

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Civil – FEC

**“O Uso da Teoria do Sistema Nebuloso na Avaliação da Interpretação Subjetiva
de Estímulos Sonoros”**

Benedito Sérgio Tavares de Alvarenga

Campinas – SP

2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Civil – FEC

**“O Uso da Teoria do Sistema Nebuloso na Avaliação da Interpretação Subjetiva
de Estímulos Sonoros”**

Benedito Sérgio Tavares de Alvarenga

Dissertação de mestrado aprovada pela banca examinadora constituída por:

Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli
Presidente e orientadora – Unicamp

Profa. Dra. Regina Coeli Ruschel
Unicamp - Campinas

Prof. Dr. Cheng Liang Yee
EPUSP – São Paulo
Campinas

27 de fevereiro de 2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Civil – FEC

**“O Uso da Teoria do Sistema Nebuloso na Avaliação da Interpretação Subjetiva
de Estímulos Sonoros”**

Benedito Sérgio Tavares de Alvarenga

Orientadora: Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli

**Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia
Civil da Universidade Estadual de Campinas, como
parte dos requisitos exigidos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.**

Área: Edificações

Campinas – SP

2003

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

AL86u

Alvarenga, Benedito Sérgio Tavares de

O uso da teoria do sistema nebuloso na avaliação da interpretação subjetiva de estímulos sonoros / Benedito Sérgio Tavares de Alvarenga.--Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientadora: Stelamaris Rolla Bertoli

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Acústica. 2. Lógica difusa. 3. Sistemas difusos. 4. Ruído. 5. Som. I. Bertoli, Stelamaris Rolla. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Universo e aos meus pais por me terem dado a chance de habitar nesta dimensão. Agradeço à minha esposa e aos meus irmãos pelo incentivo constante que me deram até a conclusão deste trabalho. Agradeço à minha orientadora Dra. Stelamaris R. Bertoli (Unicamp) e ao Dr. Cheng Liang Yee (EPUSP – São Paulo), que me auxiliaram na implementação dos conceitos e agradeço a todos aqueles, que direta ou indiretamente me auxiliaram nos ensaios, em especial ao Mestre Geraldo César Novaes de Miranda (CTA/Unicamp) e ao Tecnólogo Obadias Pereira da Silva Júnior, do Laboratório de Física e Conforto Ambiental (Unicamp).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. CONCEITOS DE ACÚSTICA	5
3.1. O som como forma de onda	5
3.2. Representação Matemática de uma Onda	6
3.3. O som como estímulo	7
3.4. Os limites da audição	8
3.5. Características do ruído	11
3.6. Campo sonoro	12
3.6.1. Propagação do som ao ar livre (campo livre)	12
3.6.2. Propagação do som em recintos fechados (campo difuso)	12
3.7. Equipamentos de Medição de Ruído	14
3.8. Qualidade Sonora	16
3.8.1. <i>Loudness</i>	17
3.8.2. <i>Sharpness</i>	18
3.8.3. <i>Flutuation Strength</i>	18
3.8.4 <i>Roughness</i>	18

SUMÁRIO

4. CONCEITOS DA TEORIA DO SISTEMA NEBULOSO (Fuzzy System Theory)	19
4.1. Da matemática clássica à nebulosa	19
4.2. Origem do termo	22
4.3. A Teoria do Sistema Nebuloso (<i>Fuzzy System Theory</i>)	22
4.3.1. Vagueza (<i>Fuzzyness</i>)	23
4.3.2. Divisão da Teoria do Sistema Nebuloso	23
4.4. Teoria do Conjunto Nebuloso	24
4.4.1. A Teoria Clássica do Conjunto (<i>crisp set theory</i>)	25
4.4.2. O Conjunto Nebuloso	26
4.4.3. Operações básicas do Conjunto Nebuloso	28
4.4.4. Operações Algébricas do Conjunto Nebuloso	29
4.4.5. Conjunto de Nível α ou Conjunto de Corte α	30
4.4.6. Números Nebulosos	31
4.4.7. Números L-R	32
4.4.8. Números Nebulosos Triangulares (<i>Triangular Fuzzy Number – TFN</i>)	33
4.5. Agregação de Conjuntos Nebulosos	34
4.6. Considerações	35

SUMÁRIO

5. METODOLOGIA	36
5.1. Linha do Experimento Psicológico de YAMAGUSHI	36
5.2. Linha do experimento psicológico deste trabalho	37
5.3. Local de ensaio e disposição de entrevistados e equipamentos	37
5.4. Obtenção dos Dados	38
5.5. Equipamentos	42
5.5.1. Procedimento de geração do ruído	42
6. RESULTADOS E ANÁLISE	44
6.1. Resultados	44
6.2. Análise	51
7. CONCLUSÃO	56
8. TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	58
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	61
ANEXOS	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Pressão em função de x com t constante (a) e em função de t com x constante (b)	7
Figura 3.2 – Limiares da audição	9
Figura 3.3 – Curva de Ponderação A	10
Figura 3.4 – Tipos de representação de espectros de ruído; (a) variação temporal; (b) Componente tonal discreto e (c) Banda larga	11
Figura 3.5 – Representação gráfica do TR_{60} (curva de decaimento)	14
Figura 3.6 – Esquema de um medidor de nível sonoro	15
.....	
Figura 3.7 – Curvas Isofônicas	16
Figura 4.1 – Vagueza devido ao conjunto (a) e Vagueza devido à medida (b)	23
Figura 4.2 – Os principais tópicos da teoria de sistemas nebulosos	24
Figura 4.3 – Conjunto binário e função característica	25
Figura 4.4 – Conjunto nebuloso e função de pertinência	26
Figura 4.5 – Conjunto nebuloso “em torno de 6”	27
Figura 4.6 – (a) inclusão; (b) complemento; (c) interseção e (d) união	28
Figura 4.7 – Conjunto de nível α	31
Figura 4.8 – Algumas formas típicas de números nebulosos	31
.....	
Figura 4.9 – Um número nebuloso L-R e suas funções de forma	32
Figura 4.10 – Exemplo de um TFN	33
Figura 5.1 – Esquema de Montagem dos Equipamentos de Ensaio	42
Figura 6.1 – Exemplo de gráfico do grau de pertinência em função do nível de pressão sonora para 125 Hz	48
Figura 6.2 – Regiões de “Agradabilidade”	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Limites inferiores e superiores e centrais das bandas de 1/1-oitavas e 1/3-oitavas	9
Tabela 3.2 – Valores de correção da curva A	11
Tabela 5.1 – Exemplo de Planilha do Operador	39
Tabela 5.2 – Exemplo de Planilha do Entrevistado	41
Tabela 5.3 – Frequências centrais, inferior e superior das bandas de 1/1-oitavas	43
Tabela 6.1 – Rótulos em relação ao conjunto nebuloso Agradável $\tilde{A}$	44
Tabela 6.2 – Planilha de cálculo	45
Tabela 6.3 – Resultados Obtidos na SÉRIE A	46
Tabela 6.4 – Exemplo de reorganização dos resultados para 2000 Hz (f_6)	47
Tabela 6.5 – Valores de L (nível de pressão sonora) para cada $\mu_{\tilde{A}_L}$, onde se incluem os graus de pertinência do conjunto Agradável $\tilde{A}$ dos rótulos	49
Tabela 6.6 – Estímulos para a frequência de 4000 Hz (f_7)	51

RESUMO

O objetivo deste trabalho é relacionar estímulo e percepção sonora, utilizando a Teoria do Sistema Nebuloso (*Fuzzy System Theory*), para qualificar sensações sonoras. Ensaio experimentais foram realizados para gerar estímulos sonoros e coletar as sensações percebidas por um grupo de entrevistados. Esse grupo foi composto por nove entrevistados escolhidos entre 18 e 25 anos com audição normal. Foram gerados 144 estímulos sonoros (ruído branco), divididos em 12 séries, variando aleatoriamente os níveis de pressão sonora e frequência em bandas de 1/1 oitava. As sensações percebidas pelos entrevistados foram coletadas através de variáveis linguísticas. A análise dos resultados foi feita utilizando-se os conceitos básicos de Agregação de Conjunto Nebuloso (*Fuzzy Aggregation*). Como resultado final obteve-se o gráfico de Nível de Pressão Sonora em função de Frequência que apresenta **Regiões de “Agradabilidade”**.

ABSTRACT

The goal of this subject is to relate stimulus and sound perception, using the Fuzzy System Theory to qualify sound sensations. The experimental work was designed to provide sound stimuli and collect the perceived sensations from a sample group, composed by nine people between 18 and 25 years old, with normal audition. 144 sound stimuli were generated (white noise), divided in 12 sequences. The sound pressure levels and the 1/1 eighth band frequencies varied randomly. The sensations perceived by the interviewees were collected through variable terms. The result analysis was based upon Fuzzy Aggregation basic concepts. As a final result of this assignment, it was obtained a “Sound Pressure Level versus Frequency” graphic, which delineates the *Agreeability Regions*.

1. INTRODUÇÃO

A audição é essencial à vida humana. Sua perda torna a comunicação e a interação entre as pessoas uma tarefa difícil. Num estudo acústico podemos considerar a fala como a fonte sonora e o ouvido como o elemento receptor, ou seja, elas são a base da comunicação humana. Tendo em vista todo desenvolvimento tecnológico e industrial dos últimos séculos, a audição fica ameaçada, pois o homem se expõe cada vez mais a ruídos de todos os tipos e intensidades, seja nas fábricas ou nos grandes centros urbanos, dentro de suas casas ou nas áreas de lazer. Com toda essa parafernália cada vez mais sofisticada “a Acústica aplicada tornou-se tão importante e necessária quanto o ar que respiramos” (SILVA, 1997).

A exposição aos mais variados tipos de ruído, pode causar problemas auditivos, dependendo do nível de pressão sonora que se encontra no ambiente e o tempo de exposição do indivíduo ao ruído. Atualmente, são nos ambientes de trabalho, onde o indivíduo mais se expõe a ruídos. Dessa forma, torna-se tarefa árdua àqueles que trabalham com ruído ocupacional, fazer com que os níveis de ruído sejam adequados ao trabalhador, para não ocasionar danos auditivos. No Brasil existem Normas Regulamentadoras (NR), para ajustar o nível de ruído nos ambientes de trabalho, tais como a NR 15 – Atividades e Operações Insalubres; a NR 6 – Equipamento de Proteção Individual e a NR 7 – Exame Médico.

Como pôde ser visto, o ruído transformou-se num problema dos tempos modernos, e assim ampliou-se o campo de estudo, em diversas áreas, na tentativa de se conviver com ele adequadamente. O objetivo é estipular quantidades máximas de exposição de ruído, visando não ocasionar danos auditivos àqueles que devem permanecer em ambientes ruidosos.

Nem todo ruído causa dano auditivo, alguns podem causar desconforto. Assim, paralelamente aos estudos dos efeitos do ruído no ser humano, teve início a busca do conforto acústico do indivíduo no meio em que ele vive. Os incômodos causados pelo ruído não estão associados somente à intensidade de ruído. Por exemplo, o ruído provocado por pingos d'água de torneiras das pias perturba o sono de muitas pessoas, porém, não têm níveis de ruído elevado, mas incomodam pela sua intermitência. Existem ruídos que agradam, como o caso o barulho das ondas do mar. Essa irritação, ou prazer, que acontece quando se está em contato com um determinado tipo de ruído, é subjetivo e particular de cada indivíduo, tem-se ruídos que afetam um grande número de pessoas, enquanto outros afetam um mínimo, seja ele bom ou ruim.

Descobriu-se dessa forma, que o ruído não pode ser encarado somente de modo objetivo e quantificado pelo nível de pressão sonora e/ou relacionado com a frequência, existem fatores subjetivos que influenciam a avaliação do ruído pelo indivíduo, ou seja, o ser humano classifica a sensação do ruído por adjetivos pelos quais os aparelhos de medição de ruído não são capazes de detectar ou identificar. Na tentativa de esclarecer estes inconvenientes, tornou-se necessário buscar novas ferramentas as quais possam traduzir de forma mais eficiente a relação ruído e audição (ou som e audição).

Estes fatos propiciaram o aparecimento da psicoacústica, ao qual ZWICKER e FASTL (1999), deram a base para o desenvolvimento da qualidade sonora, que é utilizada em larga escala na indústria automotiva (MARROQUIM, 1999). A qualidade sonora busca garantir o conforto acústico no interior dos automóveis, utilizando metodologias que quantificam aspectos subjetivos através de parâmetros psicoacústicos, como *loudness*, *roughness*, *sharpness*, etc. Estes parâmetros identificam a relação dos estímulos sonoros com a sensação percebida pelo ouvinte, isto é, relaciona aspectos objetivos do ruído com aspectos subjetivos desse ruído.

Uma outra ferramenta que pode ser capaz de relacionar ruído com audição é a Teoria do Sistema Nebuloso (*Fuzzy System Theory*). Ela consegue transformar informações vagas, geralmente obtidas da linguagem natural, em valores numéricos aproximados, ao invés de exatos. Muitos conceitos são melhores definidos por palavras do que pela matemática, por isso, a possibilidade do seu uso em vários campos da atuação humana se torna justificável. Aqui, o raciocínio exato

corresponde a um caso particular do raciocínio aproximado, sendo interpretado como um processo de composição nebulosa.

As principais vantagens no uso da Teoria do Sistema Nebuloso está no fato de ela requerer poucas regras; poder utilizar um número maior de variáveis; usar variáveis lingüísticas, que se aproxima mais do pensamento humano e os problemas ficam mais simples. Porém, o raciocínio nebuloso não apresenta apenas vantagens, apresenta também algumas deficiências como exemplo, “a falta de um método definitivo para determinar a função de pertinência”, segundo RAY e GHOSHAL (1996).

O uso da Teoria do Sistema Nebuloso para qualificar as variáveis lingüísticas (vagueza contida nos adjetivos), que descreve fatos concretos e objetivos, pelo senso humano, tem sido utilizado com sucesso em trabalhos de Avaliação Pós-Ocupacional (HARRIS, 1999).

HARRIS (1999), utilizou a Teoria do Sistema Nebuloso na análise dos resultados de uma Avaliação Pós-Ocupacional, onde foram criados conjuntos nebulosos partindo do conhecimento de especialistas e condição do ambiente relacionado a impactos de algumas modificações, como colocação de brises e ar condicionado. Este estudo envolveu três variáveis de conforto simultaneamente: iluminação, ventilação e temperatura e, como resultado, mostrou que o uso dessa ferramenta é viável para avaliações desse escopo de trabalho.

Visto que a Teoria do sistema Nebuloso tem aplicação reconhecida na área de Conforto, este trabalho mostra que é possível utiliza-la para qualificar estímulos acústicos, diferenciando-se dos métodos que aplicam os conceitos da qualidade sonora (como *loudness*, *sharpness*, *pitch*, entre outros), que usam a matemática clássica para qualificar os aspectos subjetivos da percepção sonora.

Dada a subjetividade da avaliação de estímulos sonoros (YAMAGUCHI et al, 1995), e a condição de qualificar a imprecisão humana pela Teoria do Sistema Nebuloso criou-se uma metodologia onde serão utilizadas variáveis lingüísticas (rótulos como agradável e desagradável), para se obter como resposta de estímulos sonoros, regiões num diagrama de nível de pressão sonora em função de frequência que agradam e/ou desagradam a maioria das pessoas.

2. OBJETIVOS

Relacionar estímulo e percepção sonora, usando a Teoria do Sistema Nebuloso, para qualificar sensações sonoras.

Identificar num gráfico de nível de pressão sonora em função de frequência, regiões onde os estímulos sonoros possam ser considerados agradáveis ou desagradáveis.

Verificar a possibilidade de uso da Teoria do Sistema Nebuloso na área de acústica.

3. CONCEITOS DE ACÚSTICA

Este capítulo visa mostrar alguns conceitos básicos de acústica que serão utilizados ao longo deste trabalho. Busca-se dar informações da acústica como fenômeno físico e como estímulo físico, conceitos de acústica de salas, uma explanação sobre instrumentos de medição de ruído e uma introdução sucinta de Qualidade Sonora.

3.1. O som como forma de onda

Na Física, onda é definida como sendo uma perturbação qualquer que altera uma certa condição de equilíbrio. Essa perturbação se propaga de uma região de espaço para outra, no decorrer do tempo. As ondas *mecânicas*, que percorrem um meio material, se propagam por processo de variação de pressão, ou seja, por compressão e expansão. O distúrbio provocado é transmitido entre as partículas, propagando-se no meio com *velocidade definida*. Neste processo não há propagação de matéria, apenas transmissão de energia de uma partícula para outra.

As ondas mais fáceis de serem descritas matematicamente são as ondas periódicas, que são regidas pelo Movimento Harmônico Simples (MHS), as quais podem ser *transversais*, quando as partículas vibram perpendicularmente à direção de propagação da onda ou *longitudinais*, quando vibram na direção de propagação.

Para se descrever uma onda matematicamente, é necessário conhecer sua amplitude, frequência, comprimento de onda e velocidade de propagação. A amplitude (A) representa a máxima perturbação em relação à condição de equilíbrio. A frequência (f) é definida como sendo o número ciclos ocorridos num intervalo de tempo, tendo como unidade o Hertz (Hz). O comprimento de onda (λ) é definido como sendo a distância percorrida pela onda durante uma vibração completa, sua unidade é o metro (m). A velocidade de propagação (c) é definida pela relação fundamental e

resultado do produto da frequência pelo comprimento de onda, sua unidade é o metro por segundo (m/s):

$$c = f\lambda \quad [1]$$

A onda sonora representa uma perturbação percebida pelo ouvido. É caracterizada por uma onda mecânica longitudinal ao propagar-se no ar e representa as variações de pressão provocadas no meio.

3.2. Representação Matemática de uma Onda

Existem diversas formas matemáticas que podem ser usadas para solucionar problemas específicos de ondas, porém, todas traduzem o mesmo fenômeno. Quando a grandeza é o deslocamento da partícula (y), a equação unidimensional mais adequada que representa sua variação no tempo e no espaço é dada por,

$$y_{(x,t)} = A \sin (\omega t - kx) \quad [2]$$

onde, A = amplitude da onda

ω = velocidade angular

k = constante de propagação ou número de onda.

No caso do som se propagando em meios materiais, a grandeza mais adequada é a pressão. A equação unidimensional que representa sua variação no tempo e no espaço pode ser representada por,

$$P = P_0 \cos (\omega t - kx), \quad [3]$$

onde, P_0 = Pressão sem ação do som.

k = constante de propagação ou número de onda, $2\pi/\lambda$.

ω = velocidade angular.

Graficamente, a variação de pressão pode ser representada em função da distância ou do tempo, como ilustra a figura 3.1.

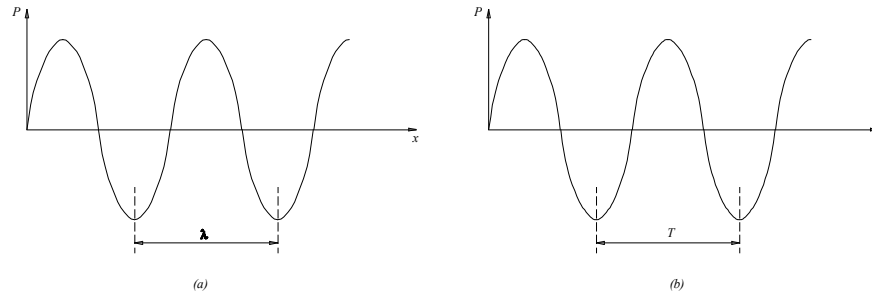


Figura 3.1 – Pressão em função de x com t constante (a) e em função de t com x constante (b).

3.3. O som como estímulo

Segundo CYSNE (1992), pelo lado psicofísico, o som ocorre quando vibrações são transmitidas até nossos ouvidos, e experimentamos a sensação de audição. Segundo SMITH, et al (1996), o som é a sensação auditiva causada pela variação de pressão no ar, sempre produzida por algumas fontes de vibração. Dessa forma, o som é tudo o que se ouve e está intimamente ligado ao conceito de audição, pois ele é a resposta do ouvido à variação de pressão atmosférica provocada por fontes vibrantes.

As ondas sonoras podem ser interpretadas de formas diferentes, como *som* ou *ruído*. Na realidade, fisicamente, não há distinção entre ambas as formas, mas subjetivamente, o ser humano classifica como *som* o estímulo sonoro agradável e, como *ruído*, o estímulo sonoro desagradável.

Um estímulo físico, nada mais é que a excitação dos órgãos sensoriais de qualquer animal, ou seja, é uma excitação dos sentidos físicos, como o tato, paladar, visão, olfato e audição. Portanto, o som e o ruído excitam os nossos ouvidos provocando um estímulo sonoro. É através desses sentidos que tomamos consciência do mundo material que nos rodeia. Mas todo ruído é mesmo desagradável? Por exemplo, dependendo do gosto de cada um, a música de uma banda de “heavy metal” pode não passa de ruído para quem não gosta, ou som, para quem gosta. Portanto, a avaliação do ruído trata-se de questão altamente subjetiva.

3.4. Os limites da audição

O ouvido humano só consegue ser sensibilizado na faixa de frequência entre 20 Hz e 20.000 Hz e depende da idade e das condições físicas do indivíduo. Os sons que se encontram abaixo de 20 Hz, dizemos que se tratam de infra-sons, enquanto que os que se situam a mais de 20.000Hz, dizemos se tratar dos ultra-sons. Em termos de variação de pressão é possível perceber sons que variam de 2×10^{-5} a 200 N/m^2 . Esta variação de pressão envolve uma larga faixa de valores, da ordem de 10^7 . A resposta do ouvido humano ao estímulo sonoro é aproximadamente logarítmica, portanto, criou-se uma unidade de medida de escala logarítmica, chamada decibel (dB), que representa o Nível de Pressão Sonora (NPS). O nível de pressão sonora é uma relação entre uma pressão de referência $P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ (limiar auditivo), e uma pressão qualquer P_1 . A relação é dada por,

$$\text{NPS} = 10 \log (P_1/P_0)^2 = 20 \log (P_1/P_0) \quad [4]$$

onde, NPS = Nível de Pressão Sonora

P_1 = Pressão

P_0 = Pressão de referência

A escala de frequências percebida pelo ouvido humano varia de forma considerável especialmente próximo do limiar da audição onde existe uma variação da ordem de 70 dB. A figura 3.2 mostra o limiar da audição, da dor e dos sentidos, a região da fala e o intervalo de frequência do piano e de alguns cantores.

Acusticamente, trabalha-se com faixas de frequências padronizadas. As faixas de frequências mais comuns são as de 1/1 oitava e a de 1/3 oitava. As faixas de frequências (bandas), são caracterizadas pela chamada frequência central. Na tabela 3.1, são apontados os limites, inferior, superior e a frequência central das bandas de 1/1 oitava e de 1/3 oitava.

Figura 3.2 – Limiares da audição (Adaptado SMITH, et al, 1996).

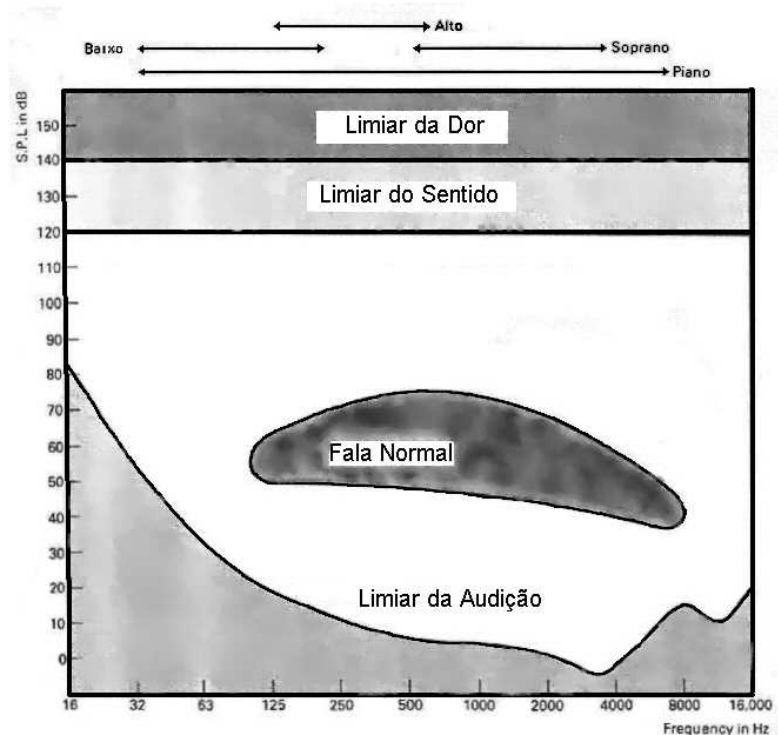


Tabela 3.1 – Limites inferiores, superiores e centrais das bandas de 1/1 oitava e 1/3 oitava.

Banda de 1 - oitava (Hz)			Banda de 1/3 - oitava (Hz)		
<i>f inferior</i>	<i>f central</i>	<i>f superior</i>	<i>f inferior</i>	<i>f central</i>	<i>f superior</i>
11	16	22	14,1	16,0	17,8
			17,8	20,0	22,4
			22,4	25,0	28,2
22	31,5	44	28,2	31,5	35,5
			35,5	40,0	44,7
			44,7	50,0	56,2
44	63	88	56,2	63,0	70,8
			70,8	80,0	89,1
			89,1	100,0	112,0
88	125	177	112,0	125,0	141,0
			141,0	160,0	178,0
			178,0	200,0	224,0
177	250	355	224,0	250,0	282,0
			282,0	315,0	355,0
			355,0	400,0	447,0
355	500	710	447,0	500,0	562,0
			562,0	630,0	708,0
			708,0	800,0	891,0
710	1000	1420	891,0	1000,0	1122,0
			1122,0	1250,0	1413,0
			1413,0	1600,0	1778,0
1420	2000	2840	1778,0	2000,0	2239,0
			2239,0	2500,0	2818,0
			2818,0	3150,0	3548,0
2840	4000	5680	3548,0	4000,0	4467,0
			4467,0	5000,0	5623,0
			5623,0	6300,0	7079,0
5680	8000	11360	7079,0	8000,0	8913,0
			8913,0	10000,0	11220,0
			11220,0	12500,0	14130,0
11360	16000	22720	14130,0	16000,0	17780,0

O ouvido humano, quando ocorre uma variação de pressão, coloca em oscilação a membrana timpânica, que transmite estas vibrações pelo ouvido médio através dos ossículos (martelo, bigorna e estribo). Estas vibrações mecânicas são transformadas em sinais elétricos no ouvido interno, atingindo o cérebro pelos nervos auditivos. Cabe ao cérebro produzir a sensação auditiva, traduzindo os estímulos sonoros.

A sensação auditiva do ser humano tem uma característica peculiar, atenuar os sons graves (baixas frequências) e amplificar os sons agudos (altas frequências). Esta característica obrigou o desenvolvimento de uma curva ponderada em frequências, sendo a mais usada a curva de ponderação A. O dB(A) é a grandeza que relaciona um estímulo sonoro objetivo à interpretação subjetiva do cérebro. *Esta é a escala recomendada para as avaliações da resposta do ser humano a um ruído.* Na figura 3.3, é mostrado a curva de ponderação A e na tabela 3.2 os valores de correção da curva.

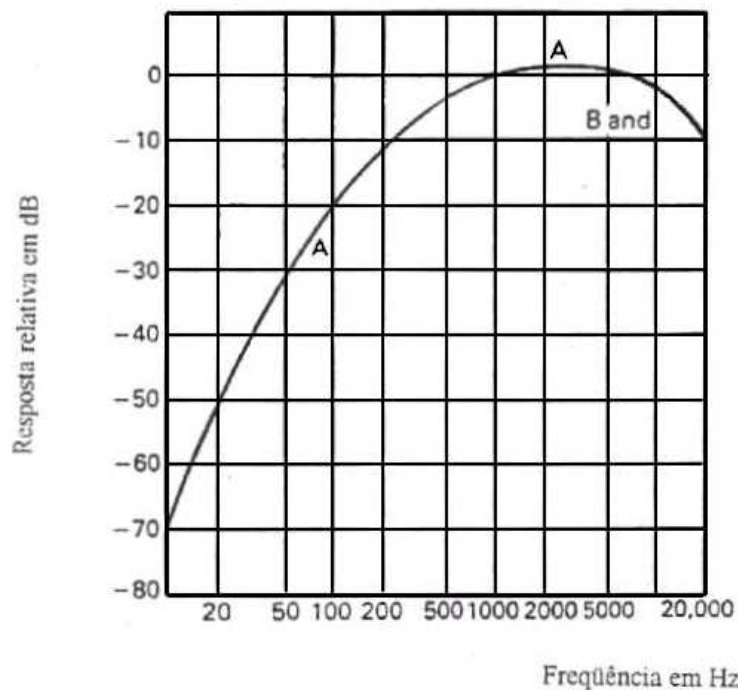


Figura 3.3 – Curva de Ponderação A (Adaptado SMITH, et al, 1996).

Tabela 3.2 – Valores de correção da curva A:

Frequência (Hz)	Curva A dB(A)	Frequência (Hz)	Curva A dB(A)
10	-70,4	500	-3,2
12,5	-63,4	630	-1,9
16	-56,7	800	-0,8
20	-50,5	1000	+0,0
25	-44,7	1250	+0,6
31,5	-39,4	1600	+1,0
40	-34,6	2000	+1,2
50	-30,2	2500	+1,3
63	-26,2	3150	+1,2
80	-22,5	4000	+1,0
100	-19,1	5000	+0,5
125	-16,1	6300	-0,1
160	-13,4	8000	-1,1
200	-10,9	10000	-2,5
250	-8,9	12500	-4,3
315	-6,6	16000	-6,6
400	-4,8	20000	-9,3

3.5. Características do ruído

Na prática, os tons puros (sons com frequência única), são raros, sendo mais comuns os sons compostos, ou complexos. O ruído pode ser caracterizado por sua frequência, amplitude e duração, sendo representados por espectros de frequências, que nada mais são que a representação da amplitude em função da frequência em um gráfico. Quanto à frequência o ruído pode ser classificado como de banda larga, banda estreita e com componentes discretos ou tons puros, conforme figura 3.4.

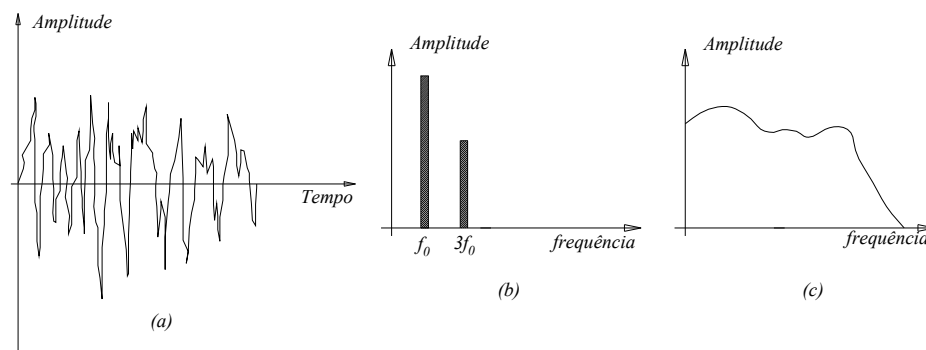


Figura 3.4 – Tipos de representação de espectros de ruído; (a) variação temporal; (b) Componente tonal discreto e (c) Banda larga.

3.6. Campo sonoro

A transmissão do som via aérea possui certas particularidades quando a propagação ocorre ao ar livre (campo livre) ou em recinto fechado (campo difuso). Em ambos os casos, o som pode se deparar com obstáculos na sua trajetória, o que provoca algumas variações na sua intensidade e trajetória, através dos fenômenos de reflexão, difração, absorção e transmissão.

3.6.1. Propagação do som ao ar livre (campo livre)

O som sofre atenuação, mesmo quando não existe obstáculo à propagação do som. A atenuação é devida a absorção da sua energia por atrito interno ao longo do meio em que se propaga. Isso faz com que a intensidade sonora decresça com o aumento da distância. A variação com a distância depende do tipo da fonte de ruído que podem ser fontes pontuais ou cilíndricas.

Para o caso de fontes pontuais, a intensidade sonora é inversamente proporcional ao quadrado da distância e o nível de pressão sonora cai de 6 dB com o dobro de distância. Já para o caso das fontes lineares, a intensidade sonora é inversamente proporcional à distância e o nível de pressão sonora cai de 3 dB com o dobro da distância.

3.6.2. Propagação do som em recintos fechados (campo difuso)

Em recintos fechados a distribuição sonora gera dois tipos de campos sonoros, um direto e outro indireto. O som emitido por uma fonte pode atingir um ouvinte diretamente ou após ter se chocado com as paredes, o piso e o teto do recinto, ou seja, após refletir pelas superfícies. O som direto e o refletido podem atingir o ouvinte simultaneamente, reforçando o som. Outro caso pode acontecer quando o som refletido chega ao ouvinte após o som direto ter-se extinguido, proporcionando assim o *eco*. Porém, pode acontecer do som refletido chegar ao ouvinte com um determinado atraso, quando o som direto já esteja quase se extinguindo. Este fenômeno é chamado de *reverberação* do som e pode ser avaliado pela medida do *Tempo de Reverberação*. Wallace Clement Sabine (CAVANAUGH e WILKES, 1999), estudando salas de conferências e auditórios desenvolveu uma fórmula capaz de estimar o tempo de reverberação em função do volume da sala e

da área de absorção dos fechamentos do recinto (paredes, teto e piso). A fórmula desenvolvida por ele foi a seguinte,

$$T_R = \frac{0,161 * V}{A}, \quad [5]$$

onde, T_R é o tempo de reverberação, em segundos (s).

V é o volume do ambiente em metros cúbicos (m^3).

A é a área de absorção, em Sabines métricos.

A área de absorção é calculada segundo a equação,

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i, \quad [6]$$

onde, α_i = coeficiente de absorção de cada superfície i .

S_i = área geométrica de cada superfície i .

O coeficiente de absorção α é a relação entre uma certa intensidade sonora absorvida por uma superfície (I_a) e uma intensidade sonora qualquer (I_0) que atinge esta superfície, ou seja,

$$\alpha = \frac{I_a}{I_0} \quad [7]$$

O tempo de reverberação (TR_{60}), é o tempo necessário para que um nível de pressão sonora de um ambiente caia de 60 dB e pode ser medido num ambiente pelo decaimento do som conforme a figura 3.5.

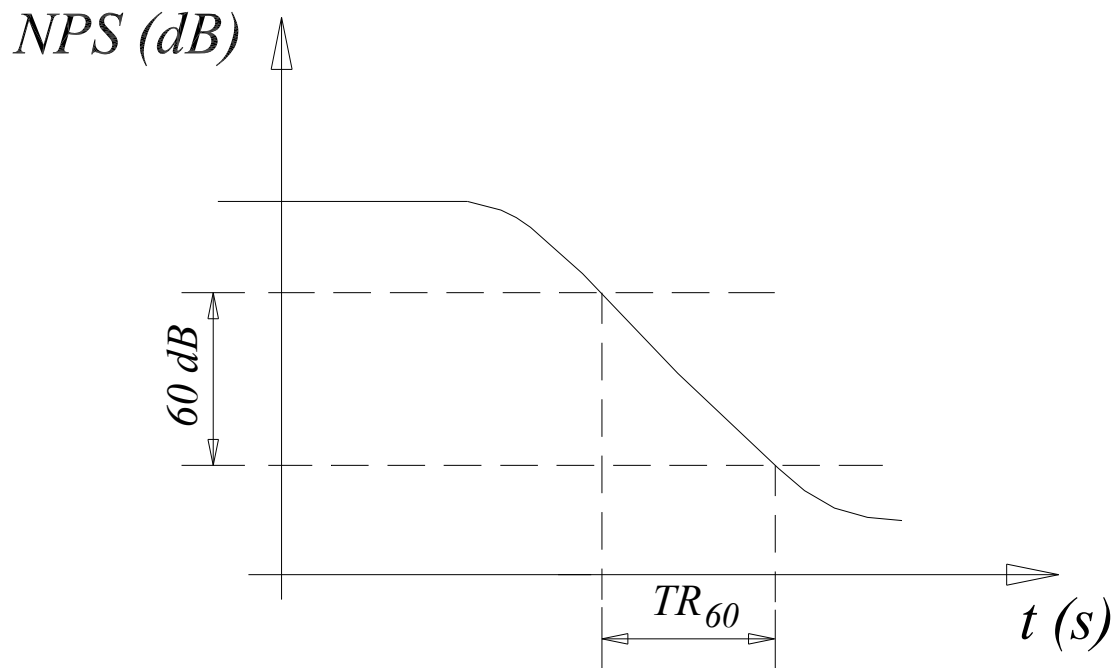


Figura 3.5 – Representação gráfica do TR_{60} (curva de decaimento).

3.7. Equipamentos de Medição de Ruído

O equipamento básico para a medição de ruído é o medidor de nível de pressão sonora. Ele é composto de um microfone que converte ondas de pressão sonora em sinais elétricos os quais são amplificados linearmente, ponderados segundo as curvas A, B, C e D, ou filtrados, sofrendo em seguida outra amplificação para possibilitar a leitura, analógica ou digital. Um esquema de um medidor de nível de pressão sonora é mostrado na figura 3.6.

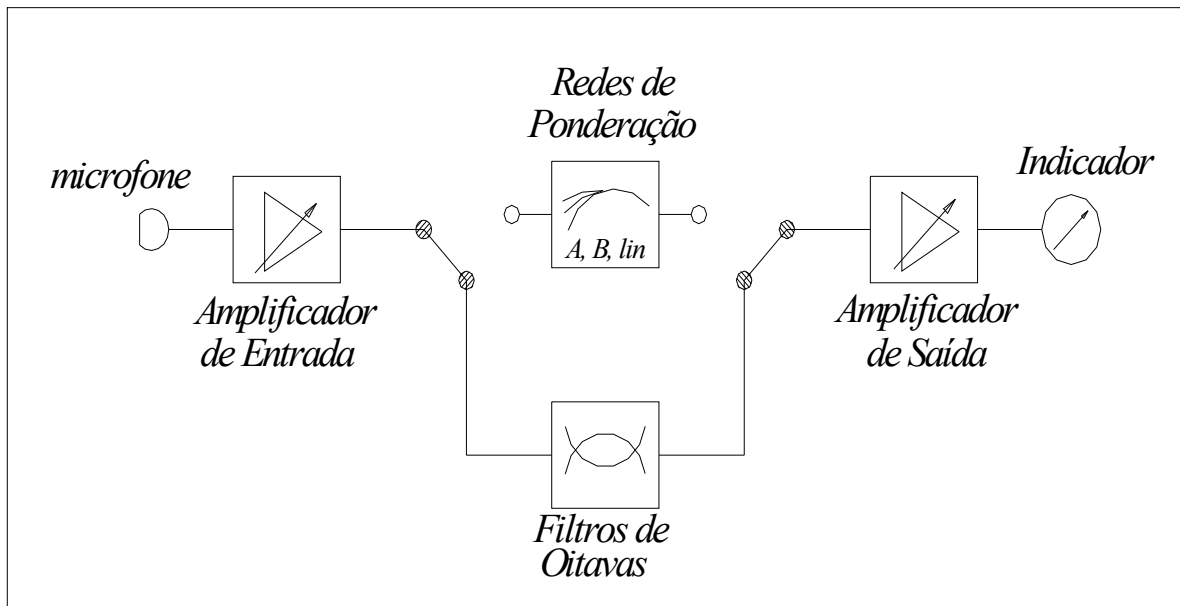


Figura 3.6 – Esquema de um medidor de nível sonoro

Os microfones podem ser do tipo capacitativo ou de eletreto, sendo o primeiro o mais indicado para medições de precisão. Dependendo da precisão da medida que se deseja, temos diferentes tipos de medidores (conjunto medidor/microfone):

- **Medidor tipo 0** – é um equipamento projetado para ser padrão de laboratório, tendo uma tolerância de $\pm 0,4$ dB.
- **Medidor tipo 1** – é projetado para uso em campo ou em laboratório, onde se consegue especificar ou controlar as condições acústicas, tendo tolerância de $\pm 0,7$ dB.
- **Medidor tipo 2** – especificado para aplicações em campo, tendo tolerância de $\pm 1,0$ dB.
- **Medidor tipo 3** – para inspeções de cunho geral.

Os equipamentos de medição têm tempos de respostas específicas. As medidas podem ser feitas na resposta rápida (*fast*) ou resposta lenta (*slow*). Para sons impulsivos a resposta impulsiva (*impulsive*). Os medidores sonoros podem ser calibrados por equipamentos que fornecem níveis sonoros constantes a uma determinada frequência fixa, como por exemplo, os calibradores de 1000 Hz – 94 dB ou 250 Hz – 124 dB. Estes equipamentos são conhecidos como calibradores ou pistonfones.

3.8. Qualidade Sonora

Qualidade sonora é um conceito relativamente recente de como avaliar e caracterizar o som. A qualidade sonora permite inferir a “opinião subjetiva de uma pessoa em relação ao som que ela ouve”, segundo MARROQUIM (1999). A influência subjetiva, ou psicológica, começou a ser estudada provavelmente por FLETCHER e MUNSON em 1934, onde observaram que uma certa intensidade sonora pode ser inaudível em baixas e altas frequências, porém, audível em médias frequências. Pesquisando com grupos de indivíduos, utilizando geradores de sons com intensidades conhecidas e crescentes, em tons puros, verificaram a existência de um lugar geométrico de igual nível audiométrico, chamadas de *Curvas Isofônicas*, nas quais o ser humano percebe igualmente os sons, mesmo de intensidade e frequências diferentes (SILVA, 1997). As curvas isofônicas são mostradas na figura 3.7.

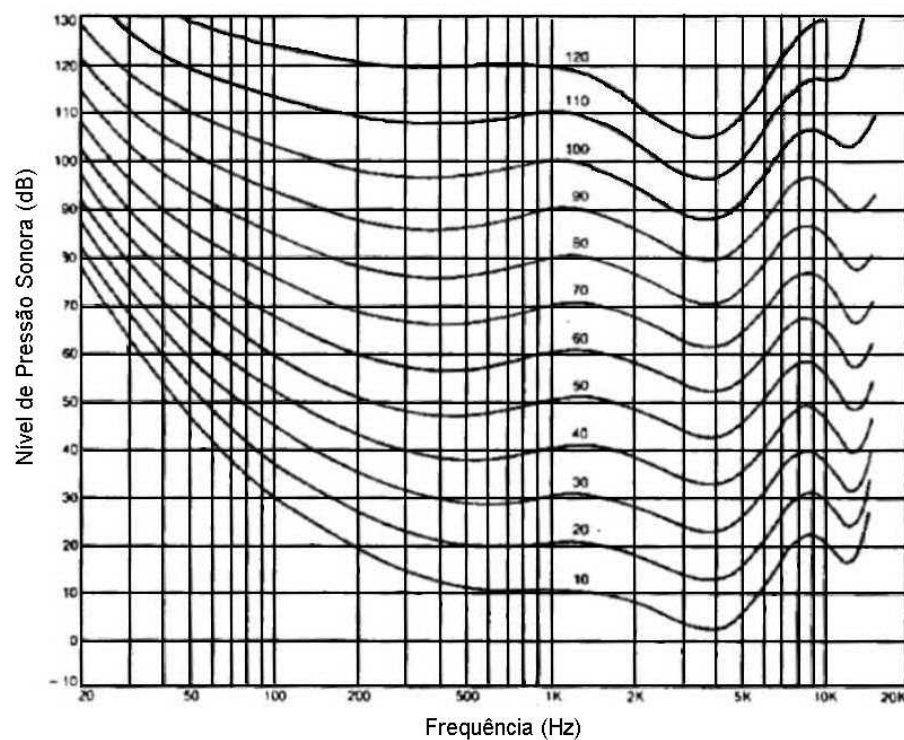


Figura 3.7 – Curvas Isofônicas (Adaptado SMITH, et al, 1996).

Estas curvas comparam uma “sensação sonora”, que é subjetiva, com o Nível de Pressão Sonora (NPS) em dB, que é uma medida objetiva. O parâmetro de comparação é a frequência de 1000 Hz, onde o NPS em dB tem o mesmo valor em fon. Assim, como exemplo, analisando a figura 3.7, temos 60 fons igual a 60 dB em 1000 Hz, enquanto que em 100 Hz, 60 fons é praticamente igual a 70 dB. Uma característica peculiar dos fons é que eles não podem ser somados, mas sua importância está no fato de correlacionar uma medida objetiva (o estímulo sonoro), com outra subjetiva (interpretação do estímulo).

Recentemente ZWICKER e FASTL (1999), estabeleceram parâmetros psicoacústicos que também relacionam características objetivas com subjetivas na análise de sons. Os parâmetros estabelecidos por eles são: *loudness*, *sharpness*, *fluctuation strength* e *roughness*.

3.8.1. *Loudness*

O *loudness* é a grandeza psicoacústica que descreve a sensação sonora percebida, ele é uma medida que se aproxima da “altura” do som.

A medição do *loudness* depende da largura de banda de sinal, não se baseando apenas em curvas de ponderação, como o dB(A), se aproximando dela, apenas em tons senoidais ou ruídos de banda estreita com níveis baixos, pois o *loudness* depende de variáveis como frequência, largura de banda, banda crítica e duração do som.

O *loudness* é mais utilizado como uma medida para estimar ou descrever variações de loudness do que uma medida absoluta. “Todos os métodos de cálculo são aproximações sujeitos a inúmeros erros, principalmente no caso de espectros não uniformes”, conforme MIRANDA, et al (1999). Sua unidade é o *FON*.

3.8.2. *Sharpness*

O *sharpness* mede a irritação provocada à exposição aos sons em alta frequência (sons com frequência acima de 3000 Hz), ele indica o equilíbrio espectral entre baixas e altas frequências e representa um tributo de avaliação do timbre.

O *sharpness* independe do nível de pressão sonora e os parâmetros que mais o influencia são a largura de banda e a frequência central de ruídos de banda estreita. Sua unidade é o *ACUNS*. Altos valores sharpness são considerados sons com qualidade sonora pobre.

3.8.3. *Flutuation Strength*

A *flutuation strength* mede a modulação de um som em baixas frequências. É o quanto se percebe de modulações em amplitude (AM), em baixa frequência. Sons que tenham frequência modulada abaixo de 20 Hz são medidos por este sistema, onde o ouvido humano percebe cada evento de forma individual. O peso de *flutuation strength* é similar a uma curva de sino e as modulações a 4 Hz têm o maior impacto na medição. A unidade da *flutuation strength* é o *VACIL*. Geralmente um alto *flutuation strength* é considerado de pobre qualidade sonora.

3.8.4. *Roughness*

O *roughness* segue a mesma linha do *flutuation strength*, porém, mede a modulação de um som em médias frequências, ou seja, sons modulados entre 20 Hz e 300 Hz. Aqui a sensação do ouvido humano é diferente, o ouvido humano não é capaz de ouvir as modulações individualmente, detectando algumas variações. A ponderação da curva é implementada e as modulações sonoras em torno de 70 Hz têm o maior impacto no número *roughness*. A unidade do *roughness* é o *ASPER*. Um alto valor *roughness* é também indesejável em muitas aplicações.

4. CONCEITOS DA TEORIA DO SISTEMA NEBULOSO (Fuzzy System Theory)

Os conceitos básicos da Teoria do Sistema Nebuloso são apresentados neste capítulo, visando esclarecer algumas ações tomadas durante a análise dos dados obtidos no ensaio.

4.1. Da matemática clássica à nebulosa

O surgimento da lógica ocorreu por volta do século IV a.C., quando Aristóteles estabeleceu um conjunto de regras baseado em premissas e conclusões. Como por exemplo, se tivermos a primeira premissa que diga: - “*os pássaros voam*”, e constarmos uma segunda premissa que diga: - “*o sabiá é um pássaro*”, teremos como conclusão: - “*o sabiá voa*”. Assim se fundamentou a lógica Ocidental.

Pela experiência humana, sabe-se que nem sempre o ser humano diz sim ou não, ou toma decisões somente como verdadeiras ou falsas. Por exemplo, “o dia está frio ou quente?” Qualquer que seja a resposta, ela será incerta, pois, “o quanto” está frio, ou “o quanto” está quente? O ser humano não responde numericamente estas questões físicas. O dia pode não estar quente, nem frio, estar “ameno”, ou seja, não existem apenas os extremos, existe uma “transição” entre eles. É esta transição que transgride o conceito da dualidade (do binário), base da *matemática clássica*. No caso, o dia ameno é frio e quente ao mesmo tempo ou não é frio nem quente. Desta forma pode-se afirmar com clareza que não existe apenas o branco e o preto – entre eles existem infinitos graus de tons cinzas.

O ser humano não tem um sensor apurado que diga com clareza a temperatura exata a qual o dia se encontra. Isso é uma questão física complexa, e concorda com SHAW e SIMÕES (1999), que diz que “quando a complexidade do processo excede um determinado grau, os modelos matemáticos não apenas se tornam intratáveis como também sua precisão e confiabilidade relativas à realidade física se tornam questionáveis”, ou seja, quando temos fenômenos complexos, a matemática que

utilizamos até hoje, aqui denotada como *matemática clássica*, não consegue traduzir realmente o que está acontecendo através dos números. Consegue-se apenas equacionar parte do fenômeno, em condições específicas, nunca gerais. Por exemplo, quando acontece uma avalanche, não se consegue, matematicamente, descrever o movimento que a mesma irá realizar, nem o volume, nem a massa de neve que será deslocado, porém, um indivíduo pode ter uma “idéia”, apenas olhando o acontecimento do estrago que ela pode realizar.

Isso é uma característica humana, que não exige números para decifrar. Assim, o indivíduo consegue transmitir estas informações pelas palavras, de maneira vaga e incerta, ao invés de usar números exatos. A Teoria do Sistema Nebuloso, como já foi dito é capaz de transformar, portanto, estas informações em números que se aproximam do fato real.

Uma das primeiras aplicações práticas com sucesso do raciocínio nebuloso ocorreu em 1974, quando o Prof. Mamdani, do Queen Mary College, da Universidade de Londres, conseguiu controlar uma máquina a vapor, após várias tentativas frustradas utilizando outros métodos. Isso alavancou diversas aplicações em outros setores do conhecimento humano.

A Lógica Nebulosa se tornou assim, uma poderosa ferramenta para converter informações subjetivas e vagas em formas numéricas, para que as máquinas e computadores possam entendê-las. Em 1984, a Sociedade Internacional de Sistemas Nebulosos foi criada, para que se pudesse divulgar os avanços obtidos neste campo.

Pela capacidade de realização de inferências, a Lógica Nebulosa está sendo aplicada em áreas que utilizam a linguagem natural, em especial no controle de processos, tomada de decisão, modelagem de sistemas, reconhecimento de padrões, entre outros, pois ela não é exata como a matemática clássica, possibilitando variações numéricas finitas, que simplificam os comandos a serem enviados para a máquina em questão (YOSHIZAWA, et al, 2000).

Apesar de toda essa euforia, muito ainda precisa ser feito, tanto que SHAW e SIMÕES (1999), dizem que “na área de desenvolvimento de sistemas, até o presente momento, existe um grande descompasso entre a capacidade criativa dos seres humanos e a possibilidade de solução que

as máquinas computacionais proporcionam, devido ao fato de que as pessoas raciocinam de forma incerta, imprecisa, difusa ou nebulosa, enquanto que as máquinas e computadores são movidos por raciocínio preciso e binário”. Isso mostra que há muito a ser descoberto neste campo.

Áreas, como iluminação, têm ganhado novas inspirações com a Lógica Nebulosa (CHEN, et al, 1994), classificando o céu pela quantidade de nuvens presentes na abóbada celeste, ou seja, a matemática nebulosa também pode ser usada na engenharia de iluminação.

No reconhecimento de padrões (RAY e GHOSHAL, 1997), o raciocínio nebuloso multidimensional e as redes neurais têm recebido tremenda atenção nos campos de ciências aplicadas e engenharia.

Na área de Conforto Ambiental, onde sua base está relacionada quase que diretamente aos sentidos humanos, ou seja, em como o indivíduo interpreta as condições ambientais a qual está exposto, a matemática nebulosa se torna uma poderosa ferramenta, uma vez que os seus fundamentos estão na vagueza dos termos lingüísticos.

Tomando-se como base o som, ou ruído, que é um estímulo físico que afeta diretamente os seres humanos, a matemática nebulosa pode contribuir efetivamente na compreensão de como este estímulo afeta cada indivíduo de forma diversificada, porém, dentro de determinados parâmetros, que podem ser codificados e transformados em equações matemáticas lógicas. Até o presente momento, os conceitos da matemática clássica têm fornecido modelos, um tanto insatisfatório, para descrever as relações entre os sentimentos humanos e um determinado estímulo acústico. Da mesma forma isso acontece nas áreas onde a matemática nebulosa está tendo grande atuação. SHAW e SIMÕES (1999), descrevem bem este acontecimento na área de controle quando dizem que a modelagem matemática foi baseada na linearização e como sempre ocorre na ciência, o sucesso geralmente carrega o germe da destruição e, no caso da teoria de controles, chegou-se a um estágio em que a metodologia de modelagem matemática com precisão tornou-se tarefa árdua ou até impossível.

A Teoria do Sistema Nebuloso está auxiliando a interpretação que damos a vários estímulos acústicos que sentimos. Na avaliação de ruído psicológico, o julgamento subjetivo de estímulo acústico causa vagueza. Dando atenção especial à vagueza da impressão subjetiva, a avaliação psicológica categorizada é quantitativamente entendida como um evento nebuloso YAMAGUSHI, et al (1995).

A álgebra nebulosa está em crescente desenvolvimento, sendo que vários pesquisadores têm-se dedicado a este fim, utilizando artifícios para que novos conceitos possam ser desenvolvidos e aplicados. Como exemplo pode-se citar os trabalhos de desenvolvimento dos sistemas nebulosos lineares (FRIEDMAN, et al, 1996); o desenvolvimento da representação da integral nebulosa (RALESCU e SUGENO, 1996); a nova forma de se trabalhar com a aritmética nebulosa, definida e aplicada por equações nebulosas lineares e cálculos nebulosos (MA, et al, 1997); a implementação da interpretação da teoria da possibilidade num conjunto nebuloso (KLIR, 1999), e muitos outros trabalhos que estão sendo desenvolvidos demonstram que a matemática nebulosa atingirá um nível de excelência quanto ao seu uso e aplicabilidade.

4.2. Origem do termo

O termo FUZZY é derivado do substantivo inglês **FUZZ**. A tradução deste substantivo inglês para o português significa “penugem”. Como não se tem uma tradução equivalente para este termo, optou-se por utilizar a palavra “nebuloso”, uma vez que, a sombra de uma penugem contra a luz gera um “contorno mal definido”, ou seja, gera um contorno “nebuloso”. Assim, o termo NEBULOSO, parece ser um termo adequado para ser usado em português, porém, muitos autores preferem usar o termo original do inglês – Fuzzy (CHENG, 2001).

4.3. A Teoria do Sistema Nebuloso (*Fuzzy System Theory*)

A Teoria do Sistema Nebuloso, como foi dito anteriormente, permite processar informações vagas e indeterminadas (subjetivas), características dos processos mentais dos homens. Ela é uma extensão dos conceitos de lógica, medida e conjunto – a base da *matemática clássica*.

4.3.1 Vagueza (*Fuzzyness*)

As informações vagas, ou seja, a “vagueza”, pode se dar em duas condições, uma devido ao conjunto e a outra devido à medida. No caso da vagueza devido ao conjunto, o contorno do conjunto é incerto, porém, o posicionamento dos seus elementos é bem definido (figura 4.1), já na vagueza devido à medida, o contorno do conjunto é bem definido embora o posicionamento dos seus elementos não está claramente definido.

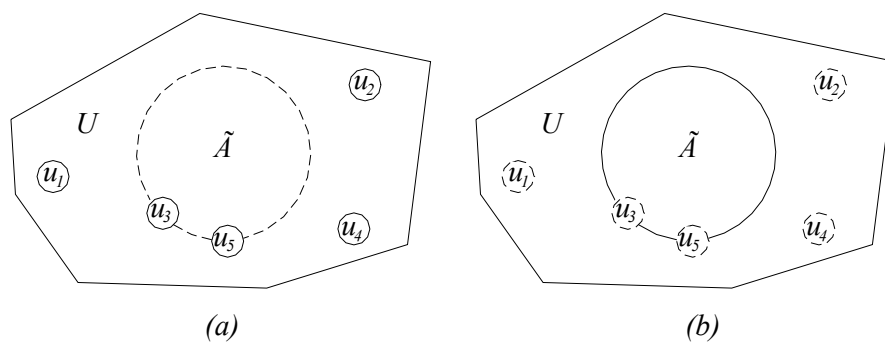


Figura 4.1 – Vagueza devido ao conjunto (a) e Vagueza devido à medida (b). (Adaptado CHENG, 2001).

4.3.2 Divisão da Teoria do Sistema Nebuloso

A TSN (Teoria do Sistema Nebuloso) está dividida em três ramificações (figura 4.2):

- 1) Teoria do Conjunto Nebuloso – extensão dos conceitos clássicos de conjunto;
- 2) Inferência ou Lógica Nebulosa – envolve método de dedução lógica baseado em variáveis lingüísticas;
- 3) Medida Nebulosa – extensão dos conceitos clássicos de medida.

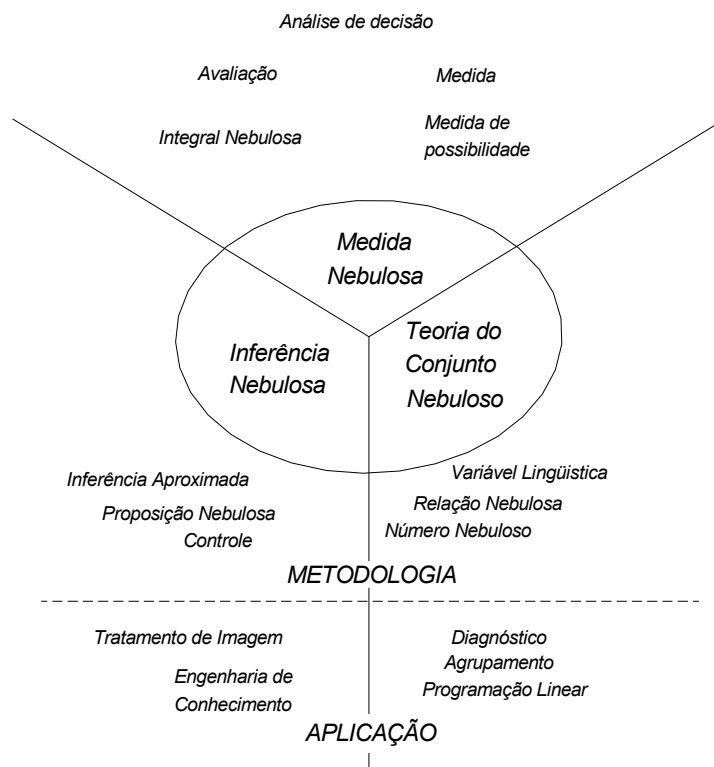


Figura 4.2 – Os principais tópicos da teoria de sistemas nebulosos (Adaptado CHENG, 2001).

4.4. Teoria do Conjunto Nebuloso

Os conceitos básicos da Teoria do Conjunto Nebuloso (*Fuzzy Set*), foram introduzidos em 1965 por LOTFI A. ZADEH, professor da Engenharia Elétrica e Ciência da Computação, da Universidade da Califórnia, em Berkeley, Estados Unidos. ZADEH (1965), em “*Fuzzy Sets*”, postula a teoria com a “finalidade de processar as informações subjetivas, de natureza vaga e incerta, da linguagem natural”. (CHENG, 2001).

4.4.1 A Teoria Clássica do Conjunto (*crisp set theory*)

A relação entre um elemento e um conjunto na matemática clássica só pode assumir duas condições,

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & (x \in A) \\ 0 & (x \notin A) \end{cases}, \text{ ou seja,}$$

A função $\mu_A(x)$ assume valor igual a 1 se o elemento pertencer ao conjunto. Se o elemento não pertencer ao conjunto a função $\mu_A(x)$ assume valor igual a 0. Assim, se tem um valor da função $\mu_A(x)$ para cada elemento x_i , chamada $\mu_A(x_i)$, correspondente ao valor x_i . Chamamos também $\mu_A(x_i)$ de “grau de pertinência” (*grade of membership*) do elemento x_i . Baseado no conceito de função de pertinência pode-se representar um conjunto pela seguinte simbologia,

$$x/\mu_A(x) = \begin{cases} x/1 & (x \in A) \\ x/0 & (x \notin A) \end{cases}, \text{ onde:}$$

x = elemento.

$\mu_A(x)$ = função de pertinência do elemento.

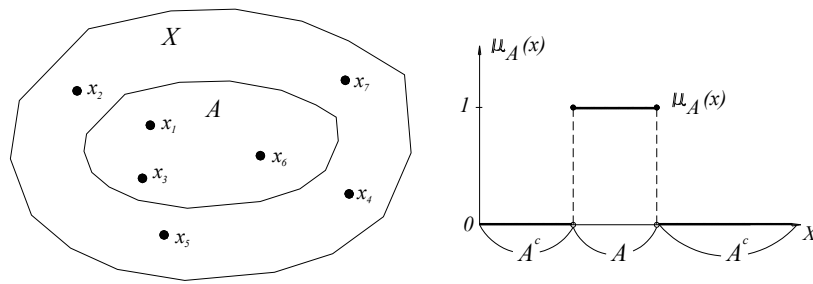


Figura 4.3 – Conjunto binário e função característica (Adaptado CHENG, 2001).

4.4.2 O Conjunto Nebuloso

O conjunto nebuloso é uma extensão da teoria clássica de conjunto (*crisp set theory*). Assim, a Teoria do Conjunto Nebuloso (*fuzzy set theory*), utiliza o conceito da função de pertinência do elemento para com o conjunto, porém, a sua pertinência não se restringe a apenas pertencer ou não pertencer ao conjunto, passa a existir um grau que relaciona o quanto este elemento é pertencente ao conjunto.

Considerando um subconjunto nebuloso (*fuzzy subset*) $\tilde{A}$ (onde o “~” em cima do A é utilizado para diferenciar o conjunto nebuloso do conjunto binário), do conjunto universal X , a função de pertinência (*membership function*) $\mu_{\tilde{A}}(x)$ é dada por,

$$\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow [0,1]$$

A função de pertinência $\mu_{\tilde{A}}(x)$ expressa o grau que um elemento x é membro do subconjunto nebuloso $\tilde{A}$ e quanto mais a função se aproxima de 1, maior será o grau de pertinência do elemento ao subconjunto $\tilde{A}$ e, quanto mais próximo de 0 menor será o seu grau de pertinência. Estes valores são indicadores de tendências atribuídas subjetivamente. A figura 4.4 mostra um esquema de conjunto nebuloso e sua função de pertinência,

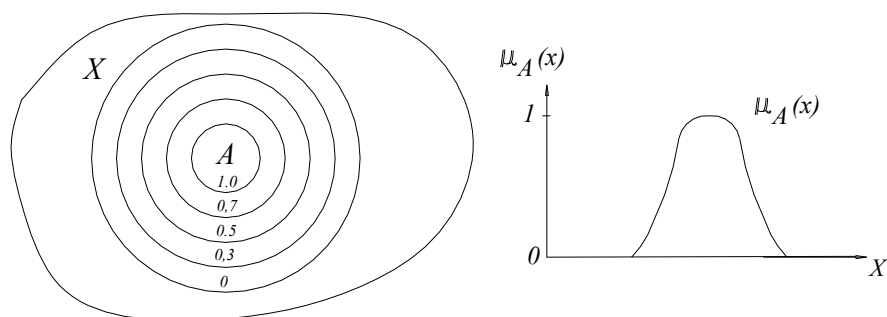


Figura 4.4 – Conjunto nebuloso e função de pertinência (Adaptado CHENG, 2001).

O subconjunto (ou simplesmente conjunto) nebuloso $\tilde{A}$ é assim representado,

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

Pode-se representar o conjunto nebuloso de várias maneiras quando ele possui elementos discretos e é enumerável, como se segue,

$$\tilde{A} = \{(x_1, \mu_{\tilde{A}}(x_1)), (x_2, \mu_{\tilde{A}}(x_2)), \dots, (x_n, \mu_{\tilde{A}}(x_n))\} \text{ ou,}$$

$$\tilde{A} = \mu_{\tilde{A}}(x_1)/x_1 + \mu_{\tilde{A}}(x_2)/x_2 + \dots + \mu_{\tilde{A}}(x_n)/x_n \text{ ou,}$$

$$\tilde{A} = \sum_{i=1}^n \mu_{\tilde{A}}(x_i)/x_i$$

Um conjunto nebuloso não enumerável é representado da seguinte maneira,

$$\tilde{A} = \int_x \mu_{\tilde{A}}(x_i)/x_i$$

Exemplo: Dado $X = \{3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$. O conjunto nebuloso “em torno de 6”, subjetivamente será:

$$\tilde{A} = \{(4, 0.3), (5, 0.8), (6, 1.0), (7, 0.8), (8, 0.3)\} \text{ ou}$$

$\tilde{A} = 0.3/4 + 0.8/5 + 1.0/6 + 0.8/7 + 0.3/8$ (o símbolo “+” não significa soma, mas sim, “ou”, isto é, o conjunto pode ser qualquer um dos elementos, respeitando o seu grau de pertinência).

A figura 4.5 mostra o conjunto nebuloso “em torno de 6”.

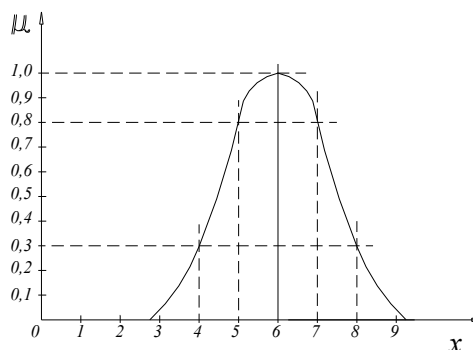


Figura 4.5 – Conjunto nebuloso “em torno de 6”.

Na figura 4.5, o número 6 não é o número 7, mas se entende que o número 7 na região do número 6 tem um grau de pertinência ao conjunto nebuloso “em torno de 6”.

4.4.3 Operações básicas do Conjunto Nebuloso

As operações básicas do conjunto nebuloso são definidas a partir da sua função de pertinência e são definidas como segue.

Igualdade	$\tilde{A} = \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) = \mu_{\tilde{B}}(x)$
Inclusão	$\tilde{A} \subseteq \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \leq \mu_{\tilde{B}}(x)$
Complemento	$\tilde{A}^c \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}^c}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x)$
Interseção	$\mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(x) = \min(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)) = \mu_{\tilde{A}}(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}(x)$
União	$\mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(x) = \max(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)) = \mu_{\tilde{A}}(x) \vee \mu_{\tilde{B}}(x)$

$\tilde{A}$ e $\tilde{B}$ são os conjuntos nebulosos. Os operadores $\vee$ e $\wedge$ representam **max** e **min**, respectivamente. Na fig. 4.6 são demonstradas graficamente as relações de inclusão (a) e complemento (b), e as operações de interseção (c) e união (d).

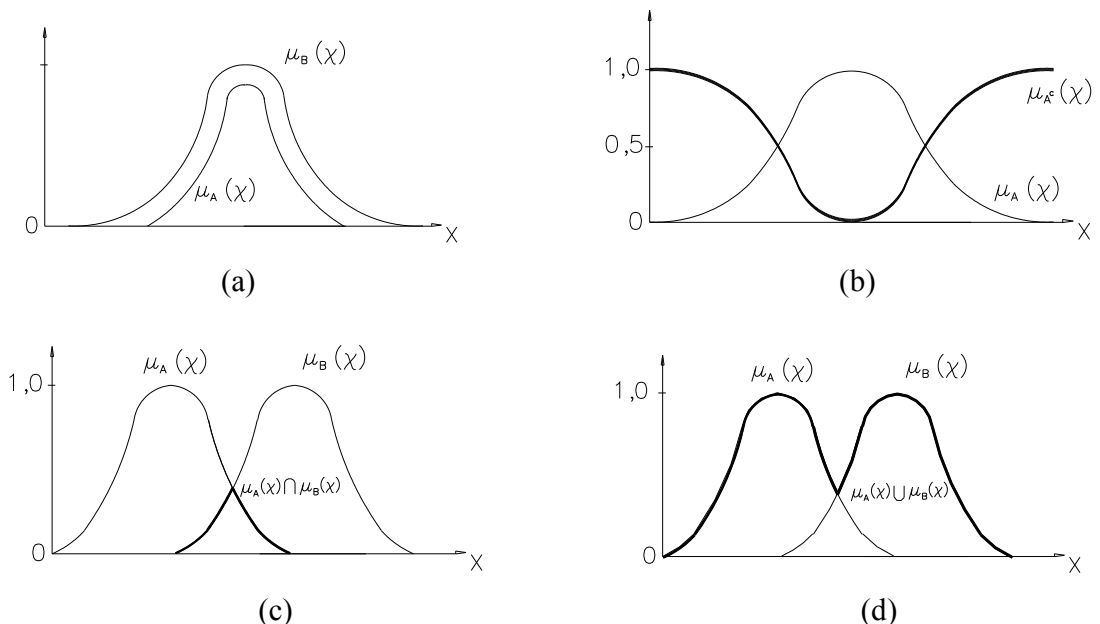


Figura 4.6 – (a) inclusão; (b) complemento; (c) interseção e (d) união (Adaptado CHENG, 2001).

4.4.4 Operações Algébricas do Conjunto Nebuloso

1 – Produto algébrico (*algebraic product*)

$$\tilde{A}\tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}\tilde{B}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x)\mu_{\tilde{B}}(x)$$

2 – Soma algébrica (*algebraic sum*)

$$\tilde{A}+\tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}+\tilde{B}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(x) - \mu_{\tilde{A}}(x)\mu_{\tilde{B}}(x)$$

3 – Produto confinado (*bounded product*)

$$\tilde{A} \otimes \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A} \otimes \tilde{B}}(x) = \max(0, \mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(x) - 1) = 0 \vee (\mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(x) - 1)$$

4 – Soma confinada (*bounded sum*)

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A} \oplus \tilde{B}}(x) = \min(1, \mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(x)) = 1 \wedge (\mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(x))$$

5 – Diferença confinada (*bounded difference*)

$$\tilde{A} \ominus \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A} \ominus \tilde{B}}(x) = \max(0, \mu_{\tilde{A}}(x) - \mu_{\tilde{B}}(x)) = 0 \vee (\mu_{\tilde{A}}(x) - \mu_{\tilde{B}}(x))$$

Exemplo:

Dado $X = \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10\}$

$$\tilde{A} = 0.8/3 + 1.0/5 + 0.6/6$$

$$\tilde{B} = 0.7/3 + 1.0/4 + 0.5/6$$

Obs.: os números que não estão contidos nos conjuntos têm grau de pertinência 0.

Os resultados das operações são,

$$\underline{\tilde{A}} = 1.0/1 + 1.0/2 + 0.2/3 + 1.0/4 + 0.4/6 + 1.0/7 + 1.0/8 + 1.0/9 + 1.0/10$$

$$\tilde{A} \cap \tilde{B} = 0.7/3 + 0.5/6$$

$$\tilde{A} \cup \tilde{B} = 0.8/3 + 1.0/4 + 1.0/5 + 0.6/6$$

$$\tilde{A}\tilde{B} = 0.56/3 + 0.30/6$$

$$\tilde{A}+\tilde{B} = 0.94/3 + 1.00/4 + 1.00/5 + 0.80/6$$

$$\tilde{A} \otimes \tilde{B} = 0.5/3 + 0.1/6$$

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = 1.0/3 + 1.0/4 + 1.0/5 + 1.0/6$$

$$\tilde{A} \ominus \tilde{B} = 0.1/3 + 1.0/5 + 0.1/6$$

4.4.5 Conjunto de Nível α ou Conjunto de Corte α

Graficamente, o conjunto de nível α é um conjunto binário formado pela projeção, no eixo x , de uma região delimitada por um corte no conjunto nebuloso por uma função constante $f_{\tilde{A}}(x) = \alpha$. Deste conceito, cria-se a possibilidade de relação entre os conjuntos nebulosos com os conjuntos binários.

Considerando um conjunto nebuloso $\tilde{A}$ de X e um número real α qualquer, onde: $0 \leq \alpha \leq 1$, o conjunto binário formado pelos elementos cuja função de pertinência $\mu_{\tilde{A}}(x)$ seja maior ou igual a α é chamado de conjunto de nível α (*α -level set*), e é representado por,

$$\tilde{A}_{\alpha} = \{x \in X / \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1.$$

Este conjunto, definido pela função característica, irá apresentar somente duas condições, uma onde a função característica é igual a 1 e, portanto, os elementos contidos nesta região pertencem ao conjunto binário; e outro cujos elementos estão fora dessa região de corte, onde a função característica é igual a 0, e portanto, não pertencem ao conjunto. A função característica é representada como segue.

$$C_{\tilde{A}_{\alpha}}(x) = 1 \text{ para } \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha \text{ e } 0 \text{ para } \mu_{\tilde{A}}(x) < \alpha$$

Partindo da definição acima se conclui que,

$$\alpha_1 \leq \alpha_2 \Rightarrow \tilde{A}_{\alpha_1} \supseteq \tilde{A}_{\alpha_2}$$

$$(\tilde{A} \cup \tilde{B})_{\alpha} = \tilde{A}_{\alpha} \cup \tilde{B}_{\alpha}$$

$$(\tilde{A} \cap \tilde{B})_{\alpha} = \tilde{A}_{\alpha} \cap \tilde{B}_{\alpha}$$

Uma representação do conjunto de nível α é mostrada na figura 4.7.

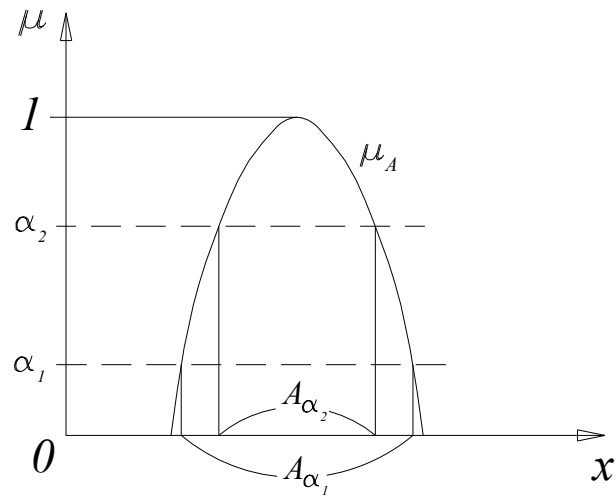


Figura 4.7 – Conjunto de nível α

4.4.6 Números Nebulosos

Um número nebuloso é por definição um conjunto nebuloso normal e convexo definido na reta $\mathbb{R}$, cujo suporte $\text{supp}(\tilde{A})$ é confinado e possui intervalos fechados na reta $\mathbb{R}$, conforme CHENG (2001). A figura 4.8 mostra algumas formas típicas de números nebulosos.

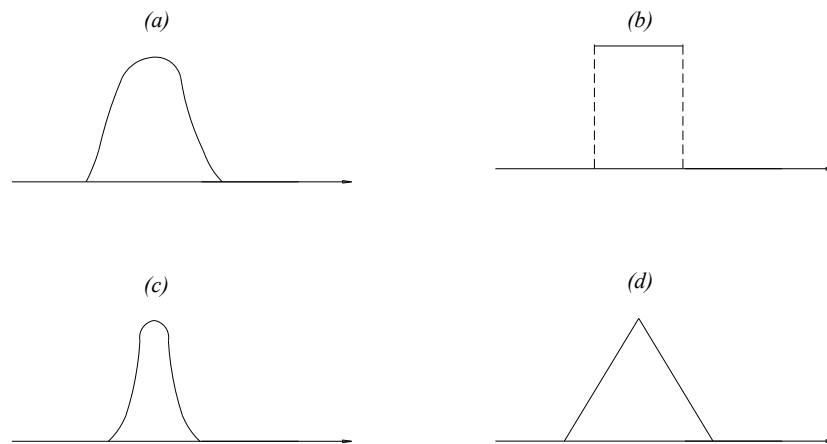


Figura 4.8 – Algumas formas típicas de números nebulosos (Adaptado CHENG, 2001).

4.4.7 Números L-R

Um número nebuloso L-R (L = left; e R = right), possui função de pertinência formada pelas funções $L(x)$ e $R(x)$.

$$\mu_{\tilde{M}}(x) = \begin{cases} L(\frac{m-x}{\alpha}) & x \leq m, & \alpha > 0 \\ R(\frac{x-m}{\beta}) & x \geq m, & \beta > 0 \end{cases}$$

Onde: m = média ou valor modal

α e β são parâmetros de espalhamento

Uma representação gráfica de um número L-R é mostrada na figura 4.9.

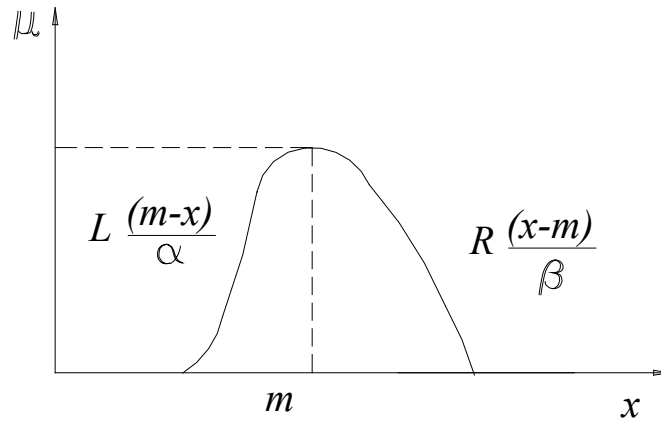


Figura 4.9 – Um número nebuloso L-R e suas funções de forma. (Adaptado CHENG, 2001).

Definidas as funções de forma, pode-se escrever um número nebuloso L-R da seguinte forma.

$$\tilde{M} = (m, \alpha, \beta)_{LR}$$

É importante notar que um número nebuloso L-R pode se transformar num número exato, no caso dos espalhamentos α e β serem nulos ($\alpha = \beta = 0$). Assim, o número nebuloso L-R será apenas o valor da média do número nebuloso, como segue.

$$\tilde{M} = (m, 0, 0)_{LR} = m$$

4.4.8 Números Nebulosos Triangulares (*Triangular Fuzzy Number – TFN*)

Devido à simplicidade para a modelagem de sistemas, o número nebuloso triangular é o formato mais utilizado para se definir um número nebuloso.

A função de pertinência de um número nebuloso triangular obedece à definição da função de reta, da geometria analítica. O número nebuloso triangular é composto por duas funções de reta, uma crescente e outra decrescente, definidas como segue.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0 & x > a_3 \end{cases}$$

onde, a_1 e a_3 são pontos extremos do espalhamento

a_2 é o valor modal do número nebuloso.

A figura 4.10 mostra um exemplo de TFN.

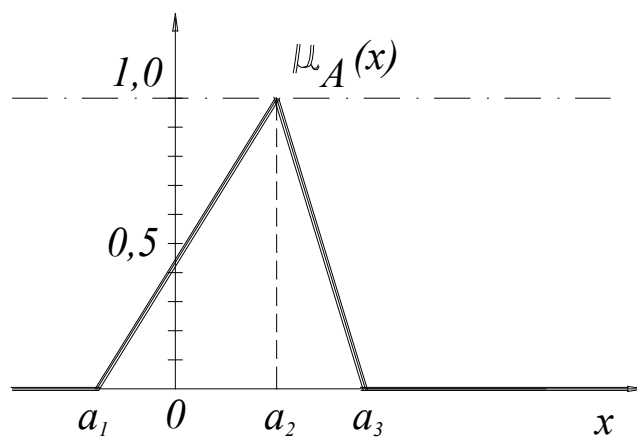


Figura 4.10 – Exemplo de um TFN. (Adaptado CHENG, 2001).

4.5. Agregação de Conjuntos Nebulosos

De acordo com KLIR (1995) apud CHENG (2001), a operação de agregação de conjuntos nebulosos é a operação na qual diversos conjuntos nebulosos são combinados obtendo um único conjunto nebuloso, podendo sua função ser definida como,

$f: [0,1]^n \rightarrow [0,1]$, $n \geq 2$, ou seja,

Quando se tem uma série de conjuntos nebulosos $\tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_n$, operando os graus de pertinência de cada um dos conjuntos $\tilde{A}_i$ ($i = 1, \dots, n$), obtém-se um conjunto agregado $\tilde{A}$. Assim,

$$\tilde{A}(x) = h(\tilde{A}_1(x), \dots, \tilde{A}_n(x))$$

Onde: $\tilde{A}(x)$ = conjunto nebulosos agregado

h = função de agregação (operador)

$\tilde{A}_i(x)$ = conjuntos nebulosos.

Para ter coerência, a função de agregação h deve satisfazer alguns axiomas,

1. Condições de contorno

$$h(0, 0, \dots, 0) = 0$$

$$h(1, 1, \dots, 1) = 1$$

2. Monotonicidade: para quaisquer conjuntos $(a_1, \dots, a_n)$ e $(b_1, \dots, b_n)$, tais que

$$a_i \text{ e } b_i \in [0, 1], (i = 1, \dots, n) \text{ e}$$

$$a_i \leq b_i, \quad \forall i$$

$$h(a_1, \dots, a_n) \leq h(b_1, \dots, b_n).$$

3. Ser uma função contínua.

4. h simétrico em todos os argumentos

$$h(a_1, \dots, a_n) = h(a_{p_1}, \dots, a_{p_n}).$$

Onde: a_{p_i} representam as permutações dos a_i .

5. h é idempotente

$$h(a, a, \dots, a) = a \quad \forall a \in [0,1]$$

As funções de min e max são funções de agregação, obedecendo a desigualdade:

$$\min(a_1, \dots, a_n) \leq h(a_1, \dots, a_n) \leq \max(a_1, \dots, a_n)$$

A função **min** é conhecida como agregação pessimista e a função **max** é conhecida como agregação otimista. Dentre as funções de agregação mais comuns, podemos citar,

- a média aritmética
- a média geométrica

4.6. Considerações

Como foi mostrado, pode-se perceber que a função de pertinência é a base para a descrição das informações nebulosas e ela deve refletir as características do conjunto. Na prática, são utilizados processos mental e psicológico humanos na determinação das funções de pertinência e, talvez por isso, apesar de termos vários artifícios e meios práticos para se definir tais funções, ela ainda é complexa e necessita ser complementada. Essa determinação, porém, não é estritamente subjetiva, pois, existem elementos objetivos que regem as funções de pertinência, se for subjetivo, portanto, ela tem que condizer com a realidade.

5. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho teve origem numa pesquisa realizada por YAMAGUSHI, et al (1995), onde foi determinada, num recinto fechado, uma relação entre a impressão psicológica sentida por alguns entrevistados expostos a estímulos sonoros físicos.

O ensaio experimental deste trabalho foi adaptado do ensaio realizado por YAMAGUSHI, et al (1995), porém, a forma de obtenção dos dados e análise dos resultados foi totalmente distinta.

Neste trabalho, basicamente, busca-se saber se um determinado conjunto de estímulos podem ser considerados agradáveis ou não, para um grupo de ouvintes. Diferentemente, na pesquisa de YAMAGUSHI, et al (1995), buscou-se saber o quão ruidoso (*noisiness*) era o estímulo sonoro.

5.1. Linha do Experimento Psicológico de YAMAGUSHI

No experimento de YAMAGUSHI, et al (1995), foram utilizados cinco entrevistados, três rapazes de 20 anos e dois rapazes de 22 anos, com audição normal. De acordo com método do julgamento contínuo por categoria, a impressão psicológica do estímulo sonoro foi dividida em sete categorias: 1 – Muito calmo; 2 – quieto calmo; 3 – levemente calmo; 4 – médio; 5 – levemente ruidoso; 6 – ruidoso calmo e 7 – muito ruidoso. Com base nestas variáveis lingüísticas, cada entrevistado deu sua impressão psicológica aos estímulos sonoros que foram impostos em intervalos de 10 segundos, entre um e outro, com duração de 5 segundos cada. Os entrevistados foram expostos à 360 estímulos, dividido em três etapas que durou 10 minutos cada, portanto, o ensaio teve uma duração total de 30 minutos.

YAMAGUSHI, et al (1995), utilizou ainda, dois tipos de estímulos acústicos para avaliar a impressão psicológica dos entrevistados, uma foi o ruído branco de banda larga, com amplitude

modulada, e o outro foi um ruído de tráfego real, empregado como um exemplo típico de ruído aleatório e de distribuição probabilística arbitrária.

5.2. Linha do experimento psicológico deste trabalho

Este trabalho tem como área de investigação, o efeito provocado nos sentimentos das pessoas com relação à exposição a estímulos sonoros. Estes estímulos variaram em nível de pressão sonora e em faixas de frequência, aleatoriamente. Buscou-se identificar quais ruídos eram considerados desagradáveis, quais os aceitáveis e quais os agradáveis para os entrevistados expostos.

Os resultados foram analisados segundo os conceitos da Teoria dos Sistemas Nebulosos (*Fuzzy Systems Theory*), utilizando-se os conceitos básicos de Agregação de Conjunto Nebuloso (*Fuzzy Aggregation*).

YAMAGUSHI, et al (1995) obteve como resposta, as funções do nível de probabilidade de cada variável lingüística acontecer, num gráfico $P(Fi) \times Fi$ (porcentagem x impressão psicológica), enquanto que aqui, o objetivo foi identificar as regiões de “*agradabilidade*” num gráfico de nível de pressão sonora em função de frequência.

Neste trabalho utilizou-se apenas o ruído branco de banda larga como estímulo sonoro, não sendo utilizado ruído real, como no ensaio de YAMAGUSHI, et al (1995).

5.3. Local de ensaio e disposição de entrevistados

Como local de ensaio foi escolhido o Laboratório de Física e Conforto Ambiental da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Esta sala apresenta boas condições acústicas. Os tempos de reverberação foram medidos e encontram-se em torno de 1 segundo para todas as frequências em bandas 1/1 oitava. Esse valor de tempo de reverberação garantiu a não interferência de um estímulo sonoro ao subsequente, uma vez que, os intervalos entre os estímulos foram de 10 segundos.

A sala escolhida para o ensaio apresenta em pontos distintos do seu interior, desvio padrão máximo de 2 dB, nas frequências utilizadas no ensaio, portanto, abaixo da capacidade psicológica de um indivíduo conseguir distinguir uma variação de pressão entre um ponto da sala e outro.

O ouvido humano não percebe todas as variações em nível de pressão sonora. Conforme BELL E BELL (1994), se sabe que “em condições controladas o ouvido dificilmente pode detectar uma diferença de nível de 3 dB e em presença de nível de ruído de fundo normal do dia a dia, com audição normal, são necessários 5 dB”, ou seja, uma pessoa com audição normal necessita de uma variação de pressão da ordem de 5 dB para que a mesma tenha a sensação de que houve uma mudança de nível de pressão.

Com base neste conceito, não se priorizou a disposição dos entrevistados a uma distância fixa da fonte. Os entrevistados, em número de nove, 3 mulheres e 6 homens, com idade entre 18 e 25 anos e audição normal, puderam escolher seus lugares aleatoriamente sem que isso afetasse os resultados deste ensaio, ou seja, não importou qual fosse a distância de qualquer entrevistado em relação à fonte, ou qualquer que fosse o ponto em que se encontrasse o entrevistado, uma vez que, a percepção do entrevistado em relação ao estímulo se conteve dentro de um limite de variação de pressão de 2 dB, estando portanto, dentro de uma região na qual o ouvido não consegue distinguir tal variação de nível de pressão sonora.

5.4. Obtenção dos Dados

Foram criadas duas planilhas, uma destinada ao operador dos equipamentos para a geração dos estímulos sonoros e outra destinada às respostas dos entrevistados, dadas segundo a avaliação da sensação sonora que cada um teve da exposição aos estímulos sonoros.

Ambas as planilhas foram subdivididas em doze “Séries”, identificadas de “A” a “M”. Cada série do operador continha 12 exposições, com a frequência central da banda, as frequências inferior e superior e o nível teórico de pressão sonora dos sinais a serem gerados.

Estipulou-se um nível teórico de pressão sonora, uma vez que, objetivou-se atingir os níveis que estavam impressos nas planilhas, porém, é sabido que na prática, não se consegue valores exatos de nível de pressão sonora e sim valores aproximados, os quais foram medidos em tempo real e posteriormente os níveis de pressão sonora real, de cada estímulo sonoro, foram transferidos para as planilhas de cálculo.

Dessa forma, completada o conjunto de séries, obteve-se um total de 144 exposições para cada entrevistado. Na tabela 5.1 é mostrado um exemplo da planilha do operador.

Tabela 5.1 – Exemplo de Planilha do Operador

PLANILHA DO OPERADOR				SÉRIE “A”	
Tons	Centro de Banda (Hz)	Faixa Teórica (Hz)	Nível Teórico dB(A)	Frequência Real (Hz)	Nível Real dB(A)
1	250	180 a 350	50		
2	4000	2800 a 5650	40		
3	63	45 a 90	50		
4	4000	2800 a 5650	70		
5	500	350 a 710	60		
6	125	90 a 180	95		
7	2000	1400 a 2800	80		
8	1000	710 a 1400	70		
9	250	180 a 350	95		
10	500	350 a 710	40		
11	2000	1400 a 2800	40		
12	125	90 a 180	80		

A sequência de exposição aos estímulos sonoros foi previamente determinada, de maneira que fosse aleatório. A aleatoriedade foi fundamental para que se evitasse que os entrevistados, após serem expostos a um mesmo tipo de estímulo, tomassem uma “rotina” de respostas, ou seja, com essa atitude, tentou-se evitar o condicionamento de respostas dos entrevistados. Por exemplo, dois estímulos cuja frequência fosse de 500 Hz com um nível de pressão sonora em torno de 80 dB(A), não foram colocados em sequência um do outro. Vários outros estímulos foram colocados entre eles, variando tanto na frequência quanto no nível de pressão sonora.

Foram utilizadas frequências em bandas de 1/1 oitava ($f_1 = 63$ Hz; $f_2 = 125$ Hz; $f_3 = 250$ Hz; $f_4 = 500$ Hz; $f_5 = 1000$ Hz; $f_6 = 2000$ Hz; $f_7 = 4000$ Hz e $f_8 = 8000$ Hz). Os níveis de pressão sonora L_j , variaram entre o mínimo de 45 dB(A) e o máximo de 100 dB(A) nos 144 estímulos (L_j , $j = 1, 2, \dots, 144$). A maior parte dos estímulos tiveram uma variação do nível de pressão sonora em torno de 10 dB(A), diferença essa, suficiente para que um nível e outro fosse totalmente percebido. Somente em casos próximos aos limites, máximo e mínimo, é que essa variação foi de 5 dB(A), diferença essa, também percebida pelo ouvido, como foi mostrado.

Os entrevistados que participaram do ensaio, receberam planilhas subdivididas nas mesmas séries do operador, contendo os rótulos para escolha da alternativa que melhor representasse cada estímulo. Os rótulos escolhidos e contidos nas planilhas de respostas foram divididos em sete alternativas: REPUGNANTE; DETESTÁVEL; DESAGRADÁVEL; ACEITÁVEL; AGRADÁVEL; AMÁVEL e ADORÁVEL. Na tabela 5.2 é mostrado um exemplo da planilha do entrevistado.

Tabela 5.2 – Exemplo de Planilha do Entrevistado

PLANILHA DO ENTREVISTADO					SÉRIE “A”		
R U Í D O	R E P U G N A N T E	D E T E S T Á V E L	D E S A G R A D Á V E L	A C E I T Á V E L	A G R A D Á V E L	A M Á V E L	A D O R Á V E L
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							

5.5. Equipamentos

Para realização do ensaio utilizaram-se os seguintes equipamentos:

- Gerador de Ruído – Noise Generator, type 1405 (modification WH1206), Brüel & Kjaer;
- Amplificador – Power Amplifier, type 2706, Brüel & Kjaer;
- Fonte Sonora Omnidirecional – Sound Source OmniPower, type 4296, Brüel & Kjaer;
- Medidor de Nível Sonoro (tipo 0) – Integrating Sound Level Meter Mediator, type 2238-D, Brüel & Kjaer;
- Filtro – Universal Filter 1952, General Radio Company.

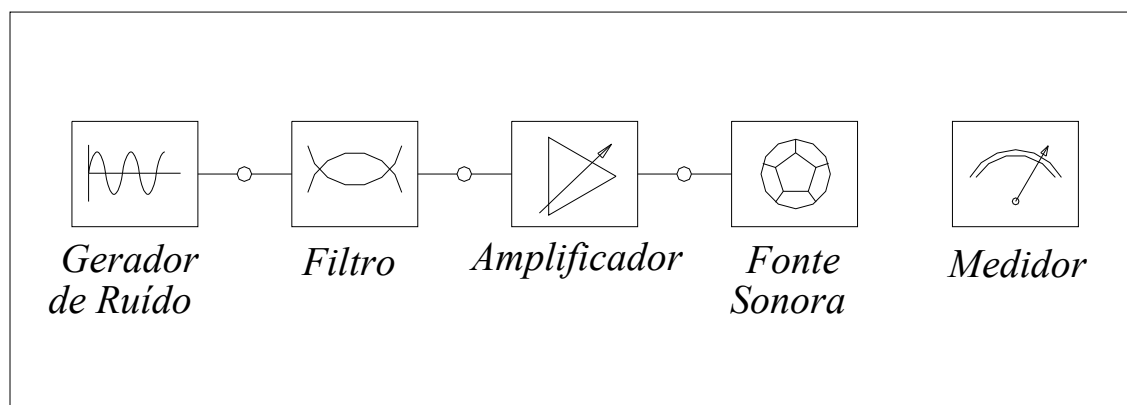


Figura 5.1 – Esquema de Montagem dos Equipamentos de Ensaio

5.5.1 Procedimento de geração do ruído

Foi gerado o Ruído Branco que com o auxílio do filtro “Passa Faixa” conseguiu-se estabelecer o limite inferior e o superior das faixas de frequências desejadas. Por exemplo, a banda de frequência de 125 Hz foi delimitada na frequência inferior de 90 Hz e na frequência superior de 180 Hz.

O Ruído Branco foi escolhido por representar uma distribuição plana de nível de pressão sonora em função da frequência. Na tabela 5.3, são mostradas as demais faixas de frequências das bandas de 1/1 oitava.

Tabela 5.3 – Frequências centrais, inferior e superior das bandas de 1/1-oitavas

$f_{\text{(central)}}$ (Hz)	$f_{\text{(inferior)}}$ (Hz)	$f_{\text{(superior)}}$ (Hz)
63	45	90
125	90	180
250	180	350
500	350	710
1000	710	1400
2000	1400	2800
4000	2800	5650
8000	5650	11300

6. RESULTADOS E ANÁLISE

Feita a coleta de dados, conforme a metodologia apresentada, iniciou-se uma organização dos resultados de forma a adequá-los ao procedimento de cálculo. Após concluir todas as etapas do raciocínio é apresentada uma análise do resultado obtido, objetivando validar o processo aqui apresentado.

6.1. Resultados

As respostas dadas pelos entrevistados aos estímulos sonoros foram lançadas em planilhas de cálculo e cada entrevistado foi representado e designado por E_p ($p = 1, 2, \dots, 9$). Para cada Rótulo foi atribuído um grau de pertinência em relação ao conjunto nebuloso Agradável, designado por $\tilde{A}$. O grau de pertinência das sete alternativas das planilhas de respostas, denominadas Rótulos, são relacionadas ao conjunto agradável $\tilde{A}$ pelo valor $\mu_{\tilde{A}}$, mostrado na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Rótulos em relação ao conjunto nebuloso Agradável $\tilde{A}$.

Rótulo	Grau de Pertinência ($\mu_{\tilde{A}}$)
Repugnante	$\mu_{\tilde{A}} = 0$
Detestável	$\mu_{\tilde{A}} = 0,1$
Desagradável	$\mu_{\tilde{A}} = 0,3$
Aceitável	$\mu_{\tilde{A}} = 0,5$
Agradável	$\mu_{\tilde{A}} = 0,7$
Amável	$\mu_{\tilde{A}} = 0,9$
Adorável	$\mu_{\tilde{A}} = 1,0$

Na planilha de cálculo apresentada na tabela 6.2, S_j ($j = 1, 2, \dots, 144$) é o conjunto de respostas dos nove entrevistados para cada estímulo j , representando cada linha das planilhas de cálculo, nas séries de A a M.

Em cada conjunto de respostas S_j ($j = 1, 2, \dots, 144$), associado ao j -ésimo estímulo sonoro, tem-se a frequência $f_{k,j}$, onde k define a frequência e L_j que define o nível de pressão sonora L do j -ésimo estímulo sonoro.

Para cada sinal gerado (estímulo sonoro), os entrevistados avaliaram o quão agradável era o estímulo sonoro e apresentaram suas interpretações subjetivas, definidas na tabela 6.2 por $\mu_{\tilde{A}_{p,j}}$, onde p indica o entrevistado e j indica qual foi o estímulo aplicado, ou seja, cada entrevistado deu sua opinião sobre o que sentiu quando exposto a cada estímulo sonoro ($f_{k,j}$, L_j). As opiniões dos entrevistados foram agregadas e obteve-se uma função de pertinência $\mu_{\tilde{A}_j}$, que é uma síntese das respostas individuais dos entrevistados, ou seja, $\mu_{\tilde{A}_j}$ é a avaliação subjetiva agregada dos entrevistados. O processo de agregação escolhido foi a média aritmética dos graus de pertinência $\mu_{\tilde{A}_{p,j}}$.

A última coluna da planilha de cálculo foi destinada ao cálculo de desvio padrão δ_j das médias obtidas.

Tabela 6.2 – Planilha de cálculo

S_j	$f_{k,j}$ (Hz)	L_j dB(A)	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	$\mu_{\tilde{A}_j}$	δ_j
S_1	$f_{k,1}$	L_1	$\mu_{\tilde{A}_{1,1}}$	$\mu_{\tilde{A}_{2,1}}$	$\mu_{\tilde{A}_{3,1}}$	..	..	..	..	..	$\mu_{\tilde{A}_{9,1}}$	$\mu_{\tilde{A}_1}$	δ_1
S_2	$f_{k,2}$	L_2	$\mu_{\tilde{A}_{1,2}}$	$\mu_{\tilde{A}_{2,2}}$	$\mu_{\tilde{A}_{3,2}}$	..	..	..	..	..	$\mu_{\tilde{A}_{9,2}}$	$\mu_{\tilde{A}_2}$	δ_2
...	...	...	..	..	..	..	..	..	..	..	..	...	...
...	...	...	..	..	..	..	..	..	..	..	..	...	...
S_{144}	$f_{k,144}$	L_{144}	$\mu_{\tilde{A}_{1,144}}$	$\mu_{\tilde{A}_{2,144}}$	$\mu_{\tilde{A}_{3,144}}$	..	..	..	..	..	$\mu_{\tilde{A}_{9,144}}$	$\mu_{\tilde{A}_{144}}$	δ_{144}

A função de pertinência μ_j foi calculada pela média aritmética segundo a equação:

$$\mu_{\tilde{A}_j} = \frac{1}{9} \sum_{p=1}^n \mu_{\tilde{A}_{p,j}}$$

Onde: n = número de entrevistados, $n = 9$.

j = índice do estímulo sonoro.

$\mu_{\tilde{A}_j}$ = valor do grau de agradabilidade do j -ésimo estímulo sonoro.

O desvio padrão foi calculado linha por linha da planilha de cálculo segundo a equação:

$$\delta_j = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^n (\mu_{\tilde{A}_j} - \mu_{\tilde{A}_{p,j}})^2}{n-1}}$$

Como exemplo prático são mostrados na tabela 6.3 os resultados obtidos na série A:

Tabela 6.3 – Resultados Obtidos na SÉRIE A

S_i	$f_{k,j}$ (Hz)	L_j dB(A)	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	$\mu_{\tilde{A}_j}$	δ_j
S_1	1000	94,7	0,5	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,26	0,17
S_2	125	86,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,34	0,13
S_3	2000	99,1	0	0,3	0,1	0,3	0	0	0	0	0	0,08	0,13
S_4	500	91,3	0,7	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,5	0,3	0,43	0,14
S_5	4000	86,6	0,1	0,3	0,5	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,21	0,15
S_6	250	99,4	0,3	0,5	0,5	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0	0,27	0,17
S_7	8000	83,1	0,3	0,3	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5	0,3	0,1	0,34	0,13
S_8	63	62,9	0,7	0,5	0,7	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,3	0,61	0,15
S_9	1000	85	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,54	0,09
S_{10}	500	71,9	0,7	0,5	0,7	0,5	0,7	0,5	0,7	0,7	0,5	0,61	0,11
S_{11}	2000	89,9	0,1	0,3	0,5	0,3	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0,23	0,14
S_{12}	4000	92,3	0	0,3	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0,06	0,10

Na tabela 6.3 pode-se observar que conforme o estímulo sonoro é aplicado, os entrevistados tendem a dar uma opinião similar. No estímulo S_{12} nota-se que o sinal gerado, a uma frequência de 4000 Hz num nível de pressão sonora em torno de 92 dB(A), é considerado pela maioria como repugnante. Já no estímulo S_8 a maioria considera o sinal gerado, a uma frequência de 63 Hz num nível de pressão sonora em torno de 63 dB(A), como agradável.

Essa tendência se confirmou em todas as doze planilhas de cálculo. As respostas dos entrevistados, as médias e os desvios são apresentados nos anexos A, B, C e D.

Obtidas as médias $\mu_{\tilde{A}_j}$, segue-se a classificação dos resultados seguindo o algoritmo abaixo:

1. Extraí-se das planilhas de cálculo as colunas $f_{k,j}$ (Hz), L_j dB(A), $\mu_{\tilde{A}_j}$ e δ_j . Os resultados que foram obtidos aleatoriamente são agora reorganizados por frequência f_k ($k = 1, \dots, 8$). A tabela 6.4 mostra um exemplo dos resultados reorganizados para frequência de 2000 Hz (f_6).

Tabela 6.4 – Exemplo de reorganização dos resultados para 2000 Hz (f_6).

S_j	$f_{k,j}$ (Hz)	L_j dB(A)	$\mu_{\tilde{A}_j}$	δ_j
S_3	2000	99,1	0,08	0,13
S_{11}	2000	89,9	0,23	0,14
S_{13}	2000	79,9	0,50	0,10
S_{22}	2000	69	0,61	0,15
S_{28}	2000	69,7	0,52	0,12
S_{32}	2000	88,9	0,18	0,12
S_{41}	2000	79,7	0,46	0,09
S_{46}	2000	99	0,10	0,12
S_{53}	2000	70,2	0,66	0,17
S_{57}	2000	98,4	0,09	0,13
S_{64}	2000	89,7	0,21	0,11
S_{66}	2000	79,8	0,43	0,10
S_{80}	2000	99,4	0,09	0,13
S_{84}	2000	70,3	0,61	0,15
S_{88}	2000	90	0,22	0,12
S_{94}	2000	80,1	0,48	0,07
S_{101}	2000	70,5	0,61	0,11
S_{105}	2000	89,7	0,22	0,16
S_{110}	2000	79,9	0,48	0,12
S_{118}	2000	99,3	0,08	0,13
S_{127}	2000	89,6	0,23	0,14
S_{132}	2000	69,7	0,61	0,11
S_{137}	2000	79,7	0,48	0,07
S_{143}	2000	98,7	0,10	0,18

As demais tabelas com os dados reorganizados para cada frequência são apresentados nos anexos E e F.

2. Reorganizados os resultados por frequência conforme a tabela 6.4, constrói-se um gráfico para cada frequência, onde serão apresentados os resultados da função de pertinência $\mu_{\tilde{A}_j}$ em função do nível de pressão sonora L_j dB(A). Em cada gráfico são gerados pontos dispersos pelos quais é possível se obter uma curva de tendência, gerada a partir desses pontos (ver figura 6.1). Nos anexos G, H, I e J são apresentados todos os gráficos, com suas curvas de tendência e equação da curva para cada frequência.

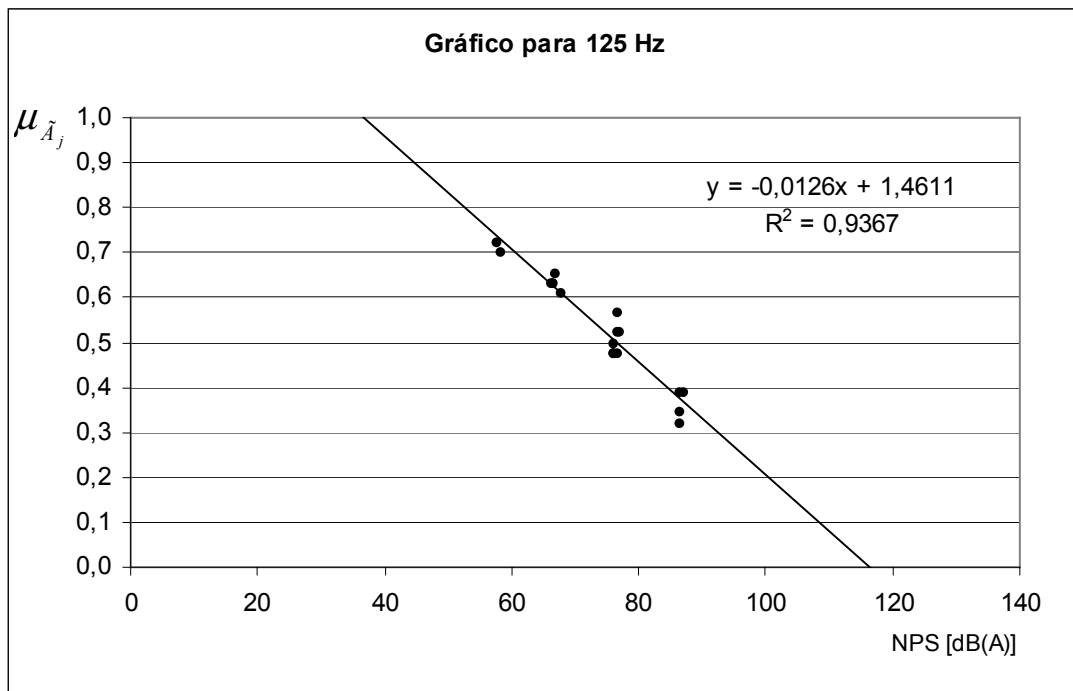


Figura 6.1 – Exemplo de gráfico de função de pertinência em função do nível de pressão sonora para 125 Hz.

3. A partir dos gráficos de função de pertinência ($\mu_{\tilde{A}_j}$) em função do nível de pressão sonora, um para cada frequência f_k ($k = 1, \dots, 8$), cada qual com sua equação correspondente, dado um valor de $\mu_{\tilde{A}_L}$, é possível determinar o valor do nível de pressão sonora “L”, representado por $L_{(\mu_{\tilde{A}_L}; f_k)}$.

Tabela 6.5 – Valores de L (nível de pressão sonora) para cada $\mu_{\tilde{A}_L}$, onde se incluem os graus de pertinência do conjunto Agradável $\tilde{A}$ dos rótulos.

$\mu_{\tilde{A}_L}$	Frequência (Hz)								RÓTULOS
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1,0	30,7	36,6	41,1	36,6	44,7	49,2	48,2	42,4	Adorável
0,9	38,8	44,5	48,7	45,4	51,7	54,6	53,0	47,8	Amável
0,8	46,9	52,5	56,3	54,1	58,7	60,0	57,9	53,3	
0,7	55,1	60,4	63,9	62,9	65,7	65,4	62,7	58,7	Agradável
0,6	63,2	68,3	71,4	71,7	72,7	70,8	67,5	64,1	
0,5	71,3	76,3	79,0	80,4	79,7	76,2	72,3	69,6	Aceitável
0,4	79,5	84,2	86,6	89,2	86,7	81,6	77,2	75,0	
0,3	87,6	92,2	94,2	98,0	93,6	87,0	82,0	80,4	Desagradável
0,2	95,7	100,1	101,7	106,8	100,6	92,4	86,8	85,9	
0,1	103,9	108,0	109,3	115,5	107,6	97,8	91,7	91,3	Detestável
0,0	112,0	116,0	116,9	124,3	114,6	103,2	96,5	96,7	Repugnante

Cada linha da tabela 6.5 mostra os pontos por onde passam as curvas aqui denominadas de “*curvas de isopertinência*”. Por exemplo, a *curva de isopertinência 0,5* (a qual corresponde também ao rótulo Aceitável), passa pelo ponto $L_{(0,5;63)} = 71,3$ dB(A) em $f_1 = 63$ Hz; $L_{(0,5;125)} = 76,3$ dB(A) em $f_2 = 125$ Hz; $L_{(0,5;250)} = 79$ dB(A) em $f_3 = 250$ Hz e assim por diante. Para as demais *curvas de isopertinência* o raciocínio é o mesmo.

- Com base nos valores de $L_{(\mu_{\tilde{A}_L}, f_k)}$, para cada par $(\mu_{\tilde{A}_L}, f_k)$ apresentados na tabela 6.5, constrói-se o gráfico de nível de pressão sonora em função de frequência, intitulado “**Regiões de Agradabilidade**”, conforme a figura 6.2. Esta figura mostra todas as “*curvas de isopertinência*” que delimitam as regiões onde predominam os rótulos: Adorável, Amável, Agradável, Aceitável, Desagradável, Detestável e Repugnante, regiões estas, obtidas das avaliações subjetivas do grupo de entrevistados aos diversos estímulos sonoros aos quais eles foram expostos.

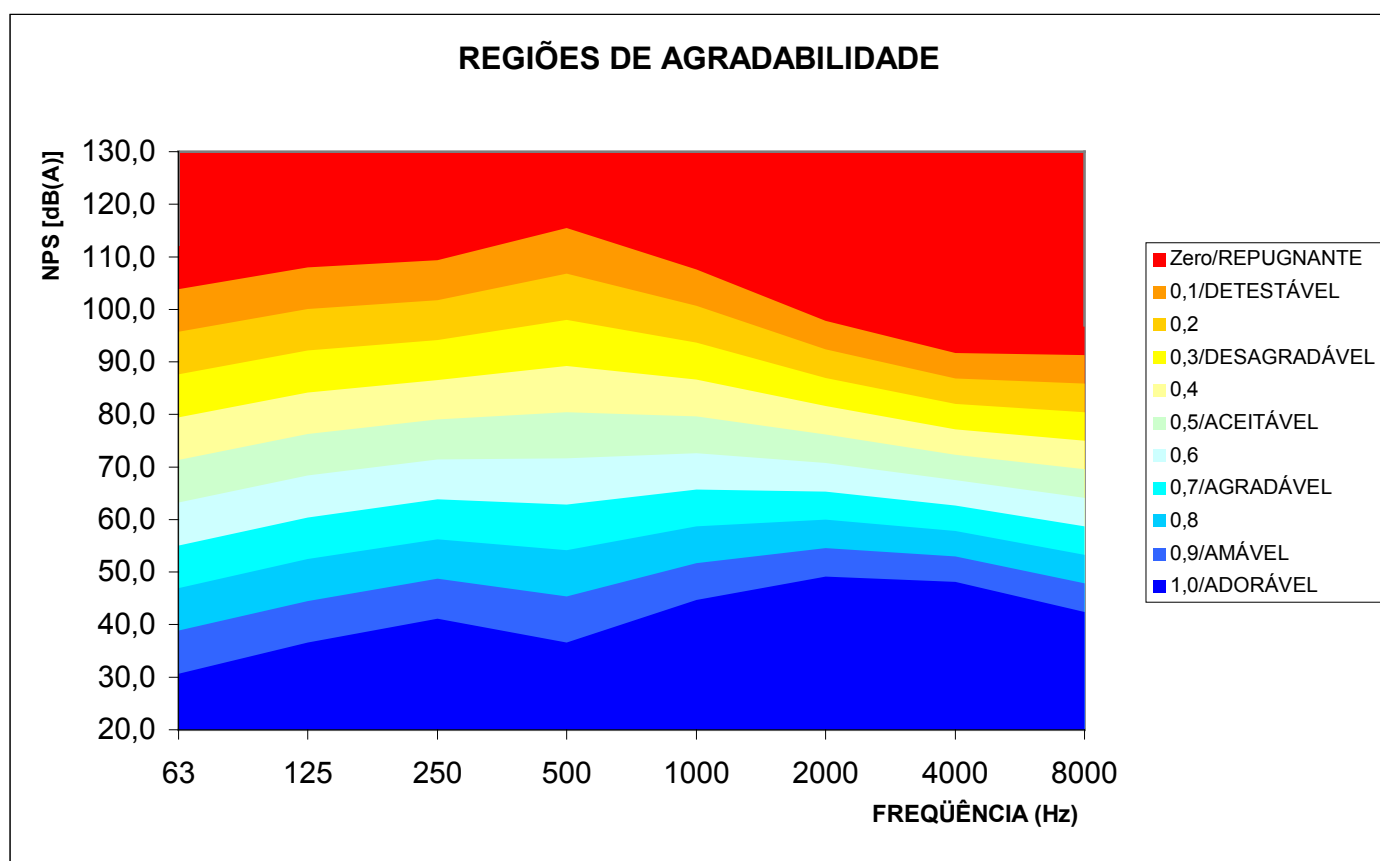


Figura 6.2 – Regiões de “Agradabilidade”

6.2. Análise

Em todas as tabelas apresentadas nos anexos E e F, observa-se que os estímulos foram pré-determinados de maneira que ficassem distribuídos aleatoriamente, ou seja, foi intencional a não colocação de um estímulo em uma determinada frequência, “em torno de” um nível de pressão sonora, um em seguida do outro.

O exemplo disso é mostrado na tabela 6.6 extraída do anexo F, onde estão destacados em negrito os estímulos na frequência de 4000 Hz com o nível de pressão sonora variando em torno de 92 dB(A). Os estímulos S_{12} , S_{31} , S_{44} e S_{62} , representam qual a sequência em que eles aparecem, um foi o 12º estímulo, o outro o 31º e assim por diante. Isso é observado em todas as demais tabelas, cuja intenção foi a de se evitar que o grupo de entrevistados tomasse uma rotina de respostas, como foi dito anteriormente.

Tabela 6.6 – Estímulos para a frequência de 4000 Hz (f_7).

S_j	$f_{k,j}$ (Hz)	L_j dB(A)	$\mu_{\hat{A}_j}$	δ_j
S_5	4000	86,6	0,21	0,15
S_{12}	4000	92,3	0,06	0,10
S_{14}	4000	67	0,57	0,14
S_{20}	4000	76,9	0,41	0,11
S_{26}	4000	86,4	0,18	0,12
S_{31}	4000	92,7	0,07	0,10
S_{42}	4000	77	0,41	0,11
S_{44}	4000	92,3	0,09	0,13
S_{52}	4000	83,8	0,20	0,12
S_{59}	4000	76,9	0,50	0,10
S_{62}	4000	92	0,09	0,13
S_{69}	4000	86,6	0,21	0,11
S_{75}	4000	67,1	0,57	0,14
S_{82}	4000	77	0,46	0,17
S_{86}	4000	77	0,43	0,10
S_{93}	4000	86,5	0,20	0,12
S_{100}	4000	94,5	0,08	0,13
S_{107}	4000	86,8	0,18	0,12
S_{112}	4000	77	0,48	0,07
S_{117}	4000	67,4	0,59	0,11
S_{122}	4000	86,7	0,18	0,12
S_{133}	4000	95,3	0,06	0,10

Na mesma tabela 6.6 pode-se observar que os estímulos para a frequência de 4000 Hz apresentam coerência nas repostas dos entrevistados quando se analisa a relação entre o nível de pressão sonora e a função de pertinência $\mu_{\tilde{A}_j}$. Se analisados os estímulos S_5 , S_{26} , S_{69} , S_{93} , S_{107} e S_{122} (linhas sombreadas), nota-se que todos estes estímulos estão em torno de 86 dB(A) ou 87 dB(A) e pela avaliação dos entrevistados, nestas condições, apresentam uma função de pertinência $\mu_{\tilde{A}_j}$ em torno de 0,20. Portanto, este estímulo ficou numa região de transição entre os rótulos Desagradável e Detestável. Este fato também é uma constância em todas as tabelas das demais frequências.

Se observado, por outro lado, as linhas sem destaque da tabela 6.6, pode-se comparar os estímulos que apresentam níveis de pressão sonora em torno de 67 dB(A) e 77 dB(A). Nota-se que quando se reduz o nível de pressão sonora em torno de 10 dB(A), há um aumento da “*agradabilidade*” na avaliação do grupo de entrevistados. É nítida a mudança do valor $\mu_{\tilde{A}_j}$ quando se altera o nível de pressão sonora e isso já era esperado anteriormente à execução do ensaio, pois, é sabido, por experiência própria de qualquer pessoa, que conforme se aumenta o nível de pressão sonora, ocorre um aumento no desconforto de quem está exposto ao ruído.

Como exemplo, pode-se observar que S_{86} apresenta um nível de pressão sonora de 77 dB(A) e a avaliação agregada dos entrevistados $\mu_{\tilde{A}_j}$ é igual a 0,43 e que S_{75} apresenta um nível de pressão sonora de 67,1 dB(A) e a avaliação agregada dos entrevistados $\mu_{\tilde{A}_j}$ é igual a 0,57. Para as demais linhas esta diferença é nítida em todos os casos, uma vez que, o $\mu_{\tilde{A}_j}$ máximo para o nível de pressão sonora em torno de 77 dB(A) é igual a 0,50 (S_{59}) e não se teve nenhum $\mu_{\tilde{A}_j}$ menor que 0,57 para os níveis de pressão sonora em torno de 67 dB(A).

A coerência do procedimento adotado se justifica por estes motivos, primeiro devido à aleatoriedade dos estímulos e segundo aos resultados obtidos conforme as respostas do grupo de entrevistados aos estímulos expostos. Vê-se, por exemplo, na tabela 6.6, que entre o estímulo 69 e o estímulo 93 ocorreram outros 24 estímulos com diferentes níveis de pressão sonora e frequências diferentes e, mesmo assim, o

grupo de entrevistados deu como avaliação subjetiva para estes estímulos, valores que resultaram em $\mu_{\tilde{A}_j}$ próximo a 0,20.

Algumas características importantes são observadas nas “**Regiões de Agradabilidade**”. Observa-se na figura 6.2, quando se analisa o gráfico por frequências, que as baixas frequências (bandas de frequências abaixo de 500 Hz), têm uma faixa de transição do rótulo Adorável para o Repugnante da ordem de 70 dB(A), enquanto que as altas frequências (bandas de frequências acima de 500 Hz), têm essa faixa de transição da ordem de 50 dB(A). Observa-se, também, que as médias frequências (bandas de frequências em torno de 500 Hz), apresentam para esta faixa de transição uma diferença da ordem de 80 dB(A).

Analisando a região admitida como Adorável, pode-se notar que existe uma tendência a suportar níveis de pressão sonora maiores em altas frequências do que em baixas frequências. Em contrapartida, analisando a região admitida como Repugnante, pode-se notar que existe uma tendência a suportar níveis de pressão sonora maiores em baixas frequências do que em altas frequências, ou seja, há uma inversão de agradabilidade quando se analisa o gráfico por frequências e pelos extremos das regiões.

Uma característica importante se observa em 500 Hz. Nesta frequência ocorre uma dilatação das curvas, apresentando picos que as distorcem. Visto pelo lado das regiões agradáveis, a alternância dos rótulos acontece em um nível de pressão sonora inferior ao que acontecem com 250 Hz e algumas frequências altas. Visto pelo lado das regiões desagradáveis, a alternância dos rótulos acontecem na generalidade em níveis de pressão sonora superiores às baixas e altas frequências.

Se estas curvas forem comparadas com as curvas isofônicas de FLETCHER e MUNSON (1934), mostradas no item 3.8, pode-se observar três características:

1) Nota-se nas curvas isofônicas, principalmente nas curvas que vão de 30 dB a 110 dB, que o ouvido humano tem a sensação de que em 500 Hz os sons têm níveis mais elevados, quando comparados com as baixas frequências e com 1000 Hz (parâmetro de comparação). Como exemplo, pode-se observar que a curva isofônica de 70 dB dá a sensação de 66 dB em 500 Hz, ou seja, são necessários menores níveis de pressão sonora em torno de 500 Hz para que se tenha sensação mais alta em baixas frequências e em 1000 Hz.

2) Em 4000 Hz, as curvas isofônicas sofrem uma queda abrupta, onde se observa que são necessários incrementos de – 10 dB, em média, para se ter as mesmas sensações em 1000 Hz. Como exemplo, pode-se observar que é necessário um nível de pressão sonora de aproximadamente 70 dB em 4000 Hz para se ter uma sensação de 80 dB em 1000 Hz.

3) Nas curvas isofônicas percebe-se que partindo da curva isofônica de nível mais baixo (10 dB) até a curva isofônica de nível mais alto (120), tem-se uma diferença de 110 dB percebida em 1000 Hz. Essa diferença equivale a aproximadamente 95 dB em 100Hz, ocasionando assim, uma nítida “compressão” das linhas isofônicas em baixas frequências, as quais sofrem uma “dilatação” nas altas frequências, ou seja, ocorre um aumento dos espaçamentos das curvas isofônicas em altas frequências. Percebe-se o óbvio que entre as curvas isofônicas de 30 dB e 40 dB, tem-se uma variação de 10 dB em 1000 Hz, variação esta, quando vista em 50 Hz, parece estar em torno de 5 dB.

Quando se observa, por outro lado, as **curvas de isopertiência** no gráfico das **Regiões de Agradabilidade**, percebe-se que ocorre um fenômeno inverso ao das curvas isofônicas. O aumento dos espaçamentos entre as **curvas de isopertiência** ocorre nas baixas frequências, ou seja, ocorre uma “dilatação” em baixas frequências e uma “compressão” em altas frequências, numa faixa de transição entre os extremos Repugnante e Adorável.

Nota-se que em 500 Hz houve um aumento maior dos espaçamentos entre as **curvas de isopertiência**, isso pode estar ligado à característica 1) observada anteriormente. O fato de em 4000 Hz haver uma diminuição, ou seja, um estrangulamento desses espaçamentos, pode estar relacionado à característica 2).

Provavelmente, como visto pelas curvas isofônicas, devido ao ouvido humano ter uma maior capacidade de distinguir sons em altas frequências, incrementos menores de níveis de pressão sonora são necessários para ocasionar as transições das **curvas de isopertinência**, por exemplo, para se “saltar” da região Detestável para a Desagradável são necessários variações maiores dos níveis de pressão sonora em baixas frequências do que em altas frequências.

Assim, essa diferença de percepção sonora existente entre as altas frequências e as baixas frequências pode ter feito com que os entrevistados deste trabalho tivessem um senso mais apurado ao avaliar os estímulos em altas frequências, quando comparados com as baixas frequências e, por isso, a faixa de transição entre as regiões Repugnante e Adorável tenha sido menor em altas frequências.

É importante salientar que tudo o que foi dito são meras especulações. Somente o futuro poderá esclarecer tais inconvenientes e, portanto, este trabalho deve ser considerado como apenas um pequeno passo visando o uso mais efetivo dos conceitos nebulosos na área de acústica, embora se saiba que muitos estudos ainda devam ser feitos nesse sentido.

7. CONCLUSÃO

Com base nos experimentos feitos neste trabalho, verifica-se que a Teoria do Sistema Nebuloso é uma ferramenta capaz de qualificar estímulos sonoros e ser utilizado na área de acústica.

Conseguiu-se, como foi mostrado, relacionar a percepção sonora dos entrevistados com os estímulos sonoros aplicados, utilizando um método relativamente simples.

As **regiões de *agradabilidade*** apresentadas no gráfico de nível de pressão sonora em função de frequência, objetivo principal deste trabalho, mostram-se coerentes e dentro das expectativas que antecederam ao ensaio e ao desenvolvimento da sequência de avaliação dos dados, uma vez que, como já foi dito, níveis de pressão sonora mais elevados tendem a ser mais desconfortáveis. Isso fica explícito graficamente ao se analisar as “***curvas de isopertinências***”, que mostram a região Adorável predominando níveis baixos de pressão sonora e a região Repugnante predominando níveis altos de pressão sonora em todas as frequências.

8. TRABALHOS FUTUROS

Os entrevistados deste trabalho tinham idades entre 18 e 25 anos, portanto, pessoas consideradas jovens. Dessa forma, as curvas de agradabilidade aqui encontradas referem-se a apenas esta faixa etária, ou seja, ele é válido apenas para esse público. Elas não abrangem outras faixas etárias, como adolescentes, com idades entre 12 e 18 anos, nem adultos com idades em torno de 30, 40 e 50 anos, nem tão pouco, idosos com 60 anos ou mais. Portanto, a realização de ensaios que incluam as demais faixas etárias torna-se importante, uma vez que, será possível conhecer as regiões de agradabilidade pertinentes a cada grupo de idades.

O estímulo aqui utilizado para se descobrir estas regiões de agradabilidade foi baseado apenas no ruído branco. Torna-se evidente que se pode utilizar outros tipos de estímulos sonoros e avaliar a agradabilidade deles. Pode-se utilizar ruídos de fontes reais, como ruído de automóveis, ruídos dentro de ambientes de trabalho, enfim, ruídos os mais diversos possíveis podem ser avaliados e qualificados segundo o procedimento aqui utilizado.

Conforme a descoberta de outras regiões de agradabilidade, que incluam as faixas etárias e tipos diferentes de ruídos, os mesmos poderão ser compilados e utilizados para otimização de projetos, onde será possível adequar ambientes e/ou equipamentos ruidosos dentro das regiões de agradabilidade já na fase de projeto dos mesmos.

Poderão ser desenvolvidos métodos para controlar ruídos, ou adequar os já existentes, de forma a manter ambientes já existentes dentro da região tida como agradável ou aceitável.

As regiões de agradabilidade poderão ser utilizadas para as mais variadas aplicações, tudo vai depender das experiências que serão realizadas e o cunho das soluções que se queira atingir. Isso é o que vai direcionar os estudos e priorizar o que se deve ou não ser feito.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. BELL, L.H. BELL, D. H. “**Industrial noise control – fundamentals and applications**”, 2 ed, Marcel Dekker, New York, USA, 1994.
2. CAVANAUGH, W. J. WILKES, J. A. “**Architetural acoustics – principles and practice**”, John Wiley & Sons, 1999.
3. CHEN, Z. ZEN, D. ZHANG, Q. “**Sky model study using fuzzy mathematics**”, Journal of the Illumination Engineering Society, Winter 1994, pp. 52-58.
4. CHENG, L. Y. “**Quantificação de variáveis subjetivas no projeto**”. São Paulo, s.ed. 2001. n.p. / material didático da disciplina de pós-graduação ‘PCC-5015’, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – xerocopiado/
5. CYSNE, L. F. “**Áudio – Engenharia e Sistemas**”, 2 ed, H. Sheldon, Rio de Janeiro, Brasil, 1992.
6. FRIEDMAN, M. MA, M. KANDEL, A. “**Fuzzy linear systems**”, Fuzzy Sets and Systems, vol. 96, 1998, pp. 201-209.
7. HARRIS, A. L. N. C. “**Metodologias baseadas na teoria dos sistemas nebulosos (fuzzy systems theory) para o tratamento das informações subjetivas do projeto arquitetônico**”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.
8. KLIR, G. J. ”**On fuzzy-set interpretation of possibility theory**”, Fuzzy Sets and Systems, vol. 108, 1999, pp. 263-273

9. MA, M. FRIEDMAN, M. KANDEL, A. “**A new fuzzy arithmetic**”, Fuzzy Sets and Systems, vol. 108, 1999, pp. 83-90.
10. MARROQUIM, M. “**Using Sound Quality in the Automotive Industry**”, IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ACÚSTICA VEICULAR – Sibrav, Sobrac, S. B. Campo – SP – Brasil, agosto, 1999.
11. MIRANDA, G. HAGE, M. M. YAMASHITA, E. T. “**‘Sound quality’ no desenvolvimento de novos produtos**”, IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ACÚSTICA VEICULAR – Sibrav, Sobrac, S.B. Campo – SP – Brasil, agosto 1999.
12. RALESCU, D. A. SUGENO, M. “**Fuzzy integral representation**”, Fuzzy Sets and Systems, vol. 84, 1996, pp. 127-133.
13. RAY, K. S. GHOSHAL, J. “**Neuro fuzzy approach to pattern recognition**”, Neural Networks, Elsevier Science, vol. 10(1), 1997, pp. 161-182.
14. SHAW, I. S. SIMÕES, M. G. “**Controle e modelagem fuzzy**”, 1 ed, Edgard Blücher - FAPESP, São Paulo, Brasil, 1999, 165 p.
15. SILVA, P. “**Acústica arquitetônica e condicionamento de ar**”, 3 ed, Edtal, Belo Horizonte, Brasil, 1997, 277 p.
16. SMITH, B. J. PETERS, R. J. OWEN, S. “**Acoustics and Noise Control**”, 2 nd, Longman, Essex, Londres, UK, 1996.
17. YAMAGUSHI, et al. “**A psychological evaluation method for fluctuating random noise based on fuzzy set theory**”, Applied Acoustics, Elsevier Science, vol. 45, 1995, pp. 139-154.
18. YOSHIZAWA, SALVADORI e MATOS JÚNIOR “**Lógicas não clássicas**”, URL: <http://www.geocities.com/logicas2000/>, Data de Acesso: 7/10/2000.

19. ZADEH, L. A. “**Fuzzy sets**”, Information and Control, vol. 8, 1965, pp. 338-353.
20. ZWICKER, E. FASTL, H. “**Psychoacoustics – facts and models**”, 2 ed, Springer, Berlin, Alemanha, 1999.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

1. ALONSO, M. FINN, E. J. **“Física – um curso universitário”**, vol. 1, Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 1981, 481 p.
2. BECKER, J. SAPP, M. **“Syntetic soundfields for the rating of spatial perceptions”**, Applied Acoustics, Elsevier Science, vol. 62, 2001, pp. 217-228.
3. BOJADZIEV, G. BOJADZIEV, M. **“Fuzzy sets, fuzzy logic, applications”**, Advances in Fuzzy Systems – Applications and Theory, vol. 5, World Scientific, Singapura, 1995, 283 p.
4. CHENG, L. Y. **“Considerações de fatores subjetivos no projeto”**, 4º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, São Paulo, Brasil, 1999, pp. 326-331.
5. GERGES, S. N. Y. **“Ruído : fundamentos e controle”**, CBSSI, São Paulo, Brasil, 1992, 600p.
6. HIRAMATSU, K. et al. **“The effect of sound duration on annoyance”**, Journal of Sound and Vibration, vol. 59(4), 1978, pp. 511-520.
7. KIM, H. M. KOSKO, B. **“Fuzzy prediction and filtering in impulsive noise”**, Fuzzy Sets and Systems, vol. 77, 1996, pp. 15-33.
8. MARIMOTO, M. IIDA, K. SAKAGAMI, K. **“The role of reflections from behind the listener in spatial impression”**, Applied Acoustics, Elsevier Science, vol. 62, 2001, pp 109-124.

9. MOTEJUNAS, P. R. “**Física aplicada – acústica**”, Mogi das Cruzes, s. ed. 1981. n.p. / material didático da disciplina de Física Aplicada, Faculdade de Arquitetura, Universidade de Mogi das Cruzes, São Paulo – xerocopiado/
10. PEDRYCZ, W. “**Fuzzy control and fuzzy systems – second, extended, edition**”, Research Studies Press, Somerset, England, 1993, 350 p.
11. RESNICK, R. HALLIDAY, D. “**Física 2**”, 4 ed, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, Brasil, 1984, 309 p.
12. SATO, M. SATO, Y. JAIN, L. C. “**Fuzzy clustering models and applications**”, Studies in Fuzziness and and Soft Computing, Physica-Verlag Heidelberg, Alemanha, 1997, 121 p.
13. YAMAGUSHI, S. SAEKI, T. KATO, Y. “**A practical prediction method of psychological response to arbitrary non-white random noise based on simplified patterns of membership functions**”, Applied Acoustics, Elsevier Science, vol. 48(2), 1996, pp. 155-174.

ANEXOS

ANEXO A

Planilhas de cálculo de A a C

SÉRIE A

S_i	$f_{k,i}$ (Hz)	L_i dB(A)	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	$\mu_{\bar{A}_i}$	δ_i
S_1	1000	94,7	0,5	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,26	0,17
S_2	125	86,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,34	0,13
S_3	2000	99,1	0	0,3	0,1	0,3	0	0	0	0	0	0,08	0,13
S_4	500	91,3	0,7	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,5	0,3	0,43	0,14
S_5	4000	86,6	0,1	0,3	0,5	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,21	0,15
S_6	250	99,4	0,3	0,5	0,5	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0	0,27	0,17
S_7	8000	83,1	0,3	0,3	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5	0,3	0,1	0,34	0,13
S_8	63	62,9	0,7	0,5	0,7	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,3	0,61	0,15
S_9	1000	85	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,54	0,09
S_{10}	500	71,9	0,7	0,5	0,7	0,5	0,7	0,5	0,7	0,7	0,5	0,61	0,11
S_{11}	2000	89,9	0,1	0,3	0,5	0,3	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0,23	0,14
S_{12}	4000	92,3	0	0,3	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0,06	0,10

SÉRIE B

S_i	$f_{k,i}$ (Hz)	L_i dB(A)	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	$\mu_{\bar{A}_i}$	δ_i
S_{13}	2000	79,9	0,3	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,50	0,10
S_{14}	4000	67	0,3	0,5	0,7	0,5	0,7	0,7	0,5	0,7	0,5	0,57	0,14
S_{15}	500	81,6	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	0,50	0,10
S_{16}	1000	75,5	0,5	0,7	0,7	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,57	0,10
S_{17}	63	53,4	0,5	0,7	0,5	0,5	0,7	0,9	0,7	0,5	0,7	0,63	0,14
S_{18}	8000	73,6	0,3	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,39	0,11
S_{19}	250	89,3	0,5	0,3	0,3	0,3	0,7	0,3	0,1	0,1	0,1	0,30	0,20
S_{20}	4000	76,9	0,3	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	0,3	0,5	0,3	0,41	0,11
S_{21}	500	62	0,5	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,5	0,5	0,5	0,66	0,17
S_{22}	2000	69	0,5	0,7	0,5	0,5	0,9	0,7	0,7	0,5	0,5	0,61	0,15
S_{23}	125	76,7	0,5	0,7	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,3	0,5	0,48	0,12
S_{24}	1000	66,7	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7	0,3	0,59	0,15

SÉRIE C

S_i	$f_{k,i}$ (Hz)	L_i dB(A)	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	$\mu_{\bar{A}_i}$	δ_i
S_{25}	250	79,3	0,5	0,5	0,7	0,3	0,5	0,5	0,5	0,3	0,5	0,48	0,12
S_{26}	4000	86,4	0,3	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0	0,1	0,18	0,12
S_{27}	500	91,6	0,5	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0	0,3	0,33	0,19
S_{28}	2000	69,7	0,5	0,5	0,5	0,3	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,52	0,12
S_{29}	125	58,1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,5	0,5	0,7	0,70	0,14
S_{30}	1000	85	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5	0,5	0,41	0,11
S_{31}	4000	92,7	0,3	0,1	0	0,1	0	0	0	0	0,1	0,07	0,10
S_{32}	2000	88,9	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0,3	0,3	0,18	0,12
S_{33}	500	82,1	0,5	0,5	0,7	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,50	0,10
S_{34}	1000	75,4	0,7	0,5	0,7	0,5	0,7	0,7	0,5	0,7	0,5	0,61	0,11
S_{35}	63	62,6	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,7	0,61	0,11
S_{36}	8000	73,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,43	0,10

ANEXO B

Planilhas de cálculo de D a F

SÉRIE D

S_i	$f_{k,j}$ (Hz)	L_j dB(A)	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	$\mu_{\bar{A}_j}$	δ_j
S_{37}	8000	64	0,7	0,3	0,5	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7	0,5	0,59	0,15
S_{38}	63	54	0,9	0,7	0,7	0,5	1	0,9	0,7	0,9	0,7	0,78	0,16
S_{39}	1000	94,7	0,1	0,3	0,3	0,3	0,1	0	0,1	0,5	0,3	0,22	0,16
S_{40}	500	61,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,5	0,5	0,5	0,66	0,13
S_{41}	2000	79,7	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	0,46	0,09
S_{42}	4000	77	0,5	0,3	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,5	0,5	0,41	0,11
S_{43}	250	69,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,7	0,5	0,63	0,10
S_{44}	4000	92,3	0	0,3	0,1	0,3	0	0	0	0	0,1	0,09	0,13
S_{45}	500	71,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,63	0,10
S_{46}	2000	99	0	0,3	0,1	0,3	0	0	0,1	0	0,1	0,10	0,12
S_{47}	1000	84,5	0,7	0,7	0,5	0,3	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,48	0,16
S_{48}	125	66,6	0,5	0,7	0,7	0,7	0,9	0,7	0,5	0,5	0,5	0,63	0,14

SÉRIE E

S_i	$f_{k,j}$ (Hz)	L_j dB(A)	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	$\mu_{\bar{A}_j}$	δ_j
S_{49}	1000	94,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,23	0,14
S_{50}	63	53,2	0,7	0,7	0,7	0,7	1	0,9	0,5	0,5	0,7	0,71	0,16
S_{51}	8000	73,7	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	0,43	0,10
S_{52}	4000	83,8	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0	0,3	0,20	0,12
S_{53}	2000	70,2	0,7	0,3	0,7	0,7	0,9	0,7	0,5	0,7	0,7	0,66	0,17
S_{54}	500	91,7	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3	0,30	0,10
S_{55}	1000	65,1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,7	0,5	0,7	0,7	0,70	0,10
S_{56}	125	75,9	0,5	0,7	0,7	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5	0,3	0,48	0,16
S_{57}	2000	98,4	0	0,1	0,3	0,3	0	0	0	0	0,1	0,09	0,13
S_{58}	500	81,3	0,7	0,5	0,7	0,3	0,5	0,3	0,5	0,5	0,3	0,48	0,16
S_{59}	4000	76,9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,7	0,50	0,10
S_{60}	250	100	0,1	0,1	0,7	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,26	0,22

SÉRIE F

S_i	$f_{k,j}$ (Hz)	L_j dB(A)	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	$\mu_{\bar{A}_j}$	δ_j
S_{61}	1000	84,8	0,5	0,5	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5	0,5	0,7	0,48	0,12
S_{62}	4000	92	0	0,1	0	0	0,3	0,1	0	0	0,3	0,09	0,13
S_{63}	125	67,8	0,7	0,5	0,7	0,7	0,5	0,5	0,7	0,5	0,7	0,61	0,11
S_{64}	2000	89,7	0,3	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3	0,21	0,11
S_{65}	500	71,7	0,7	0,7	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,59	0,11
S_{66}	2000	79,8	0,5	0,5	0,3	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,43	0,10
S_{67}	1000	94,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,5	0,3	0,5	0,28	0,16
S_{68}	500	72,1	0,7	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,7	0,5	0,7	0,59	0,11
S_{69}	4000	86,6	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,3	0,21	0,11
S_{70}	63	63,1	0,5	0,7	0,7	0,9	0,5	0,5	0,3	0,7	0,7	0,61	0,18
S_{71}	8000	84,5	0	0	0,3	0,1	0,3	0	0	0	0,3	0,11	0,15
S_{72}	250	79,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,7	0,50	0,10

ANEXO C

Planilhas de cálculo de G a I

SÉRIE G													
S_j	$f_{k,j}$ (Hz)	L_j dB(A)	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	$\mu_{\bar{A}_j}$	δ_j
S_{73}	1000	74,7	0,7	0,7	0,5	0,9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,59	0,15
S_{74}	250	89,5	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,34	0,13
S_{75}	4000	67,1	0,5	0,3	0,5	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7	0,5	0,57	0,14
S_{76}	8000	83	0,1	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1	0,3	0,26	0,13
S_{77}	125	86,5	0,5	0,7	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,32	0,19
S_{78}	1000	64,9	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7	0,5	0,5	0,7	0,7	0,63	0,10
S_{79}	63	51,7	0,7	0,7	0,7	1	0,7	0,9	0,9	0,9	0,5	0,78	0,16
S_{80}	2000	99,4	0	0,3	0,1	0	0,3	0	0	0	0,1	0,09	0,13
S_{81}	500	81,3	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,54	0,09
S_{82}	4000	77	0,3	0,3	0,3	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,5	0,46	0,17
S_{83}	500	91,1	0,5	0,7	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3	0,5	0,3	0,37	0,17
S_{84}	2000	70,3	0,5	0,7	0,5	0,9	0,5	0,7	0,5	0,7	0,5	0,61	0,15

SÉRIE H													
S_j	$f_{k,j}$ (Hz)	L_j dB(A)	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	$\mu_{\bar{A}_j}$	δ_j
S_{85}	500	91	0,7	0,3	0,7	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,34	0,22
S_{86}	4000	77	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,43	0,10
S_{87}	125	76,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,3	0,5	0,52	0,12
S_{88}	2000	90	0,3	0,3	0,3	0	0,3	0,3	0,1	0,1	0,3	0,22	0,12
S_{89}	8000	64	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7	0,5	0,59	0,11
S_{90}	63	45	0,7	0,7	0,9	0,9	1	0,7	1	0,9	0,7	0,83	0,13
S_{91}	1000	65,7	0,5	0,7	0,9	0,7	0,7	0,5	0,7	0,9	0,7	0,70	0,14
S_{92}	125	86,5	0,7	0,5	0,5	0,3	0,1	0,7	0,3	0,3	0,1	0,39	0,23
S_{93}	4000	86,5	0,3	0,3	0,3	0,1	0	0,3	0,1	0,3	0,1	0,20	0,12
S_{94}	2000	80,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,48	0,07
S_{95}	250	59,5	0,7	0,3	0,3	0,3	0	0,3	0,3	0,3	0	0,28	0,20
S_{96}	500	81,7	0,7	0,5	0,9	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,54	0,17

SÉRIE I													
S_j	$f_{k,j}$ (Hz)	L_j dB(A)	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	$\mu_{\bar{A}_j}$	δ_j
S_{97}	63	62,2	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,59	0,11
S_{98}	1000	87,6	0,5	0,3	0,7	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,43	0,14
S_{99}	125	76,1	0,7	0,5	0,7	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,5	0,48	0,16
S_{100}	4000	94,5	0	0,1	0,3	0,3	0	0	0	0	0	0,08	0,13
S_{101}	2000	70,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,61	0,11
S_{102}	250	79,7	0,5	0,7	0,7	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,7	0,54	0,13
S_{103}	500	71,2	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7	0,66	0,09
S_{104}	8000	83,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,26	0,09
S_{105}	2000	89,7	0,1	0,1	0,5	0,3	0,1	0,3	0	0,3	0,3	0,22	0,16
S_{106}	125	57,5	0,9	0,7	0,7	0,7	0,9	0,7	0,7	0,7	0,5	0,72	0,12
S_{107}	4000	86,8	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0	0,1	0,1	0,1	0,18	0,12
S_{108}	500	90,7	0,5	0,5	0,7	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,37	0,17

Planilhas de cálculo de J a M

S_j	$f_{k,i}$ (Hz)	L_j dB(A)	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	$\mu_{\hat{I}_j}$	δ_j
S_{109}	8000	74	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	0,43	0,10
S_{110}	2000	79,9	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	0,3	0,48	0,12
S_{111}	125	66,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7	0,5	0,66	0,09
S_{112}	4000	77	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,5	0,48	0,07
S_{113}	500	81,9	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,5	0,3	0,3	0,50	0,17
S_{114}	63	53,4	0,9	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7	0,7	0,9	0,5	0,70	0,14
S_{115}	1000	74,9	0,9	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,63	0,14
S_{116}	125	87	0,3	0,7	0,7	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,39	0,20
S_{117}	4000	67,4	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,59	0,11
S_{118}	2000	99,3	0	0,3	0,1	0,3	0	0	0	0	0	0,08	0,13
S_{119}	125	75,9	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0,50	0,17
S_{120}	500	91	0,5	0,7	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,39	0,18

S_i	$f_{k,j}$ (Hz)	L_j dB(A)	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	$\mu_{\hat{I}_j}$	δ_j
S_{121}	1000	94,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0	0,1	0	0,3	0,3	0,21	0,14
S_{122}	4000	86,7	0,3	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0	0,18	0,12
S_{123}	125	76,9	0,5	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,52	0,12
S_{124}	8000	64	0,5	0,5	0,7	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,61	0,11
S_{125}	250	99,5	0,1	0,3	0,7	0,3	0	0,3	0,3	0,3	0	0,26	0,21
S_{126}	63	63,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7	0,5	0,3	0,61	0,15
S_{127}	2000	89,6	0,1	0,1	0,5	0,3	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,23	0,14
S_{128}	500	71,8	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,59	0,11
S_{129}	1000	84,8	0,5	0,7	0,7	0,3	0,3	0,5	0,1	0,5	0,5	0,46	0,19
S_{130}	8000	83,1	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0	0,1	0,20	0,12
S_{131}	125	76,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,7	0,3	0,3	0,57	0,17
S_{132}	2000	69,7	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,61	0,11

[illegible]

ANEXO E

Resultados Reorganizados por Frequência – 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz e 500 Hz.

S_j	$f_{k,j}$ (Hz)	L_j dB(A)	$\mu_{\tilde{A}_j}$	δ_j
S ₈	63	62,9	0,61	0,15
S ₁₇	63	53,4	0,63	0,14
S ₃₅	63	62,6	0,61	0,11
S ₃₈	63	54	0,78	0,16
S ₅₀	63	53,2	0,71	0,16
S ₇₀	63	63,1	0,61	0,18
S ₇₉	63	51,7	0,78	0,16
S ₉₀	63	45	0,83	0,13
S ₉₇	63	62,2	0,59	0,11
S ₁₁₄	63	53,4	0,70	0,14
S ₁₂₆	63	63,6	0,61	0,15
S ₁₃₈	63	52,1	0,72	0,12
S ₁₄₁	63	62	0,59	0,20

S_j	$f_{k,j}$ (Hz)	L_j dB(A)	$\mu_{\tilde{A}_j}$	δ_j
S ₂	125	86,5	0,34	0,13
S ₂₃	125	76,7	0,48	0,12
S ₂₉	125	58,1	0,70	0,14
S ₄₈	125	66,6	0,63	0,14
S ₅₆	125	75,9	0,48	0,16
S ₆₃	125	67,8	0,61	0,11
S ₇₇	125	86,5	0,32	0,19
S ₈₇	125	76,7	0,52	0,12
S ₉₂	125	86,5	0,39	0,23
S ₉₉	125	76,1	0,48	0,16
S ₁₀₆	125	57,5	0,72	0,12
S ₁₁₁	125	66,9	0,66	0,09
S ₁₁₆	125	87	0,39	0,20
S ₁₁₉	125	75,9	0,50	0,17
S ₁₂₃	125	76,9	0,52	0,12
S ₁₃₁	125	76,7	0,57	0,17
S ₁₃₆	125	66,2	0,63	0,10

S_j	$f_{k,j}$ (Hz)	L_j dB(A)	$\mu_{\tilde{A}_j}$	δ_j
S ₆	250	99,4	0,27	0,17
S ₁₉	250	89,3	0,30	0,20
S ₂₅	250	79,3	0,48	0,12
S ₄₃	250	69,5	0,63	0,10
S ₆₀	250	100	0,26	0,22
S ₇₂	250	79,6	0,50	0,10
S ₇₄	250	89,5	0,34	0,13
S ₉₅	250	59,5	0,28	0,20
S ₁₀₂	250	79,7	0,54	0,13
S ₁₂₅	250	99,5	0,26	0,21
S ₁₄₄	250	78,7	0,54	0,09

S_j	$f_{k,j}$ (Hz)	L_j dB(A)	$\mu_{\tilde{A}_j}$	δ_j
S ₄	500	91,3	0,43	0,14
S ₁₀	500	71,9	0,61	0,11
S ₁₅	500	81,6	0,50	0,10
S ₂₁	500	62	0,66	0,17
S ₂₇	500	91,6	0,33	0,19
S ₃₃	500	82,1	0,50	0,10
S ₄₀	500	61,7	0,66	0,13
S ₄₅	500	71,5	0,63	0,10
S ₅₄	500	91,7	0,30	0,10
S ₅₈	500	81,3	0,48	0,16
S ₆₅	500	71,7	0,59	0,11
S ₆₈	500	72,1	0,59	0,11
S ₈₁	500	81,3	0,54	0,09
S ₈₃	500	91,1	0,37	0,17
S ₈₅	500	91	0,34	0,22
S ₉₆	500	81,7	0,54	0,17
S ₁₀₃	500	71,2	0,66	0,09
S ₁₀₈	500	90,7	0,37	0,17
S ₁₁₃	500	81,9	0,50	0,17
S ₁₂₀	500	91	0,39	0,18
S ₁₂₈	500	71,8	0,59	0,11
S ₁₃₉	500	70,7	0,66	0,09

ANEXO F

Resultados Reorganizados por Frequência – 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz e 8000 Hz

S_j	$f_{k,i}$ (Hz)	L_j dB(A)	$\mu_{\hat{A}_j}$	δ_j
S ₁	1000	94,7	0,26	0,17
S ₉	1000	85	0,54	0,09
S ₁₆	1000	75,5	0,57	0,10
S ₂₄	1000	66,7	0,59	0,15
S ₃₀	1000	85	0,41	0,11
S ₃₄	1000	75,4	0,61	0,11
S ₃₉	1000	94,7	0,22	0,16
S ₄₇	1000	84,5	0,48	0,16
S ₄₉	1000	94,5	0,23	0,14
S ₅₅	1000	65,1	0,70	0,10
S ₆₁	1000	84,8	0,48	0,12
S ₆₇	1000	94,1	0,28	0,16
S ₇₃	1000	74,7	0,59	0,15
S ₇₈	1000	64,9	0,63	0,10
S ₉₁	1000	65,7	0,70	0,14
S ₉₈	1000	87,6	0,43	0,14
S ₁₁₅	1000	74,9	0,63	0,14
S ₁₂₁	1000	94,7	0,21	0,14
S ₁₂₉	1000	84,8	0,46	0,19
S ₁₃₄	1000	94	0,30	0,17
S ₁₄₀	1000	84,1	0,50	0,10

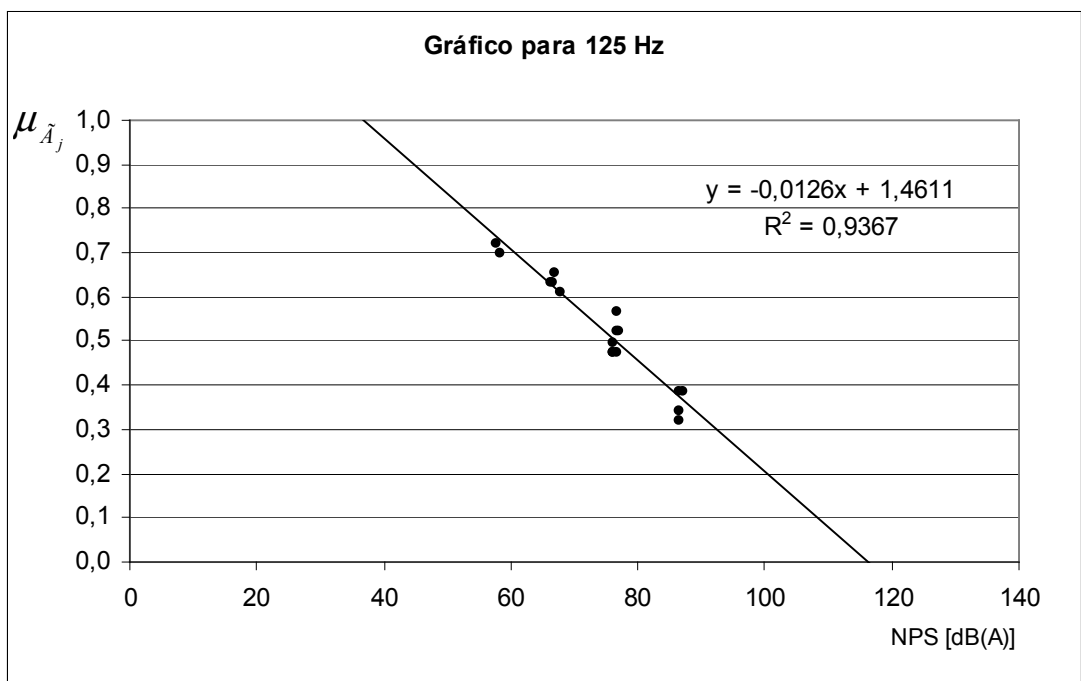
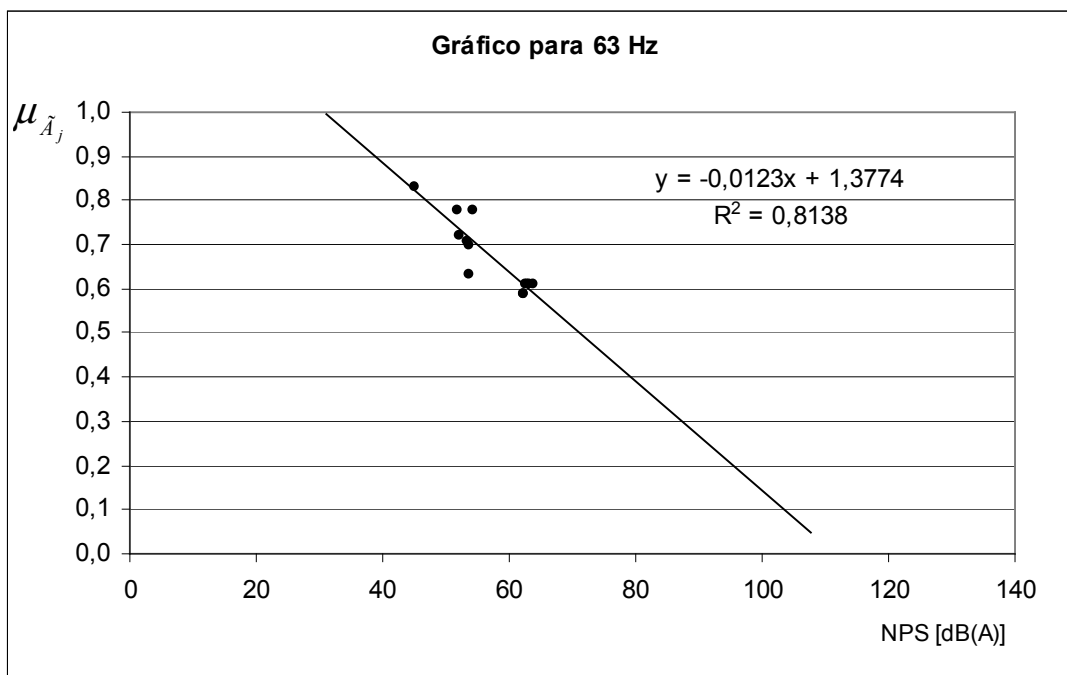
S_j	$f_{k,i}$ (Hz)	L_j dB(A)	$\mu_{\hat{A}_j}$	δ_j
S ₃	2000	99,1	0,08	0,13
S ₁₁	2000	89,9	0,23	0,14
S ₁₃	2000	79,9	0,50	0,10
S ₂₂	2000	69	0,61	0,15
S ₂₈	2000	69,7	0,52	0,12
S ₃₂	2000	88,9	0,18	0,12
S ₄₁	2000	79,7	0,46	0,09
S ₄₆	2000	99	0,10	0,12
S ₅₃	2000	70,2	0,66	0,17
S ₅₇	2000	98,4	0,09	0,13
S ₆₄	2000	89,7	0,21	0,11
S ₆₆	2000	79,8	0,43	0,10
S ₈₀	2000	99,4	0,09	0,13
S ₈₄	2000	70,3	0,61	0,15
S ₈₈	2000	90	0,22	0,12
S ₉₄	2000	80,1	0,48	0,07
S ₁₀₁	2000	70,5	0,61	0,11
S ₁₀₅	2000	89,7	0,22	0,16
S ₁₁₀	2000	79,9	0,48	0,12
S ₁₁₈	2000	99,3	0,08	0,13
S ₁₂₇	2000	89,6	0,23	0,14
S ₁₃₂	2000	69,7	0,61	0,11
S ₁₃₇	2000	79,7	0,48	0,07
S ₁₄₃	2000	98,7	0,10	0,18

S_j	$f_{k,i}$ (Hz)	L_j dB(A)	$\mu_{\hat{A}_j}$	δ_j
S ₅	4000	86,6	0,21	0,15
S ₁₂	4000	92,3	0,06	0,10
S ₁₄	4000	67	0,57	0,14
S ₂₀	4000	76,9	0,41	0,11
S ₂₆	4000	86,4	0,18	0,12
S ₃₁	4000	92,7	0,07	0,10
S ₄₂	4000	77	0,41	0,11
S ₄₄	4000	92,3	0,09	0,13
S ₅₂	4000	83,8	0,20	0,12
S ₅₉	4000	76,9	0,50	0,10
S ₆₂	4000	92	0,09	0,13
S ₆₉	4000	86,6	0,21	0,11
S ₇₅	4000	67,1	0,57	0,14
S ₈₂	4000	77	0,46	0,17
S ₈₆	4000	77	0,43	0,10
S ₉₃	4000	86,5	0,20	0,12
S ₁₀₀	4000	94,5	0,08	0,13
S ₁₀₇	4000	86,8	0,18	0,12
S ₁₁₂	4000	77	0,48	0,07
S ₁₁₇	4000	67,4	0,59	0,11
S ₁₂₂	4000	86,7	0,18	0,12
S ₁₃₃	4000	95,3	0,06	0,10

S_j	$f_{k,i}$ (Hz)	L_j dB(A)	$\mu_{\hat{A}_j}$	δ_j
S ₇	8000	83,1	0,34	0,13
S ₁₈	8000	73,6	0,39	0,11
S ₃₆	8000	73,5	0,43	0,10
S ₃₇	8000	64	0,59	0,15
S ₅₁	8000	73,7	0,43	0,10
S ₇₁	8000	84,5	0,11	0,15
S ₇₆	8000	83	0,26	0,13
S ₈₉	8000	64	0,59	0,11
S ₁₀₄	8000	83,3	0,26	0,09
S ₁₀₉	8000	74	0,43	0,10
S ₁₂₄	8000	64	0,61	0,11
S ₁₃₀	8000	83,1	0,20	0,12
S ₁₃₅	8000	82,5	0,32	0,12
S ₁₄₂	8000	72,8	0,46	0,09

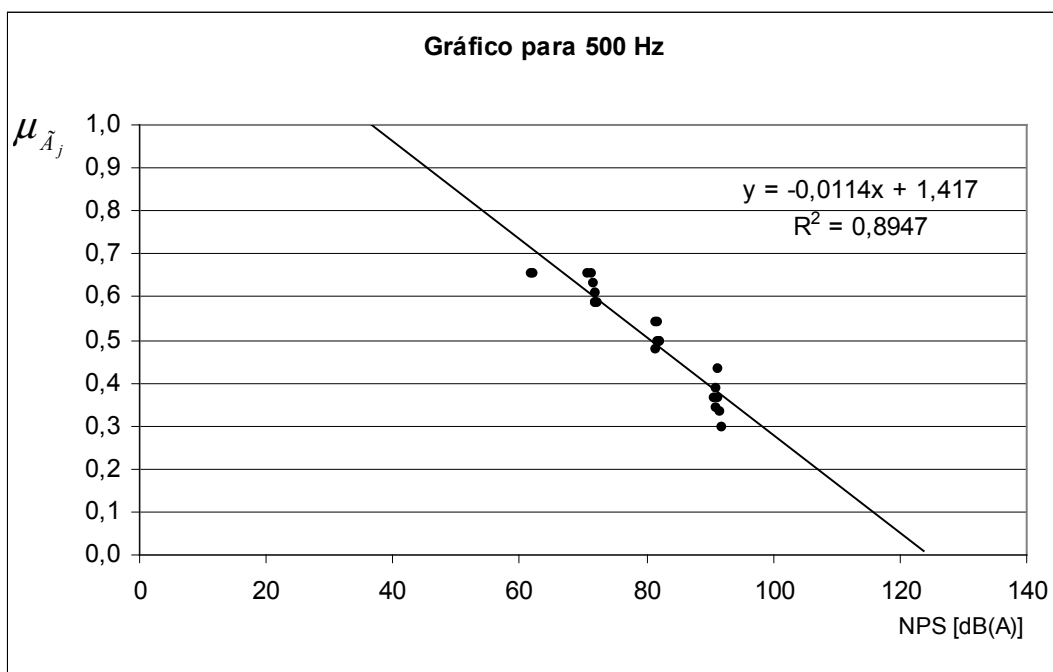
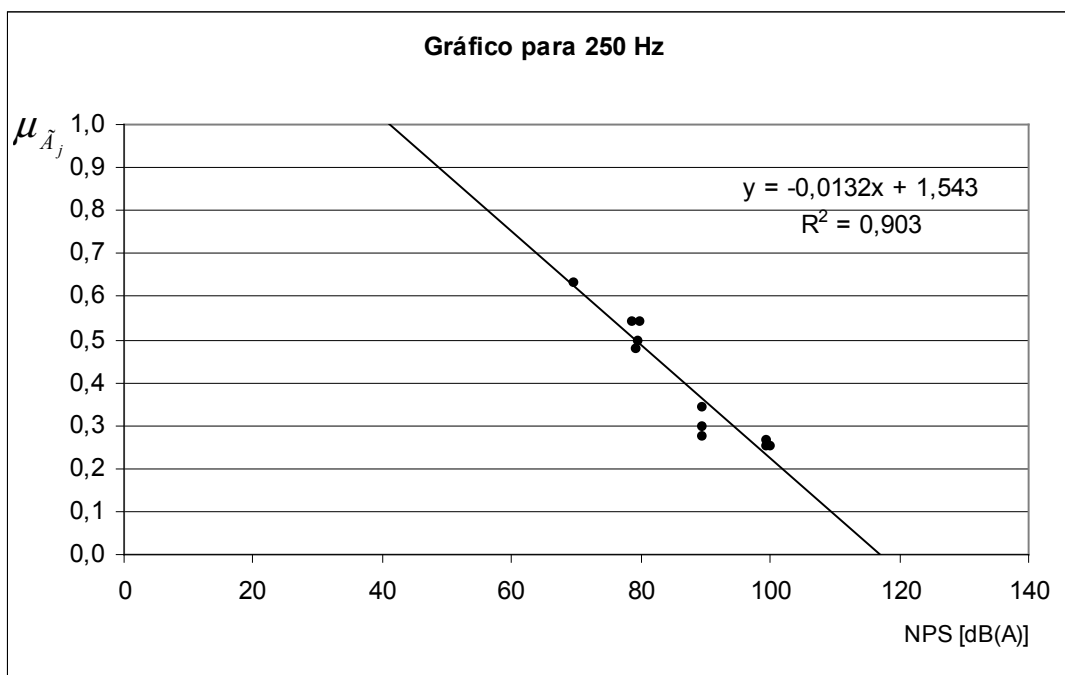
ANEXO G

Gráficos gerados para 63 Hz e 125 Hz



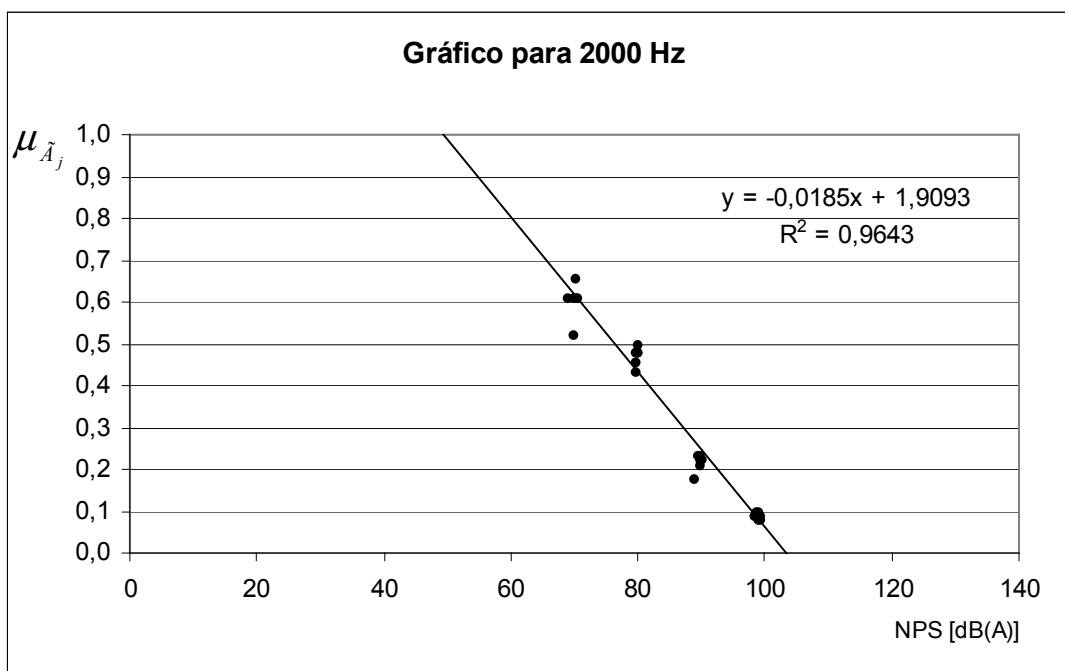
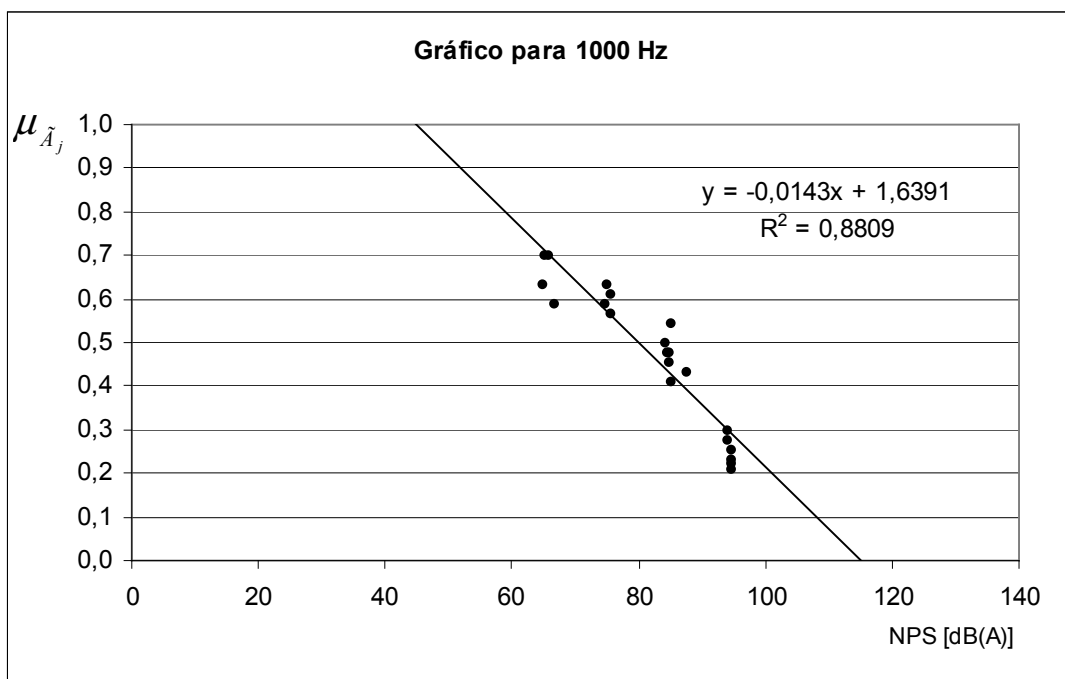
ANEXO H

Gráficos gerados para 250 Hz e 500 Hz



ANEXO I

Gráficos gerados para 1000 Hz e 2000 Hz



ANEXO J

Gráficos gerados para 4000 Hz e 8000 Hz

