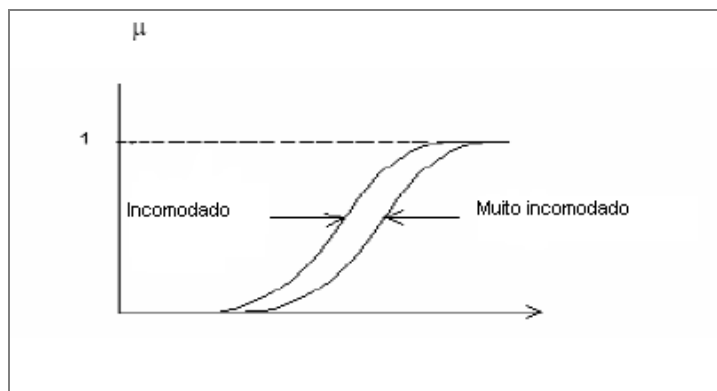


Figura 34: Efeito do modificador *muito*

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

$$\text{muito } x \Delta x^2$$

$$\text{mais } x \Delta x^{1,25}$$

$$\text{menos } x \Delta x^{0,75}$$

Como consequência, tem-se:

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

Desta forma o modificador *altamente* foi definido como:

$$\text{altamente} = \text{menos muito muito} = ((x^2)^2)^{0,75} = x^3$$

De modo equivalente,

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

Na tabela 13, citada anteriormente, já estão inseridos o percentual de pessoas altamente incomodadas, calculados por meio dos modificadores fuzzy.

7.5 Modelo Fuzzy baseado nas métricas LAeqD e LAeqN

Foi desenvolvido outro modelo *fuzzy* para avaliar o percentual de pessoas altamente incomodadas de acordo com as alternativas apresentadas para analisar o *encroachment*, a partir dos níveis critérios em LAeqD e LAeqN, dados pela NBR 10151/ 1987 para áreas residenciais. Este modelo é similar ao primeiro modelo *fuzzy* desenvolvido. No entanto, ele 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. E a vantagem deste modelo, é que a partir de quaisquer combinação de LAeqD e LAeqN desejada, já é possível obter o percentual de incômodo.

7.5.1 Descrição do modelo fuzzy II

As funções de pertinências utilizadas foram as triangulares, as implicações de cada uma das regras foram calculadas pelos operadores *AND* e *THEN*. O processo de *defuzzificação* foi feito através do método centróide.

As variáveis de entrada são LAeqD e LAeqN. Os termos lingüísticos utilizados para quantificá-las foram: “ *muito baixo*”, “*baixo*”, “*médio*”, “*alto*”, “*muito alto*”, neste sistema *fuzzy*. A variável de saída é o *percentual de incômodo*, e os termos lingüísticos utilizados para caracterizá-lo, foram: “*nulo*”, “*pequeno*”, “*moderado*”, “*forte*” e “*muito forte*”.

As figuras 35, 36, 37 e 38 apresentam as variáveis lingüísticas e os termos lingüísticos utilizados para qualificar cada variável.

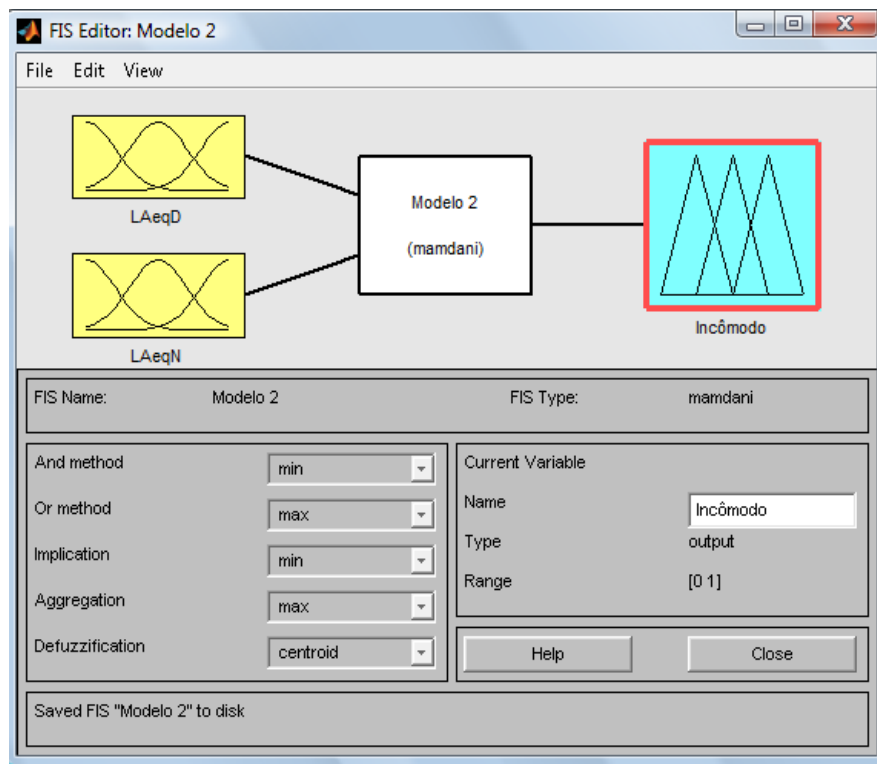


Figura 35: Variáveis de entrada e saída do modelo fuzzy II.
Fonte: Elaboração Própria.

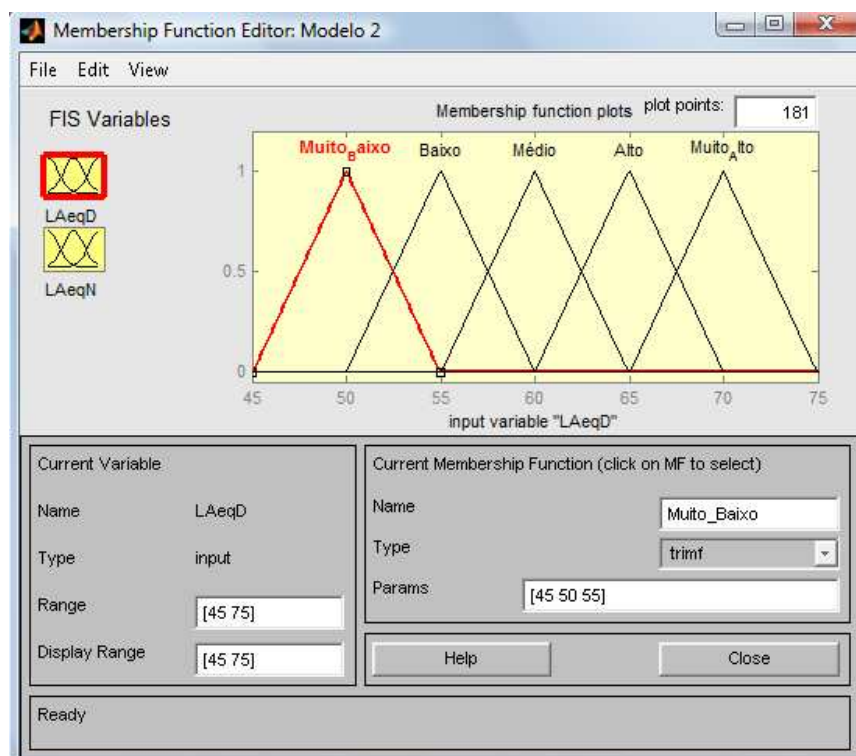


Figura 36: Fuzzificação de LAeqD.
Fonte: Elaboração Própria.

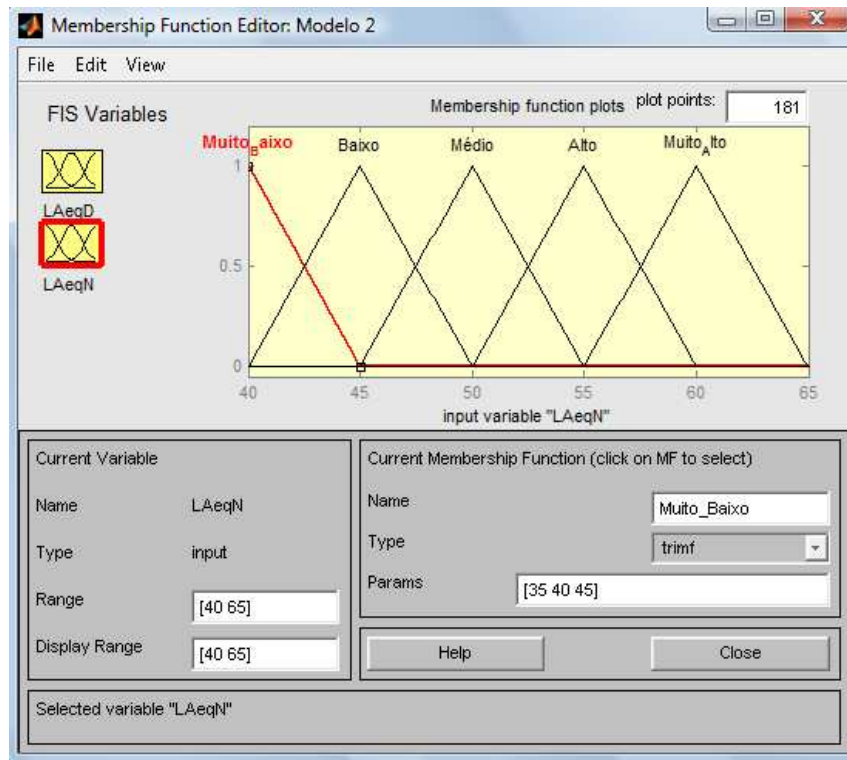


Figura 37: Fuzzificação de *LAeqN*.
Fonte: Elaboração Própria.

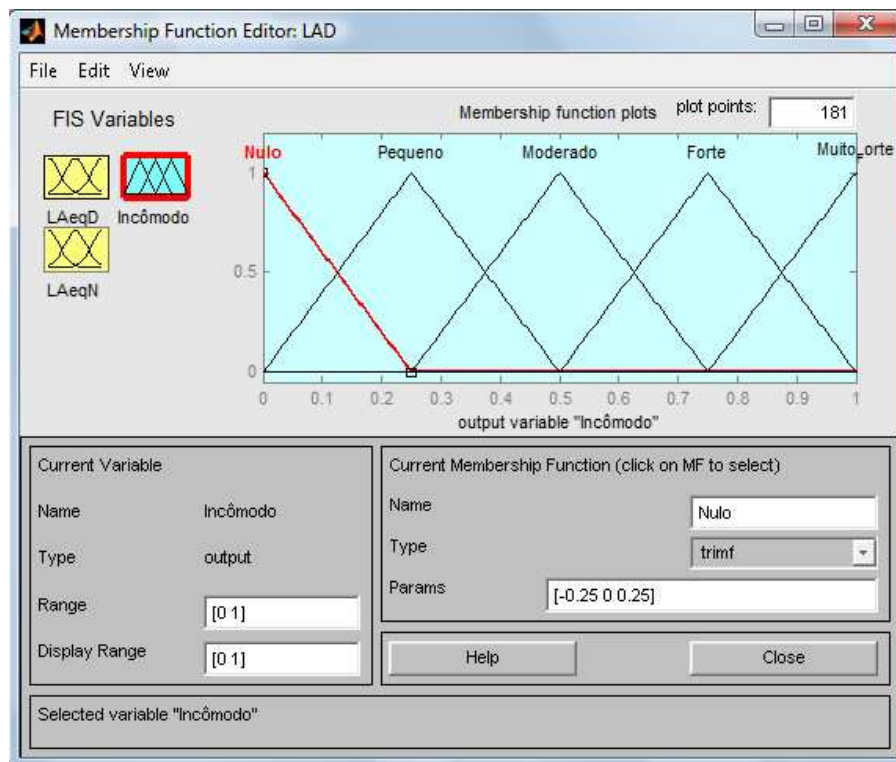


Figura 38: Fuzzificação da variável *percentual de incômodo*.
Fonte: Elaboração Própria.

A tabela 14 representa o mapa de regras para as variáveis de entrada *LAeqD* e *LAeqN* e para a variável de saída, o *percentual de incômodo*.

Tabela 14: Mapa de regras.

<i>LAeqD \ LAeqN</i>	<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>

Fonte: Elaboração própria.

Regra 1: SE *LAeqD* é muito baixo e *LAeqN* é muito baixo ENTÃO o percentual de incômodo é nulo.

Regra 2: SE *LAeqD* é muito baixo e *LAeqN* é baixo ENTÃO o percentual de incômodo é pequeno.

Regra 3: SE *LAeqD* é muito baixo e *LAeqN* é médio ENTÃO o percentual de incômodo é moderado.

Regra 4: SE *LAeqD* é muito baixo e *LAeqN* é alto ENTÃO o percentual de incômodo é forte.

Regra 5: SE *LAeqD* é muito baixo e *LAeqN* é muito alto ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.

Regra 6: SE *LAeqD* é baixo e *LAeqN* é muito baixo ENTÃO o percentual de incômodo é pequeno.

Regra 7: SE *LAeqD* é baixo e *LAeqN* é baixo ENTÃO o percentual de incômodo é pequeno.

Regra 8: SE *LAeqD* é baixo e *LAeqN* é médio ENTÃO o percentual de incômodo é moderado.

Regra 9: SE *LAeqD* é baixo e *LAeqN* é alto ENTÃO o percentual de incômodo é forte.

Regra 10: SE *LAeqD* é baixo e *LAeqN* é muito alto ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.

Regra 11: *SE LAeqD é médio e LAeqN é muito baixo ENTÃO o percentual de incômodo é moderado.*

Regra 12: *SE LAeqD é médio e LAeqN é baixo ENTÃO o percentual de incômodo é moderado.*

Regra 13: *SE LAeqD é médio e LAeqN é médio ENTÃO o percentual de incômodo é moderado.*

Regra 14: *SE LAeqD é médio e LAeqN é alto ENTÃO o percentual de incômodo é forte.*

Regra 15: *SE LAeqD é médio e LAeqN é muito alto ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.*

Regra 16: *SE LAeqD é alto e LAeqN é muito baixo ENTÃO o percentual de incômodo é forte.*

Regra 17: *SE LAeqD é alto e LAeqN é baixo ENTÃO o percentual de incômodo é forte.*

Regra 18: *SE LAeqD é alto e LAeqN é médio ENTÃO o percentual de incômodo é forte.*

Regra 19: *SE LAeqD é alto e LAeqN é alto ENTÃO o percentual de incômodo é forte.*

Regra 20: *SE LAeqD é alto e LAeqN é muito alto ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.*

Regra 21: *SE LAeqD é muito alto e LAeqN é muito baixo ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.*

Regra 22: *SE LAeqD é muito alto e LAeqN é baixo ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.*

Regra 23: *SE LAeqD é muito alto e LAeqN é médio ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.*

Regra 24: *SE LAeqD é muito alto e LAeqN é alto ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.*

Regra 25: *SE LAeqD é muito alto e LAeqN é muito alto ENTÃO o percentual de incômodo é muito forte.*

A figura 39 representa as regras inferidas no sistema especialista *fuzzy*.

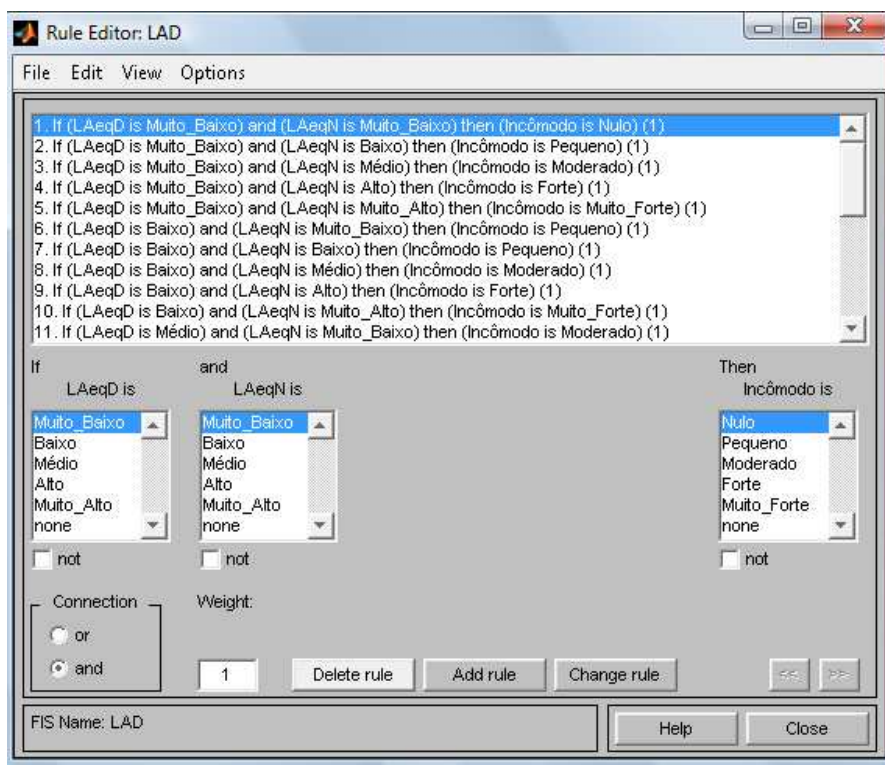


Figura 39: Regras *fuzzy* do modelo.
Fonte: Elaboração própria.

A figura 40 apresenta o resultado do modelo com as variáveis de *input* e *output*. A primeira e a segunda coluna destas figuras apresentam as variáveis de *input* e *output* do modelo. Enquanto a terceira coluna mostra a variável *output*, o *incômodo*. As linhas centrais que aparecem na primeira e segunda coluna são móveis e permitem a modificação das variáveis de *input*. A figura 41 representa o mapa de superfície do modelo.

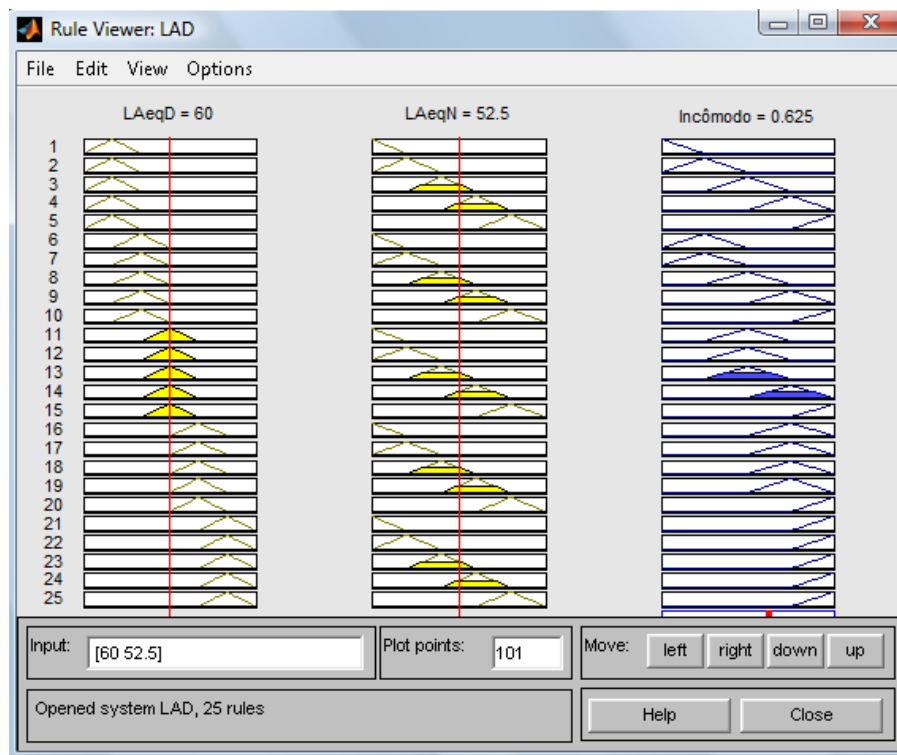


Figura 40: Dados de entrada e saída das variáveis.
Fonte: Elaboração própria.

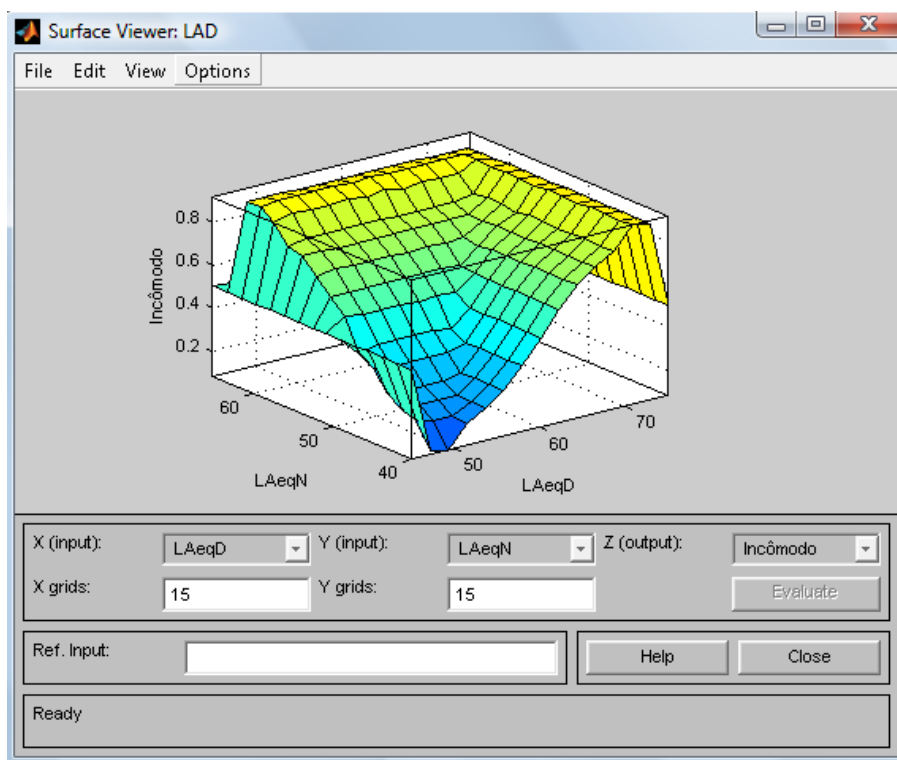


Figura 41: Representação gráfica.
Fonte: Elaboração própria.

No próximo capítulo será feita uma análise destes resultados, juntamente com as alternativas propostas de zoneamento da condição lógica para avaliar o *encroachment* no entorno dos aeroportos.

CAPÍTULO 8

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo será feita uma análise dos resultados a partir das curvas simuladas e dos modelos *fuzzy* desenvolvidos para avaliar o *encroachment* no entorno dos aeroportos escolhidos para este estudo. Através do Sistema de Informação Geográfica e dos dados censitários, obtidos do *site* do Ministério das cidades, foi possível avaliar o percentual de incômodo e de pessoas altamente incomodadas com base nas curvas simuladas.

8.1 Quantificação do *encroachment* a partir do DNL equivalente.

Apenas visualmente, já se percebe que as curvas de ruído DNL 65 dB (A) para os aeroportos de Congonhas e Recife abrangem uma área muito menor que as curvas calculadas em DNL, derivados dos níveis sonoros nas métricas LAeqD e LAeqN da NBR 10151. Sendo assim, há uma população muito maior submetida aos efeitos adversos do ruído.

Desta forma, para controlar e limitar o *encroachment* a condições aceitáveis foi feita uma quantificação do impacto ambiental sonoro do *encroachment* utilizando o percentual de pessoas altamente incomodadas obtidos por Schultz e pela modelagem *fuzzy*, afim de uma análise comparativa entre estes estudos. Os cálculos foram realizados com o uso de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), que possui informações geográficas necessárias, o número total da população no interior de cada curva de ruído, a partir do qual foi ainda possível obter uma representação gráfica dos setores censitários mais sensíveis para avaliar os efeitos adversos do ruído.

As curvas de ruído em DNL equivalente para o Aeroporto de Congonhas abrangem uma área maior, atingindo os municípios de Diadema e São Bernardo do Campo, além de São Paulo, e no caso de Recife as curvas de DNL equivalente abrangem também o município de Jaboatão, como se percebe nas figuras 42 e 43. Analisando apenas as áreas para uso residencial e áreas mistas pode-se quantificar o *encroachment* nestas áreas, a partir de uma análise comparativa utilizando um

sistema de informações geográficas entre os índices de *encroachment* do zoneamento aeroportuário atual e do novo zoneamento proposto.

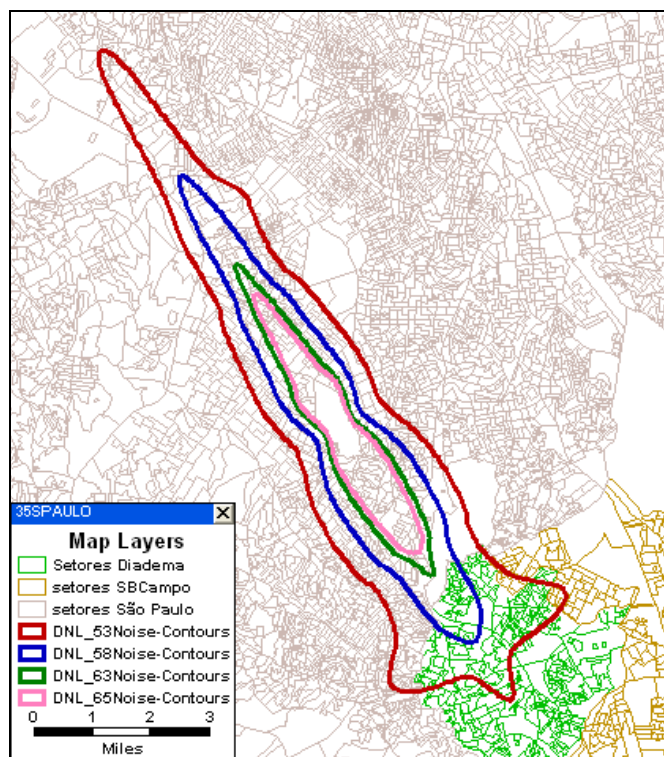


Figura 42: Zoneamento proposto a partir das áreas residenciais e mistas da NBR 10151 para o aeroporto de Congonhas.
Fonte: GERA

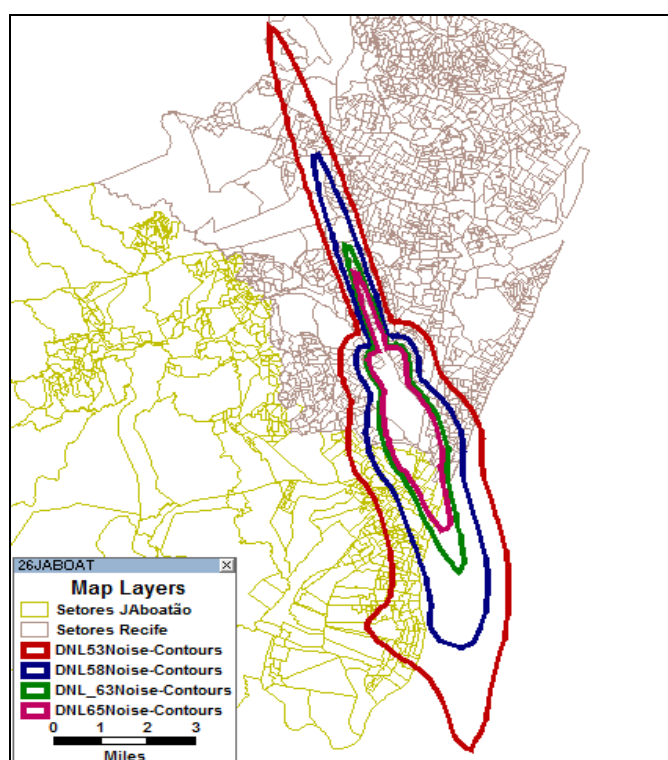


Figura 43: Zoneamento proposto a partir das áreas residenciais e mistas da NBR 10151 para o aeroporto de Recife.
Fonte: GERA

A existência de pessoas situadas no interior da curva $DNL \geq 65 \text{ dB(A)}$ estão em desacordo com a legislação aeroportuária. Portanto, neste trabalho não levou em consideração este número. As tabelas 15 e 16 apresentam a relação do número de pessoas no interior de cada curva de ruído e o percentual de pessoas incomodadas de acordo com a equação proposta por Schultz.

Tabela 15: Percentual HAP, segundo Schultz no aeroporto de Congonhas.

DNL	%HAP (Schultz)	Nº de pessoas no interior das curvas	Nº de HAP
53	0,025	194.290	4857
57	0,054	81.399	4395
63	0,063	29.600	1865
65	0,14	17.457	2444

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 16: Percentual HAP segundo Schultz no aeroporto de Recife.

DNL	%HAP (Schultz)	Nº de pessoas no interior das curvas	Nº de HAP
53	0,025	335353	8384
57	0,054	130613	7053
63	0,063	51891	3269
65	0,14	35665	4993

Fonte: Elaboração Própria.

Para melhor caracterizar o *encroachment*, há aproximadamente 112.890 pessoas localizadas entre as curvas $DNL 53 \text{ dB(A)}$ e 58 dB(A) , 51.799 entre as curvas 58 dB(A) e 63 dB(A) e 12.143 entre as curvas 63 e 65 dB(A) . Porém, de acordo com o atual zoneamento aeroportuário estas pessoas estão em conformidade com a legislação atual, mas para as pessoas localizadas entre as curvas 63 e 65 dB(A) os efeitos adversos do ruído como por exemplo, a interferência na fala, interferência no sono, e o incômodo sonoro, são mais percebidos.

O cálculo do percentual de pessoas altamente incomodadas está relacionando à métrica DNL, o DNL foi representado como um valor médio do DNL em cada faixa de exposição sonora, como por exemplo, as curvas $DNL 53 \text{ dB(A)}$ e 58 dB(A) representam esse valor médio. Assim é possível determinar, em cada faixa de exposição sonora, o número de pessoas submetidas aos efeitos adversos do ruído.

A partir do percentual de pessoas altamente incomodadas determina-se a população altamente incomodada de acordo com as pessoas submetidas à exposição

sonora em cada faixa de nível sonoro, como mostra a tabela 17 e 18 no caso dos dois aeroportos supracitados. E ainda, é possível obter uma representação do *encroachment* em cada área citada anteriormente, da NBR 10151.

Tabela 17: Percentual de pessoas altamente incomodadas e o número de pessoas altamente incomodadas. Congonhas

DNL em dB(A)	Valor médio do DNL por faixa	População exposta ao ruído	%HAP	População altamente incomodada
53 - 58	56,5	112.890	0,0497	5.611
58 - 63	60,5	51.799	0,0893	4.626
63 - 65	64	12.143	0,136	1.651
53-65		176.833		11.888

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 18: Percentual de pessoas altamente incomodadas e o número de pessoas altamente incomodadas. Recife

DNL em dB(A)	Valor médio do DNL por faixa	População exposta ao ruído	%HAP	População altamente incomodada
53 - 58	56,5	335.353	0,0497	16.667
58 - 63	60,5	130.613	0,0893	11.663
63 - 65	64	51.891	0,136	7.057
53-65	59	299.688	0,073	21.877

Fonte: Elaboração Própria.

De acordo com o desenvolvido acima, o limite de área residencial encontra-se entre 53dB(A) e 58dB(A). No entanto, será necessária a adoção de um valor intermediário para controlar os níveis de *encroachment*. E mesmo assim, haverá um número de pessoas altamente incomodadas, porém aceitáveis de acordo com a NBR 10151, como se observa nestes indicadores na tabela 19, para o Aeroporto de Congonhas.

Tabela 19: Relação entre o DNL e a população altamente incomodada.

Separador DNL em dB(A) para uso residencial	População altamente incomodada
53	N
58	5.611+N
63	5.611+4.526+N
65	11.888+N

Fonte: Elaboração Própria.

Na qual:

N é o número de pessoas altamente incomodadas aceitáveis.

8.2 Quantificação do *encroachment* a partir e do modelo *Fuzzy* baseado na NBR 10151/1987

Através dos modificadores *fuzzy* é possível justificar o uso do termo “*altamente incomodado*”, que é gerado a partir da função *fuzzy* para o percentual de pessoas *incomodadas*. Assim a função *altamente incomodada* corresponde a uma função de pertinência *fuzzy* ao cubo do *percentual de incômodo*.

Os valores para o percentual de pessoas incomodadas foram obtidos do modelo *fuzzy*, e a partir de sucessivas simulações, obtiveram-se os seguintes resultados apresentados na tabela13 do capítulo anterior. Através destes valores foram aplicados os modificadores *fuzzy* para encontrar o percentual de pessoas altamente incomodadas.

Desta forma, relacionou-se o incômodo à resposta estimada da população, através de uma correção para os níveis sonoros a partir de uma condição residencial determinada. A partir da condição residencial adotada empregou-se uma estratégia de 5 dB(A) ou 10 dB(A). Através do gráfico gerado no MATLAB, versão 7.0, foi possível fazer uma comparação com a curva original obtida por Schultz.

As tabelas 20, 21 e 22 representam as três áreas da NBR 10151 referentes ao uso residencial, que determinam a condição inicial.

Tabela 20: Condição residencial LAeqD = 50 e LAeqN = 45.

	LAD	LAN	DNL	HAP (%)
0	50	45	52,58	0,05
5	55	50	57,58	1,56
10	60	55	62,58	12,50
15	65	60	67,58	42,19
20	70	65	72,58	77,87

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 21: Condição residencial LAeqD = 55 e LAeqN = 50

	LAD	LAN	DNL	HAP (%)
0	55	50	57,58	0,05
5	60	55	62,58	1,56
10	65	60	67,58	12,50
15	70	65	72,58	42,19
20	75	70	77,58	77,87

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 22: Condição residencial LAeqD = 60 e LAeqN = 55.

Delta D/N	LAD	LAN	DNL	HAP (%)
0	60	55	62,58	0,05
5	65	60	67,58	1,56
10	70	65	72,58	12,50
15	75	70	77,58	42,19
20	80	75	82,58	77,87

Fonte: Elaboração Própria.

As curvas obtidas da condição lógica tem o mesmo comportamento, sofrendo apenas um deslocamento de 5 dB(A), conforme mostra a figura 44. A partir de um determinado nível sonoro, o percentual de pessoas altamente incomodadas cresce numa proporção muito maior que a curva de Schultz. As curvas foram esboçadas segundo a NBR 10151 para áreas residenciais, assim o percentual de pessoas altamente incomodadas pode ser avaliado em cada situação.

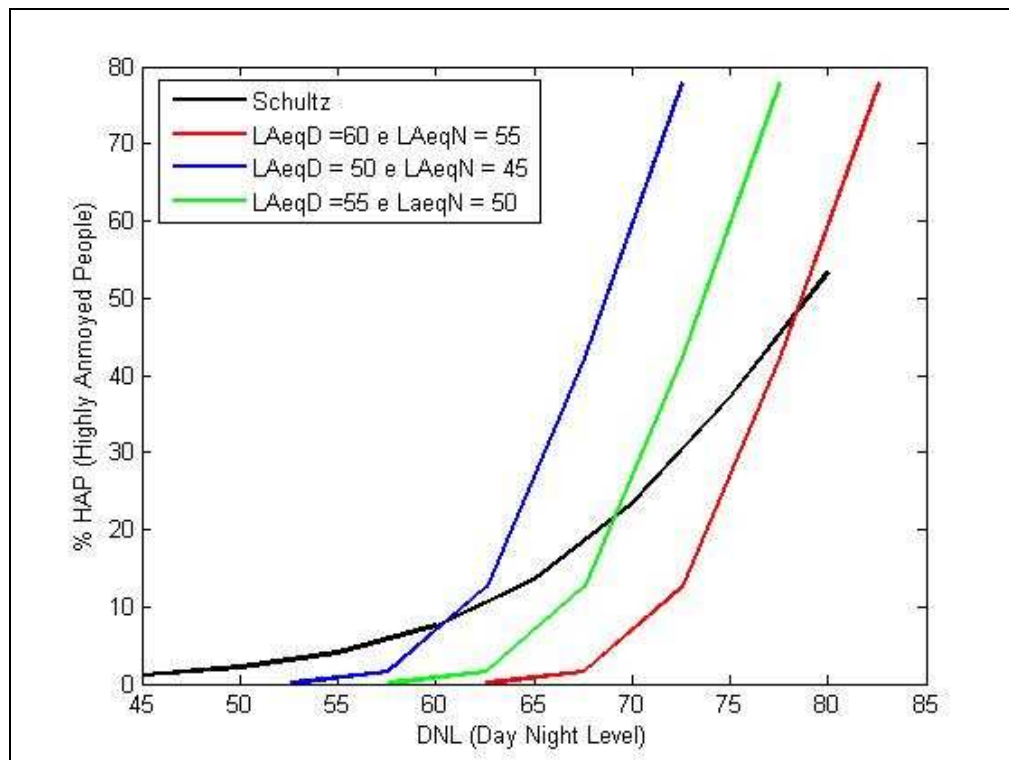


Figura 44: Gráfico obtido a partir do modelo *fuzzy* usando $\Delta = 5$.

Fonte: Elaboração própria.

As tabelas 23, 24 e 25 levam em consideração a estratégia de 10 dB (A) a partir da condição residencial empregada.

Tabela 23: Condição residencial LAeqD = 55dB(A) e LAeqN = 45 dB(A).

	LAD	LAN	DNL	HAP (%)
0	55	45	55	0,05
5	60	50	60	1,56
10	65	55	65	12,50
15	70	60	70	42,19
20	75	65	75	77,87

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 24: Condição residencial LAeqD = 60 dB(A) e LAeqN = 50 dB(A).

	LAD	LAN	DNL	HAP (%)
0	60	50	60	0,05
5	65	55	65	1,56
10	70	60	70	12,50
15	75	65	75	42,19
20	80	70	85	77,87

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 25: Condição residencial LAeqD = 65dB(A) e LAeqN = 55 dB(A).

	LAD	LAN	DNL	HAP (%)
0	65	55	65	0,05
5	70	60	70	1,56
10	75	65	75	12,50
15	80	70	80	42,19
20	85	75	85	77,87

Fonte: Elaboração Própria.

Com base nos resultados obtidos do modelo *fuzzy*, plotou-se o gráfico para as três condições para facilitar a comparação com a curva de Schultz. Da condição LAeqD = 55 e LAeqN = 45 obteve-se a curva em vermelho, quando comparada à curva de Schultz, observa-se que a partir do nível de 65 dB(A) o percentual de pessoas incomodadas aumenta numa proporção muito maior. Esta condição é a que melhor exprime o incômodo para uma área residencial. As outras condições são referentes às áreas mistas de vocação comercial e de lazer, sendo estes níveis considerados altos para uso residencial. As curvas têm o mesmo comportamento, sofrendo apenas um deslocamento de 10dB(A), como se observa na figura 45.

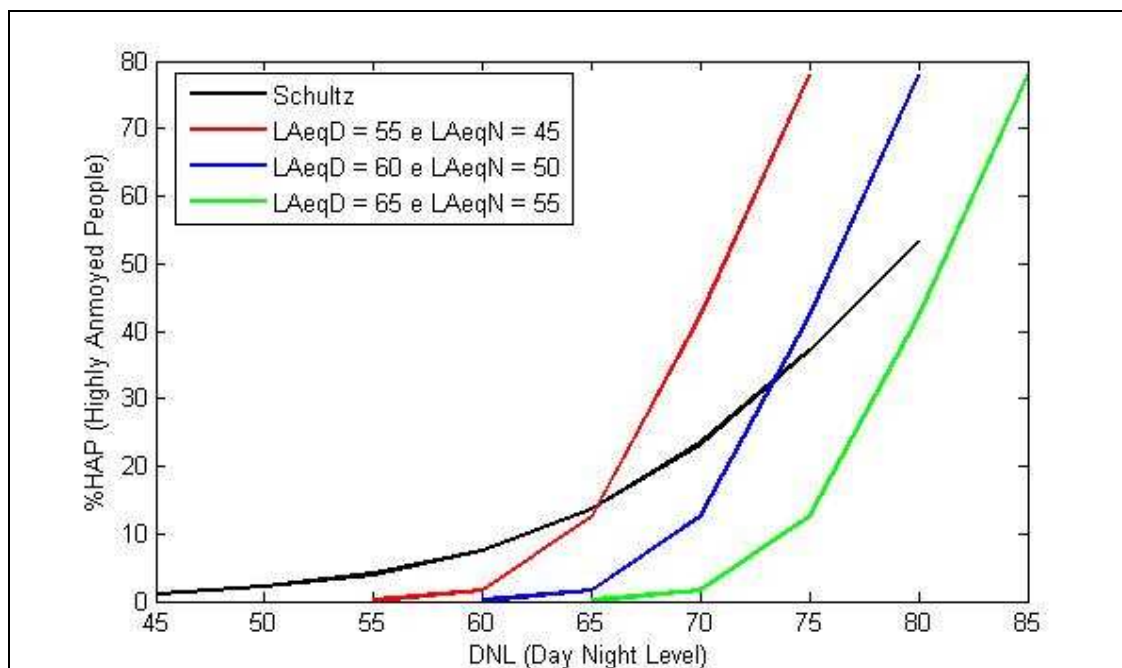


Figura 45: Gráfico obtido a partir do modelo *fuzzy* usando $\Delta = 10$.
Fonte: Elaboração própria.

As tabelas 26 e 27 apresentam o número de pessoas em cada curva derivada da condição lógica para cada área residencial da NBR 10151 para ambos os aeroportos.

Tabela 26: Aeroporto de Recife.

Condição	Número de pessoas
$LA_{eqD} \leq 50 \cup LA_{eqN} \leq 45$	160.753
$LA_{eqD} \leq 55 \cup LA_{eqN} \leq 50$	66.793
$LA_{eqD} \leq 60 \cup LA_{eqN} \leq 55$	26.730

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 27: Aeroporto de Congonhas.

Condição	Número de pessoas
$LA_{eqD} \leq 50 \cup LA_{eqN} \leq 45$	311.623
$LA_{eqD} \leq 55 \cup LA_{eqN} \leq 50$	138.961
$LA_{eqD} \leq 60 \cup LA_{eqN} \leq 55$	59.015

Fonte: Elaboração Própria.

8.2.1 Análise do *encroachment* a partir da condição lógica $L_{AeqD} \leq 65$ AND $L_{AeqN} \leq 55$ para o zoneamento aeroportuário.

A tabela 28 representa uma comparação entre o número de pessoas no interior da curva de ruído resultante da condição $L_{AeqD} \leq 65$ AND $L_{AeqN} \leq 55$, e $DNL = 65$ dB(A) nos aeroportos de Congonhas e Recife.

Tabela 28: Comparação entre a $DNL = 65$ dB(A) e $L_{AeqD} \leq 65$ AND $L_{AeqN} \leq 55$

Condição	Aeroporto de Recife	Aeroporto de Congonhas
$L_{AeqD} \leq 65$ AND $L_{AeqN} \leq 55$	59.015	20.730
$DNL = 65$ dB(A)	35.665	17.457

Fonte: Elaboração Própria.

Aproximadamente 3273 pessoas se beneficiariam no caso do aeroporto de Congonhas, enquanto no aeroporto de Recife, 23.350 pessoas se beneficiariam com a nova proposta³. Com base neste resultado pode-se apenas caracterizar um maior número de pessoas incomodadas através da condição lógica, no entanto, este estudo apresenta-se como uma justificativa plausível para a necessidade de uma revisão do zoneamento aeroportuário, para evitar os efeitos adversos do ruído sobre a população.

8.3 Quantificação do *encroachment* a partir do modelo Fuzzy baseado nas métricas L_{AeqD} e L_{AeqN} .

A partir da figura 40 (do capítulo anterior) foram geradas várias combinações de L_{AeqD} e L_{AeqN} para obter o percentual de incômodo. Com a aplicação dos modificadores *fuzzy* obtém-se o percentual de pessoas altamente incomodadas.

Através destas combinações pode-se obter o valor do percentual e número de pessoas altamente incomodadas para qualquer condição desejada, dependendo dos níveis sonoros aceitáveis para cada tipo de área, como representado nas tabelas

³ No Aeroporto de Congonhas não tem movimentação noturna representativa, por isso o número de pessoas em relação ao Aeroporto de Recife é bem menor.

29 e 30. Neste trabalho, foram utilizadas apenas as combinações de LAeqD e LAeqN para áreas residenciais da NBR 10151.

Tabela 29: 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	0,5	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

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 30: 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	0,5	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

Fonte: Elaboração Própria.

A tabela 31 representa o percentual de pessoas altamente incomodadas de acordo com a equação de Schultz. Para o nível sonoro 65dB(A) apenas 13,59% das pessoas são consideradas como altamente incomodadas.

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 = 55dB(A)) o percentual de pessoas altamente incomodadas é muito maior do que Schultz considera.

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.

Tabela 31: Relação entre DNL e HAP.

DNL	HAP (%)
40	0,576
45	1,1102
50	2,120
52,57	2,32
55	4,030
57,58	5,91
60	7,52
62,58	11,54
65	13,59
70	23,32
75	37,05
80	53,25

Fonte: Schultz, 1978

CONCLUSÃO

Com base no desenvolvimento deste trabalho conclui-se que a utilização da métrica DNL não é adequada para estabelecer um zoneamento aeroportuário, e que a condição para uso residencial $DNL \leq 65$ não é equivalente à condição $LAeqD \leq 65 \cap LAeqN \leq 55$. Estas duas condições levam a resultados diferentes dependendo da influência da amplitude acústica (Δ) de cada aeroporto. Como foi visto, no aeroporto de Recife, a adoção de $DNL = 65$ dB(A) conduz a valores de níveis de ruído noturnos muito elevados, enquanto em Congonhas os níveis diurnos que são elevados.

Desta forma, ao invés de utilizar a métrica DNL preconizou-se a utilização de uma condição lógica baseada nas métricas LAeqD e LAeqN para amenizar os efeitos adversos do ruído causados a comunidade, de acordo com as alternativas de zoneamento aeroportuário propostas.

A escolha dos valores LAeqD e LAeqN foi baseado numa condição lógica a partir dos níveis sonoros utilizados para as áreas residenciais da NBR 10151/2000, afim de que fossem suficientemente baixos para corrigir o zoneamento anterior sem prejudicar as atividades no entorno do aeroporto.

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.

Considerando que o modelo proposto por Schultz é impreciso, foi desenvolvido um modelo *fuzzy* do incômodo produzido pelo ruído aeronáutico, baseado nas queixas da comunidade definidas pela norma NBR10151/1987 e nas métricas LAeqD e LAeqN. Assim, a partir dos resultados do modelo *fuzzy* para valores baixos, o incômodo sentido pela população é menor que o proposto por Schultz, que após um valor determinado corresponde a um incômodo muito maior.

A vantagem de utilizar no modelo *fuzzy* as funções triangulares deve-se ao fato dessas funções serem ajustadas facilmente através de um processo de otimização, baseado em algoritmos genéticos.

O ruído provocado por transporte terrestre não está regido pela NBR 10151/2000. Apesar das resoluções CONAMA 252/62 limitar o ruído na fonte, nas condições de repouso e em aceleração, os níveis de ruído encontrados nas principais avenidas da cidade ultrapassam o nível sonoro de 70 dB (A). Nestas condições é possível aceitar que o nível sonoro produzido pelo aeroporto durante o período diurno e noturno seja um pouco superior ao nível preconizado por esta norma da ABNT.

Com a adoção do zoneamento aeroportuário proposto de acordo com os tipos de áreas da NBR 10151 conseguiu-se reduzir o percentual de pessoas altamente incomodadas, e ainda, limitar o *encroachment* e os efeitos adversos do ruído sobre a população a condições aceitáveis. Trata-se de um trabalho preliminar que deverá ser validado por meio da aplicação de questionários a população submetida a altos níveis de exposição sonora.

A proposta é que sejam desenvolvidos trabalhos futuros nesse sentido, pois é muito importante que seja realizada uma monitoração do ruído de tráfego aéreo para avaliar os reais níveis sonoros e compará-los com os níveis obtidos em simulações acústicas.

O modelo apesar de ser baseado na norma NBR 10151/1987, ainda pode ser objeto de estudos e calibração para aproximá-lo das condições reais. Também pode ser desenvolvida uma monitoração do ruído nas principais avenidas da cidade e modelos *fuzzy* para avaliar o incômodo derivado do ruído de transporte terrestre.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDRE, A., “An assessment of certain causal models used in surveys of aircraft noise annoyance”, *Journal of Sound and Vibration*, v. 44, pp.119-125, 1976.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10.151. “Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade” - *Procedimento*, Rio de Janeiro, 2000.

BERANEK, L., Kryter, K., and Miller, L., “Reaction of people to exterior aircraft noise”. *Noise Control, Acoust. Soc. Am.*, September, pp. 23–32, 1959.

BERANECK, L., “Noise And Vibration Control”., *Mc Graw –Hill Vbook Company*, New York 1971.

BISTAFA, S.R., “Acústica aplicada ao controle de ruído”. *Edgard Blücher*, 1ª ed. São Paulo, 2006.

BOTTELDOOREN, D., Verkeyn, A., Cornelis, C. and De Cock, M., “On the meaning of noise annoyance modifiers: a fuzzy set theoretical approach”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 88(2), pp. 239 – 251, 2002.

BOTTELDOOREN, D., and Verkeyn, A., “Fuzzy models for accumulation of reported community noise annoyance from combined sources”, *Journal of the Acoustical Society of America* v. 112 (4), 1496 – 1508. October 2002.

BOTTELDOOREN, D., and Verkeyn, A., “A fuzzy rule based framework for noise annoyance modeling”, *Journal Acoustical Society America* v. 114 (3), pp. 1487 – 1498, September, 2003.

BRASIL. Ministério da Aeronáutica. Portaria 1.141/ GM5. “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, Seção I, Dezembro, 1987.

CAEP- Committee on Aviation Environmental Protection: “Encroachment at UK airports – results of initial analyses”. *Working Group 2: Airports and Operations*. Osaka, Japan, December, 2002

CAEP- Committee on Aviation Environmental Protection. “Methodology for encroachment calculation: an application to Brazilian airports”. *Working Group 2: Airports and Operations*. Bern, Switzerland, April, 2003.

CAEP- Committee on Aviation Environmental Protection. Report: “Population/ housing encroachment in the vicinity of airports”. *Working Group 2: Airports and Operations*. Montreal, February, 2004

EPA- Environmental Protection Agency “Information on Levels of Environmental Noise Requisite to Protect Public Health and Welfare with an Adequate Margin of Safety,” *U.S. Environmental Protection Agency*, EPA/ ONAC, Washington DC, 1974.

FAA- Federal Aviation Administration. “Aviation Noise Effects”. *US Department of Transportation, Office of Environmental and Energy*, Washington DC 20951, March, 1985.

FAA- Federal Aviation Administration. “Impact of Noise on People”. *US Department of Transportation, Office of Environmental Quality*, Washington DC, May 1977.

FICAN - Federal Interagency Committee on Aviation Noise, 1997. “Effects of aviation noise on awakenings from sleep”. Disponível em < www.fican.org/pages/sleepdst.html > Acesso em: 20 de março de 2009.

FICON- Federal Interagency Committee on Noise, “Federal Agency Review of Selected Airport Noise Analysis Issues,” *Report for the Department of Defense, Washington, DC*, 1992.

FIDELL, S., “The Schultz curve 25 years later: A research perspective”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v.114 (6), pp. 3007–3015, December, 2003.

FIDELL, S.; “Assessment of the effectiveness of aircraft noise regulation”, *Noise & Health*, pp. 17-25, 1999.

FIDELL, S.; Silvati, L., “Parsimonious alternative to re-gression analysis for characterizing prevalence rates of aircraft noise annoyance”, *Noise Control Eng. J.* 52(2), pp.56-68, March – April, 2004.

FIDELL, S., Schultz, T. J., and Green, D., "A theoretical interpretation of the prevalence rate of noise-induced annoyance in residential populations", *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 84, pp. 2109–2113, 1988.

FIDELL, S, Barber, D.S. "Updating a dosage-effect relationship for the prevalence of annoyance due to general transportation noise", *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 89, pp. 221-233, January, 1990.

FIELDS, J. M., et al. "Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: research and a recommendation," *J. Sound Vib.* v. 242(4), pp. 641–679, 2001.

FIELDS, J. M., "Effect of personal and situational variables on noise annoyance in residential areas", *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 93, pp. 2753-2763, 1993.

FIELDS, J.M., "Reactions to environmental noise in an ambient noise context in residential areas", *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 104(4), pp. 2245-2260, 1998.

FINEGOLD, L., Harris, C. S., and von Gierke, H. E., "Community annoyance and sleep disturbance: Updated criteria for assessing the impacts of general transportation noise on people", *Noise Control Eng. J.* v. 42, pp. 25–30, 1994.

GREEN, D. M., and Fidell, S., "Variability in the criterion for reporting annoyance in community noise surveys", *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 89, pp. 234–243, 1991.

IAC – Instituto de Aviação Civil, "Método de avaliação dos níveis de ruído e de incômodo gerados pela operação de aeronaves em aeroportos". *Boletim Técnico no 4102-058*. Brasil, 1981.

IAC- INSTITUTO DE AVIAÇÃO CIVIL. "Controle de Ruído Aeroportuário". *Stp39. Aga/eng. Icao*, 4º. edição, 1999.

ICAO- International Civil Aviation Organization, "Assembly Resolution A35-5". *Doc 9848, Appendix C*. USA, 2004.

ICAO- International Civil Aviation Organization. "ICAO's Policies on Charges for Airports and Air Navigation Services". *Doc 9082, 7º Edition*, 2004.

INFRAERO- Empresa Brasileira de Infra-estrutura Aeroportuária. Disponível em < www.infraero.com.br >. Acesso em: 18 de maio de 2008.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em < www.sidra.ibge.gov.br >. Acesso em: em 10 de julho de 2008.

JOB, R.F.S., “Community response to noise: A review of factors influencing the relationship between noise exposure and reaction”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 83, pp. 991 - 1001, 1988.

JOB, R.F.S., “Psychological factors of community reaction to noise”. Ed. *Noise and man '93: Noise as a public health problem*. France: Institut National de Recherche sur les Transports et Leur Securite. v. 3, pp. 48-59, 1993.

KRYTER, K. D., “Community annoyance from aircraft and ground vehicle noise”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 72, pp. 1222–1242, 1982.

JOB, R. F. S., “Community response to noise: A review of factors influencing the relationship between noise exposure and reaction”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 83, 991–1001, 1988.

MENDEL, J. M., “Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 83, nº 3, pp. 345-377, Março, 1995.

MIEDEMA, H.M.E., and Vos, H., “Exposure-response relationships for transportation noise”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v.104, pp. 3432–3445, 1988.

MIEDEMA, H.M.E., and Oudshoorn, C.G.M. “Annoyance from Transportation Noise: Relationships with Exposure Metrics DNL and DENL and Their Confidence Intervals Environmental”, *Health Perspectives*, v. 109 (4), April, 2001.

MIEDEMA, H.M.E., e Vos, H., “Noise sensitivity and reactions to noise and other environmental conditions”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 3, (113), p. 1.492-1.504, March, 2003.

MILLER, J. D., , “Effects of noise on people”. In: *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 56, pp. 112-144, 1974

NUSSENZVEIG, H. M., “Curso de Física Básica”. v. 2, 4ª. ed. Ver. – São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

PDA – Plano de Desenvolvimento do Aeroporto Internacional de Congonhas, Prefeitura de São Paulo, 2003

RECIFE. Lei Nº 16.176 “Lei de Uso e Ocupação do Solo da Cidade do Recife”, de Abril de 1996, *Diário Oficial da União*, Brasília

REVOREDO, T., Slama, J., “Noise metrics comparison and its use on urban zoning in airport surveys: A Brazilian case study”. *Journal of Air Transport Management*, pp. 304 – 308, 2008.

ROSENBLITH, W., Stevens, K. N., “Handbook of Acoustic Noise Control”, *Noise and Man*, WADC Technical Report 52-204, Wright Air Development Center, OH, v.2, 1953.

SANCHO, V. M. & Sencherms, A. G. “Curso de acústica em arquitetura Colégio oficial de arquitetos de Madrid”, Madri, 1983.

SLAMA, J. G., “Apostila de Curso de Acústica Ambiental”. COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007a.

SLAMA, J. G., “Apostila de Curso de Ruído Aeroportuário”. COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007b.

SLAMA, J. G., Mora-Camino F. A. C., and Revoredo, T. C., “Is DNL appropriate for airport noise zoning”, *In: European conference on Noise Control*, Paris, July, 2008.

SCHOMER, P., “On normalizing DNL to provide better correlation with response”, *Sound Vibration*, pp. 14 – 23, 2002.

SCHOMER, P. “Assessment of noise annoyance”. *Schomer and Associates*, Champaign, Illinois, USA, April, v.22, 2001.

SCHOMER, P., “Criteria for assessment of noise annoyance”. *Noise Control Eng. J.* v. 53(4), july, 2005.

SHAW, E. A.G. “Noise environments outdoors and the effects of community noise exposure”. *In: Noise control Engeneering.* v. 44, June, pp. 109-119, 1996.

SOUSA, D. S., “Instrumentos de gestão da Poluição Sonora para a Sustentabilidade das Cidades Brasileiras”. Tese de D.Sc., COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

SOUZA, F. P. "Efeitos da Poluição Sonora no Sono e na Saúde em Geral – Ênfase Urbana". Disponível em: < <http://www.icb.ufmg.br/1pf/2-1.html> >. Acesso em: 17 de janeiro de 2009.

SCHULTZ, T. J., "Synthesis of social surveys on noise annoyance," *Journal of Acoustical Society of America*, v. 64, pp. 377–405, 1978.

STEVENS, K. N., Rosenblith, W., and Bolt, R., "A community's reaction to noise: Can it be forecast?", *Noise Control* v.1, pp. 63–71, 1995.

WHO- World Health Organization. "Guidelines for Community Noise". Geneva, Switzerland. Edited by B., Lindvall, T., Schwela, 1999. Disponível em: < <http://www.who.int/docstore/peh/noise/guidelines2.html> > . Acesso em: 15 de maio de 2009.

ZADEH, L. A., " Fuzzy Sets", *Information and Control*, v. 8, pp.338 -353, 1965.

ZADEH, L. A. "Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic". In: *Fuzzy sets and Systems, Elsevier Science*, v. 90, pp. 111-127, 1997.

ZADEH, L.A. "Outline of a New Approach to the analysis of complex systems and decision process". In: *IEE transactions on systems, man, and cybernetics*, v.3(1), January, 1973.

http://www.flyoakland.com/pdf/aircraft_noise_terminology.pdf. Acesso em 22/11/2009.

<http://chracustica.zip.net/images/ponderacao>. Acesso em 18/05/2009.

ANEXO 1

Receptores críticos

As figuras 1 e 2 apresentam alguns receptores críticos, tais como, unidades de ensino e saúde localizados no interior das curvas de ruído DNL 65dB(A) para Aeroporto de Congonhas e de Recife.

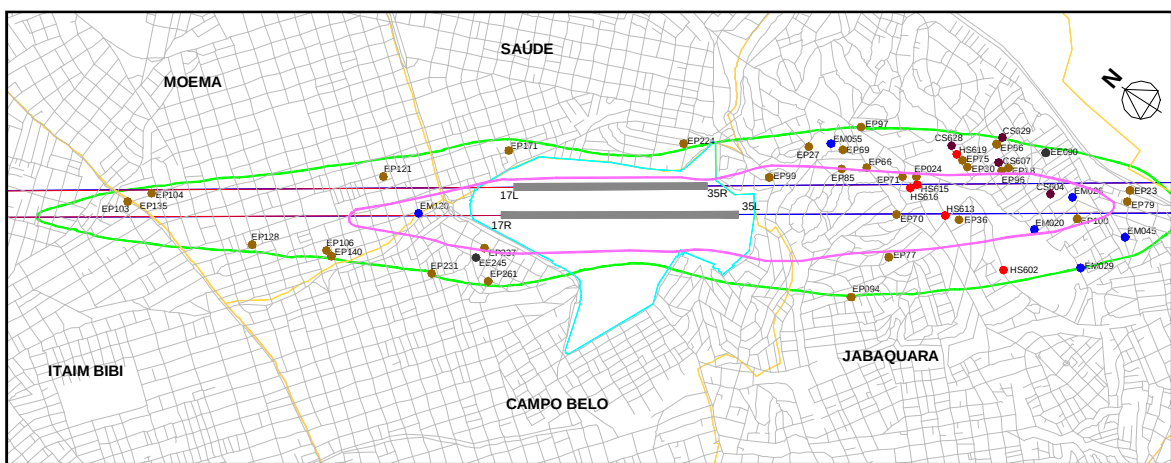


FIGURA 1: Aeroporto de Congonhas.

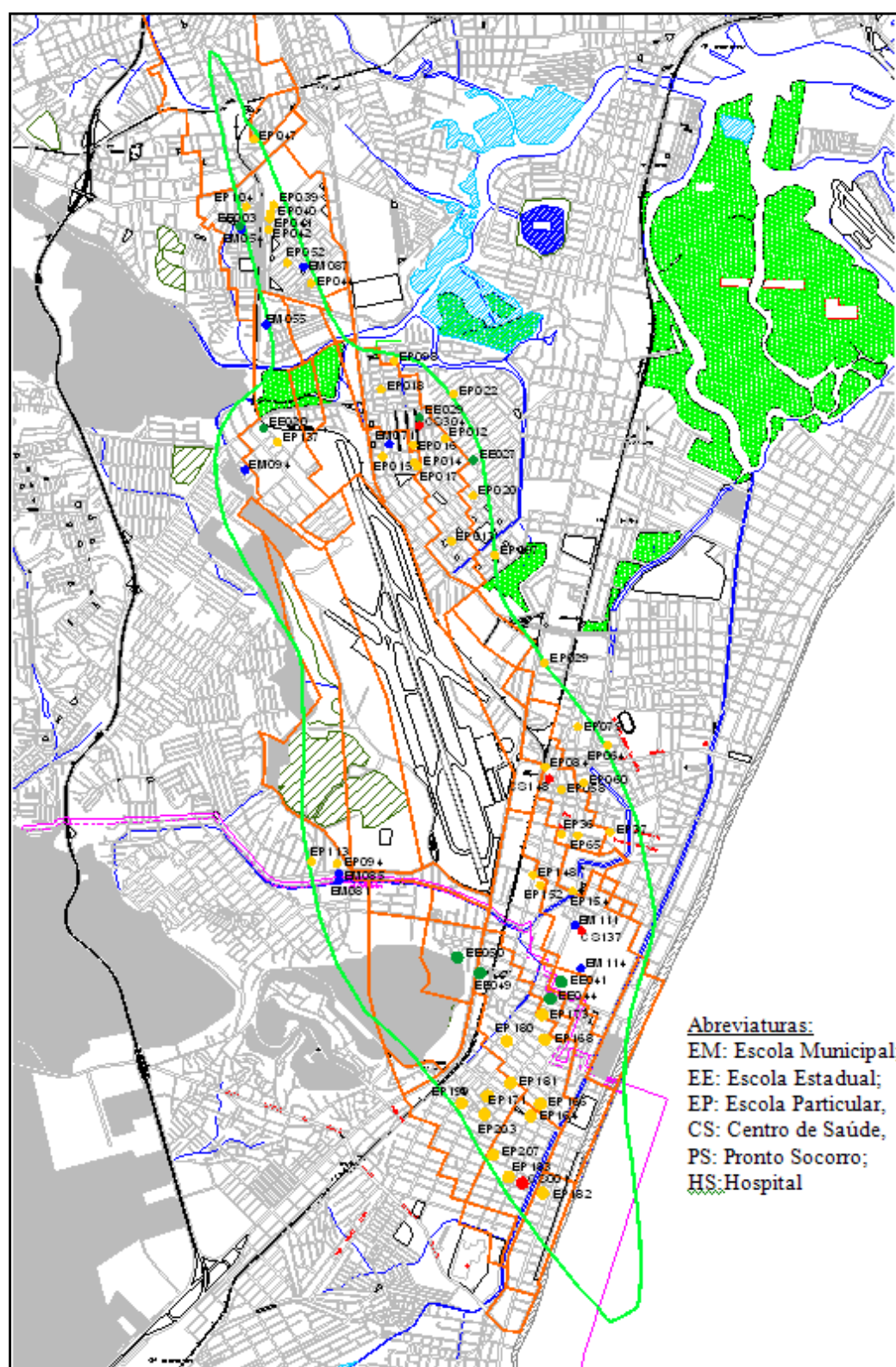


FIGURA 2: Aeroporto de Recife.

ANEXO 2

LEI MUNICIPAL nº 16.176

Art. 1º - A Zona Especial do Aeroporto - ZEA - integra o elenco das Zonas de Diretrizes Específicas - ZDE, a que se referem o art. 7º, inciso IV e o art. 13, inciso V, da Lei Municipal nº 16.176, de 9 de abril de 1996 - Lei de Uso e Ocupação do Solo da Cidade do Recife - LUOS, e compreende as áreas de entorno do Aeroporto dos Guararapes localizadas no perímetro do território do Município do Recife.

Art. 2º - A Zona Especial do Aeroporto - ZEA, mencionada no artigo anterior, tem seu perímetro externo descrito e delimitado no Anexo Único desta Lei, na conformidade dos Anexos 2 C (Mapas) e 13 (descrição de limites) da Lei nº 16.176/96 - LUOS e da Portaria DAC nº 232 / DGAC, de 14 de abril de 1997, do Departamento de Aviação Civil do Ministério da Aeronáutica, que aprova o Plano Específico de Zoneamento de Ruído do Aeroporto Internacional dos Guararapes - PE (PEZR - REC/PE), e compreende as Áreas Especiais Aeroportuárias - AEAs definidas no Anexo I da aludida Portaria, a seguir indicadas:

A AEA - 1 I*		
K AEA - 11 - I	P AEA - 16 - II	U AEA - 19 - III
L AEA - 12 - II	Q AEA - 17 - II	V AEA - 20 - I
M AEA - 13 - II	R AEA - 18 - II	X AEA - 20 - II
N AEA - 14 - II	S AEA - 19 - I	
O AEA - 15 - II	T AEA - 19 - II	

* Trecho delimitado entre a linha limite de Recife/Jaboatão e as Ruas Ministro Salgado Filho e SD 5466.

Art. 3º - A área delimitada pela ZEA se superpõe às áreas da Zona de Urbanização Preferencial 1 - ZUP 1, da Zona de Urbanização de Morros - ZUM, da Zona de Especial de Centro Metroviário - ZECM Boa Viagem, da Zona Especial de Proteção Ambiental 2 - ZEPA 2 Engenho Uchôa, e, bem assim, às Zonas Especiais de Interesse Social - ZEIS, localizadas na aludida área, conforme previsto no parágrafo único do art. 13, da Lei Municipal nº 16.176/96 - LUOS.

Art. 4º - Na Zona Especial do Aeroporto - ZEA, os usos e atividades urbanas obedecerão à classificação, definição e categorias previstas nos Anexos V, VI e VII, da Portaria DAC nº 232/DGAC, de 14.04.97, do Departamento de Aviação Civil do Ministério da Aeronáutica, para os fins previstos no art. 25, da Lei Municipal nº 16.176/96 - LUOS.

Art. 5º - Os projetos destinados à construção ou reforma e à instalação de usos e atividades, na área da ZEA, obedecerão aos parâmetros urbanísticos e demais requisitos estabelecidos na Lei Municipal nº 16.176/96 - LUOS com as alterações introduzidas pela Lei nº 16.289, de 29.01.97, e, no que couber, aos requisitos previstos na Portaria DAC nº 232/DGAC, do DAC/MAer, de 14.04.97, respeitado o disposto nos parágrafos deste artigo.

§ 1º - Os parâmetros urbanísticos quanto a Taxa de Solo Natural, Coeficiente de Utilização e Afastamentos das Divisas de Terrenos nas áreas superpostas à ZUP1, ZUM e ZECM Boa Viagem obedecerão às condições estabelecidas no Anexo 10, da Lei nº 16.176/96 - LUOS, para as referidas zonas.

§ 2º - Nas áreas da ZEA, superpostas à ZEPA 2 Engenho Uchôa e às ZEIS, deverão ser observadas as normas legais e regulamentares que lhes forem pertinentes.

§ 3º - No trecho da AEA 1-I, integrante do perímetro urbano do Município do Recife, serão observadas as condições estabelecidas nos anexos II, III e IV, da Portaria DAC nº 232/DGAC/97.

§ 4º - O coeficiente de utilização nas Áreas Especiais Aeroportuárias 12 - II, 14 - II, 15 - II e 16 - II não poderá exceder os limites previstos no Anexo VII da Portaria DAC nº 232/DGAC/97, para uso habitacional multifamiliar e apart-hotel, respeitado o estabelecido no Anexo 10, da Lei nº 16.176/96 - LUOS, prevalecendo, em qualquer hipótese, o limite mais restritivo.

Art. 6º - Para efeito de compatibilização com o PEZR - REC / PE, aprovado pela Portaria DAC nº 232 / DGAC, de 14.04.97, fica revogado o inciso III, do art. 48, da Lei nº 16.176/96 - LUOS, modificado pela Lei nº 16.289/97.

Art. 7º - A Prefeitura da Cidade do Recife - PCR - somente concederá “aceite-se”, “habite-se” e “alvará de funcionamento” a empreendimentos na área da ZEA, sujeitas às exigências previstas na Portaria DAC 232/DGAC, do 14.04.97, após a comprovação, pelo DAC/MAer, do cumprimento daquelas exigências.

Art. 8º - Fica a Secretaria de Planejamento, Urbanismo e Meio Ambiente da Prefeitura da Cidade do Recife - PCR/SEPLAM - autorizada a baixar normas complementares visando definir os mecanismos de articulação com o Departamento de Aviação Civil do Ministério da Aeronáutica, para efeito de aplicação desta Lei, observadas as demais normas legais e regulamentares pertinentes.

Art. 9º - Esta Lei entrará em vigor na data de sua publicação, no Diário Oficial do Município.

Art. 10. - Revogam-se as disposições em contrário.

Recife, 29 de julho de 1998.

ANEXO 3

Abordagem de conceitos da Lógica *Fuzzy*

3.1 Conjuntos *crisp*

Um conjunto *crisp* A em um universo de discurso U (o qual fornece o conjunto de valores possíveis para a variável) pode ser definido pela enumeração de seus elementos ou pela identificação dos elementos $x \in A$. Uma maneira de se executar esta última opção é especificar uma condição pela qual $x \in A$; portanto A pode ser definido como $A = \{x \mid x \text{ atende a alguma condição}\}$. Pode-se também introduzir uma função de pertinência zero - um (também chamada de função característica, função de discriminante ou função indicatriz) para A , representando $\mu_A(x)$, tal que $A \Rightarrow \mu_A(x) = 1$ se $x \in A$ e $\mu_A(x) = 0$ se $x \notin A$. O subconjunto A é matematicamente equivalente à sua função de pertinência $\mu_A(x)$ de modo que conhecer $\mu_A(x)$ é o mesmo que conhecer o próprio A .

3.2 Conjuntos *fuzzy*

Um conjunto *fuzzy* A definido sobre um universo de discurso U é caracterizado por uma função de pertinência $\mu_A(x)$ a qual assume valores no intervalo $[0,1]$. Um conjunto *fuzzy* é uma generalização de um conjunto clássico (isto é, um subconjunto *crisp*) cuja função de pertinência assume apenas dois valores, zero ou um. Uma função de pertinência fornece uma medida do grau de similaridade de um elemento em U para o subconjunto *fuzzy*.

3.3 Etapas para o desenvolvimento de um modelo *fuzzy*

A figura 1 representa um esquema para a elaboração de um modelo *fuzzy*. Este modelo é baseado em quatro etapas: fuzzificação, regras de base, inferência e defuzzificação. A seguir é feita uma descrição de cada etapa.

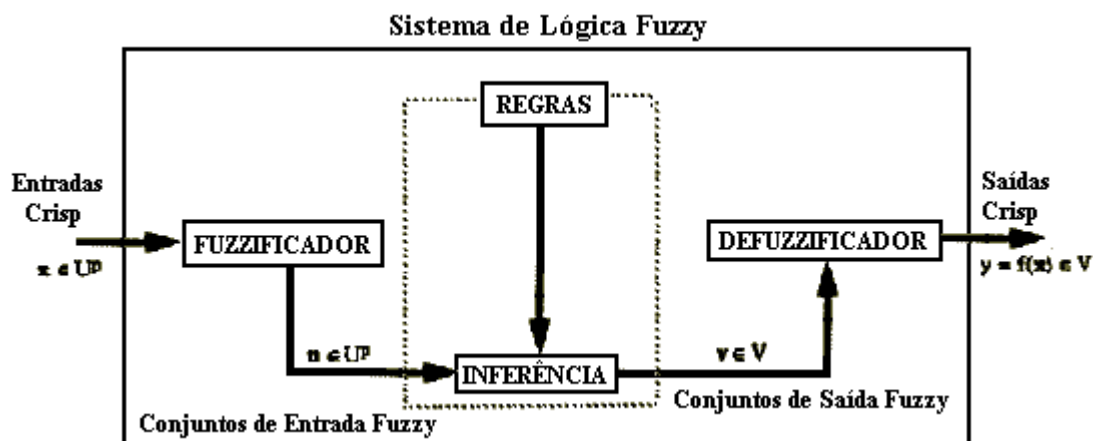


Figura 1. Sistema especialista *Fuzzy*.
Fonte: Mendel

3.3.1 Fuzzificação

A *fuzzificação* consiste em converter um dado numérico (um valor *crisp*) em um dado *fuzzy*. Este processo é conhecido como *fuzzificação* e identifica que há uma aceitação da incerteza atribuída ao valor de entrada. Cada valor de entrada é associado a uma variável lingüística, e para cada variável lingüística devem ser atribuídos termos lingüísticos que representam os estados desta variável e a cada termo lingüístico deve ser associado um conjunto *fuzzy* por uma função de pertinência. Os termos lingüísticos na maioria das vezes são palavras que descrevem a magnitude da variável lingüística, como por exemplo, “pequeno”, “médio”, “grande”. Desta forma, dados os conjuntos *fuzzy* que correspondem às variáveis lingüísticas, na etapa de *fuzzificação* são atribuídos graus de pertinência a cada valor de entrada em cada conjunto *fuzzy*.

3.3.1.1 Funções de pertinências

A função de pertinência define como cada elemento de entrada, situado em um determinado universo de discurso, corresponde a um grau de pertinência entre 0 e 1. Segundo MENDEL (1995), uma função de pertinência fornece uma medida do grau de similaridade entre um elemento pertencente a um determinado conjunto e um subconjunto.

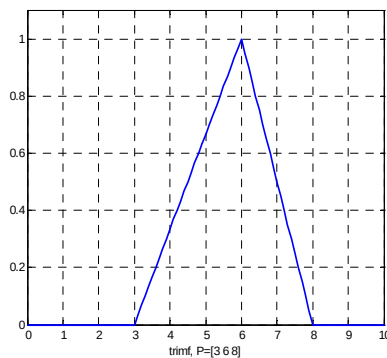
Existem vários tipos de função de pertinência, os quais são constituídos de funções básicas, tais como funções lineares, triangulares, trapezoidais, Gaussiana, curvas quadráticas, polinomiais, sigmóide, etc. As funções de pertinência mais simples são as triangulares (JANG *et al.*, 1997)..

As funções triangulares e trapezoidais são as mais utilizadas na maioria dos casos, por serem mais simples, enquanto funções do tipo gaussianas e sigmóide são mais complexas.

3.3.1.2 Função de pertinência triangular

As funções de pertinência triangulares são as mais recomendáveis, pois alguns métodos de *desfuzificação* utilizam apenas os máximos da função de pertinência, o que é bem visualizado em funções de pertinência triangulares.

A função de pertinência triangular mostra uma modificação linear do grau de pertinência da variável lingüística em resposta a mudanças na variável independente. Ainda de acordo com Shepard (1995), esse modelo de função é indicado para os casos em que se necessita definir a função de pertinência a partir de um número *crisp*.

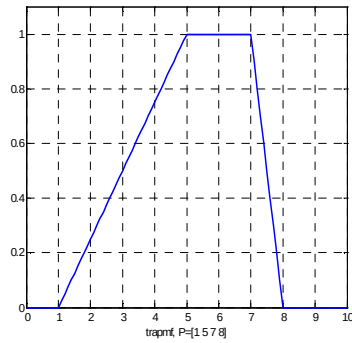


$$\text{triângulo}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$$

Onde $\{a, b, c\}$ (com $a < b < c$) $\rightarrow$ coordenadas dos três vértices do triângulo

3.3.1.3 Função de pertinência trapezoidal

As funções de pertinência trapezoidais representam um valor que aumenta linearmente o grau de pertinência entre 0.0 e 1.0 sobre os valores do eixo x. A função de pertinência permanece no grau 1.0 para uma parte da faixa de valores da variável independente, e então começa a decrescer novamente, de forma linear.

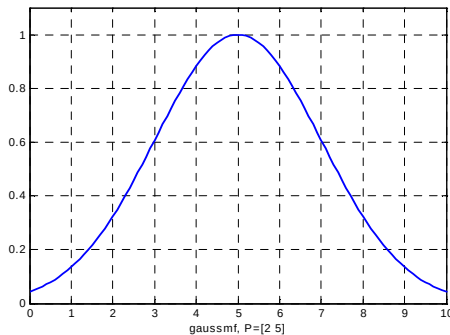


$$\text{trapézio}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}$$

Onde $\{a, b, c, d\}$ (com $a < b \leq c < d$) $\rightarrow$ coordenadas dos quatros vértices do trapézio

3.3.1.4 Função gaussiana

A função gaussiana apresenta uma característica de maior incerteza cuja magnitude varia com base nos valores da variável independente (universo de discurso) e também do grau de pertinência. Este comportamento reflete um aumento da incerteza em termos das variáveis lingüísticas utilizadas no modelo, pelo aumento da largura da faixa capturada por cada curva.



$$\text{gaussiana}(x; \sigma, c) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^2}$$

3.4 Base de regras

As regras que sustentarão o modelo *fuzzy* serão a base do sistema de inferência do modelo. O padrão mais comum para representar as regras *fuzzy* é baseado no modelo Se - ENTÃO. A regra básica pode ser escrita da seguinte forma:

SE a_1 E a_2 ... ENTÃO b

IF a_1 AND a_2 ... AND a_n THEN b

Onde a_i , $1 \leq i \leq n$, e b são preposições fuzzy. Cada regra representa uma suposição razoável para as variáveis de saída. As variáveis de entrada (*inputs*) são ligados por meio de conectivos, que podem ser AND ou OR.

3.5 Cálculo dos operadores

Nesta etapa efetua-se o cálculo dos *inputs* do modelo. Os operadores AND (chamado de t-norma) e OR (chamado de t-conorma) indicam, respectivamente, operações de intersecção e união de conjuntos.

3.6 Cálculo das implicações

Os conectivos atuam como operadores de implicação e calculam as implicações de cada regra no modelo, tomando os graus de pertinência dos conjuntos *input*, operando-os e gerando um grau de pertinência para o *output*. Os operadores de implicação podem assumir diferentes formas:

No método Mamdani-min é feita uma comparação entre os graus de pertinência dos pares ordenados dos conjuntos de entrada e, assume-se sempre o menor entre eles por meio do operador lógico OR. Sua representação é dada por:

$$\text{Min}(\mu_A(x), \mu_B(y))$$

3.7 Inferência

A etapa de agregação dos conseqüentes (os valores obtidos como conclusão das regras), também é feita por meio de operadores. Esses operadores costumam representar o sentido do THEN (ENTÃO) no final de cada regra de um mapa de regras. A agregação utiliza usualmente uma t-conorma, quando o operador de implicação é uma t-norma, e uma t-norma em caso contrário (SANDRI e CORREA, 1999).

3. 8 Defuzzificação

A última etapa é a defuzzificação que traduz o estado da variável de saída fuzzy para

um valor numérico. É importante ressaltar que existem diferentes métodos de inferência *fuzzy* com diferentes propriedades. A definição do método *defuzzificação* está relacionada ao contexto da tomada de decisão.

O método **Centróide** calcula o centróide da área que representa o termo de saída *fuzzy*, o qual é composto pela união de todas as contribuições de regras e tem como o centróide o centro geométrico dos valores de saída *fuzzy*.